



**İSKENDERUN TEKNİK**

ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**SICAK HADDELEME PROSESİNDE  
KABA HADDELEME AŞAMASININ  
MODELENEREK  
OPTİMİZASYONUNUN YAPILMASI**

**DOKTORA  
TEZİ**

**Faruk ÇAVDAR**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**

**TEMMUZ 2021**

**Faruk ÇAVDAR**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**TEMMUZ 2021**



**SICAK HADDELEME PROSESİNDE KABA HADDELEME AŞAMASININ  
MODELLENEREK OPTİMİZASYONUNUN YAPILMASI**

**Faruk ÇAVDAR**

**DOKTORA TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**TEMMUZ 2021**

Faruk ÇAVDAR tarafından hazırlanan “SICAK HADDELEME PROSESİNDE KABA HADDELEME AŞAMASININ MODELLENEREK OPTİMİZASYONUNUN YAPILMASI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ / OY ÇOKLUĞU ile İskenderun Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Doç. Dr. Erdoğan KANCA

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

.....  
.....

**Başkan:** Unvanı Adı SOYADI

Anabilim Dalı, Üniversite Adı (Örnek: Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi)

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

.....  
.....

**Üye:** Unvanı Adı SOYADI

Anabilim Dalı, Üniversite Adı (Örnek: Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi)

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

.....  
.....

**Üye:** Unvanı Adı SOYADI

Anabilim Dalı, Üniversite Adı (Örnek: Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi)

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

.....  
.....

**Üye:** Unvanı Adı SOYADI

Anabilim Dalı, Üniversite Adı (Örnek: Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi)

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

.....  
.....

Tez Savunma Tarihi: ...../...../.....

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Doç. Dr. Ersin BAHÇECİ

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

## ETİK BEYAN

İskenderun Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülendiğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu,
  - Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
  - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
  - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
  - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
  - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

İmza

Faruk ÇAVDAR

...../...../.....



# SICAK HADDELEME PROSESİNDE KABA HADDELEME AŞAMASININ MODELLENEREK OPTİMİZASYONUNUN YAPILMASI

(Doktora Tezi)

Faruk ÇAVDAR

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

TEMMUZ 2021

## ÖZET

Bu tez çalışmasında sıcak haddelemede prosesinin optimizasyonunu güçleştiren en önemli unsur olan problemin ardışık yapısı ile baş etmek için bir çözüm geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla istenirlik fonksiyonu temelli bir ardışık çözüm arama stratejisi geliştirilmiştir. Ayrıca bu stratejiyi hadde pasosu tasarımında kullanabilmek için bir optimizasyon metodu önerilmiştir. Geliştirilen çözüm arama stratejisi optimizasyon sırasında ortaya çıkan prosesin yapısındaki ardışıklıktan dolayı ortaya çıkan kısıtlamalar ile birlikte geometrik ve teknolojik kısıtlamaları da dikkate almaktadır.

Geliştirilen çözüm arama stratejisi ve önerilen optimizasyon metodunun uygulamasını göstermek ve etkinliğini sınamak için bir durum çalışması yapılmıştır. Bu kapsamda 5 pasodan oluşan bir kaba haddeleme prosesinin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon çalışmasında proseste kullanılan toplam şekillendirme enerjisini en aza indirmek birincil hedef, merdanelere etki eden radyal kuvvetler ve döndürme momentlerini azaltmak ikincil hedef olarak belirlenmiştir. Optimizasyon çalışması iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada kaba haddelemede kullanılan kutu paso geometrisinin en ölçüleri ile yükseklik ölçüleri için optimum değerler tespit edilmiştir. İkinci aşamada ise birinci aşamada gerçekleştirilen optimum en ve yükseklik ölçüleri kullanılarak kutu paso geometrisinin ikincil geometrik parametreleri olan aç ve radyüslerin optimum değerleri bulunmuştur.

Durum çalışmasından elde edilen sonuçlar referans olarak kullanılan üç değişik endüstriyel paso sırası tasarımı ile karşılaştırılmıştır. Optimizasyon sonucunda referans tasarımların ortalamasına göre şekillendirme enerjisinde %18,78, radyal kuvvetlerde %7,46 ve döndürme momentinde %10,25 iyileşme sağlanmıştır. Bu tez çalışmasında geliştirilen çözüm arama stratejisi ve paso optimizasyon metodu endüstride faaliyet gösteren tüm haddeleme tesislerine uygulanabilir bir nitelik taşımaktadır.

Anahtar Kelimeler : Sıcak haddeleme, paso tasarımı, optimizasyon, istenirlik fonksiyonu, sonlu elemanlar yöntemi

Sayfa Adedi : 188

Danışman : Doç. Dr. Erdoğan KANCA

İkinci Danışman : -

OPTIMIZATON OF ROUGH ROLLING STAGE IN HOT ROLLING PROCESS BY  
MODELING  
(Ph. D. Thesis)

Faruk ÇAVDAR

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY  
INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

JULY 2021

ABSTRACT

The aim of this study is development of a solution to cope with sequential nature of hot rolling process which is the main factor making the optimization of the process intricate. A solution search strategy based on desirability functions has been developed to get this aim. In addition, an optimization method is suggested to use developed strategy in roll pass design. Besides restrictions required by sequential nature of the process, geometric and technological restrictions are also considered in the developed solution search strategy.

A case study has been conducted for demonstration and validation of solution search strategy and suggested optimization method. Optimization of a rough Rolling process with 5 passes has done in this scope. The main goal of the optimization study is to minimize total deformation energy consumed in the process and the secondary goals are to reduce radial forces and turning moments acting on the rolls. The optimization study is consisting of two stages. Optimum width and height values of box pass geometry used in rough rolling have been determined in the first stage. Optimum values of minor geometric parameters i.e., angle and radii have been optimized in the second stage by using optimum width and height values.

The results of the case study have been compared with three reference industrial pass sequence designs. As a result of optimizations deformation energy, radial forces and turning moments are reduced by 18.78%, 7.46% and 10.25% respectively with respect to average values of reference industrial designs. Solution search strategy and roll pass optimization method developed in this thesis study are available to be used in the industrial rolling processes.

Key Words : Hot rolling, pass design, optimization, desirability functions,  
finite element method  
Page Number : 188  
Supervisor : Doç. Dr. Erdoğan KANCA  
2nd Supervisor : -

## TEŞEKKÜR

Doktora çalışmalarım boyunca her türlü bilimsel, teknik ve manevi olarak desteğini sürdüren ve tez çalışmalarım da danışmanlığımı üstlenen çok kıymetli hocam Doç. Dr. Erdoğan KANCA'ya,

Doktora çalışmalarım sırasında bilimsel ve teknik olarak beni destekleyen ve tecrübeleriyle yönlendiren kıymetli Doç. Dr. Ali GÜNEN hocama,

Çalışmamda tez izleme komitesinde yer alan ve kıymetli görüşleriyle destek olan değerli Dr. Öğr. Üyesi M. Veysel ÇAKIR hocalarıma,

Tez savunma jürisinde yer alan sayın hocalarıma,

Tez çalışmaları sırasında yazılım desteği ve teknik destek veren sayın Mert AYGEN'e "NETFORM Mühendislik Makina Metal Ltd. Sti.",

Doktora çalışmalarım sırasında endüstriyel uygulamalar ile ilgili destek veren sayın Ali EKER ve İsmail KALLECİOĞLUNA,

Tüm hayatımı borçlu olduğum ve sürekli maddi, manevi destekleriyle arkamda olan canım annem ve babam Meliha ve Mehmet Ali ÇAVDAR'a,

Hayatın yükünü birlikte taşıdığımız, iyi ve kötü günde hep yanımda olan ve doktora çalışmalarım sırasında da moral ve manevi desteğini hep hissettiğim sevgili eşim Nuran ÇAVDAR'a ve varlığıyla ve sevgisiyle bana güç veren oğlum Ömer Selim ÇAVDAR'a

En derin teşekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

|  | <b>Sayfa</b> |
|--|--------------|
| ÖZET .....   | iv           |
| ABSTRACT.....  | v            |
| TEŞEKKÜR.....  | vi           |
| İÇİNDEKİLER .....  | vii          |
| ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....  | x            |
| ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....   | xiii         |
| RESİMLERİN LİSTESİ .....   | xv           |
| SİMGELER VE KISALTMALAR.....   | xix          |
| 1. GİRİŞ .....   | 1            |
| 2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....                                       | 7            |
| 2.1. Sıcak Haddelme.....   | 7            |
| 2.1.1. Haddelmede prosesinde geometrik parametreler.....                             | 7            |
| 2.1.2. Sıcak haddelmede merdane kuvvetlerinin ve haddelme torkunun hesaplanması..... | 12           |
| 2.1.3. Sıcak haddelmede ezme miktarı, uzama ve yayılmanın etkileşimi .....           | 15           |
| 2.1.4. Düzlem haddelmede deformasyon işinin hesaplanması .....                       | 17           |
| 2.2. Paso Tasarım Temelleri.....   | 17           |
| 2.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi .....   | 19           |
| 2.3.1. Çözüm bölgesinin ayrıklaştırılması .....                                      | 21           |
| 2.3.2. Eleman denklemlerinin oluşturulması .....                                     | 25           |
| 2.3.3. Direngelik matrisinin oluşturulması .....                                     | 26           |
| 2.3.4. Sonlu eleman denklemlerinin çözümü .....                                      | 27           |
| 2.3.5. Son işlemler (postprocessing).....  | 27           |
| 2.4. Cevap Yüzeyi Yöntemi .....  | 27           |
| 2.4.1. CYY'nde kullanılan deney tasarımları .....                                    | 29           |

|  | <b>Sayfa</b> |
|--|--------------|
| 2.4.2. Optimum şartların tespit edilmesi.....  | 35           |
| 2.5. Çok amaçlı optimizasyon ve istenirlik fonksiyonu .....                                  | 38           |
| 2.6. Önceki Çalışmalar .....   | 41           |
| 2.6.1. Hadde paso tasarımı ile ilgili çalışmalar.....  | 41           |
| 2.6.2. Sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile ilgili çalışmalar.....                              | 50           |
| 2.6.3. Simufact.forming yazılımı ile ilgili çalışmalar.....                                  | 53           |
| 2.6.4. Cevap yüzey yöntemi ile ilgili çalışmalar .....                                       | 56           |
| 2.6.5. İstenirlik fonksiyonu ile ilgili çalışmalar.....                                      | 59           |
| 3. MATERYAL VE YÖNTEM.....   | 64           |
| 3.1. Geliştirilen İstenirlik Temelli Çözüm Arama Stratejisi .....                            | 64           |
| 3.2. Önerilen Paso Optimizasyon Metodu .....   | 66           |
| 3.3. Durum Çalışması.....  | 67           |
| 3.3.1. Kütük başlangıç ve son ürün ölçülerinin belirlenmesi .....                            | 67           |
| 3.3.2. Paso sayısı ve yönelimleri .....  | 69           |
| 3.3.3. Bağımsız değişkenlerin deneysel değerlerinin tespiti .....                            | 69           |
| 3.3.4. Simülasyon deneylerinin gerçekleştirilmesi ve bağımlı değişkenlerin hesaplanması..... | 71           |
| 3.3.5. Simülasyon sonuçlarından şekillendirme enerjisinin hesaplanması.....                  | 82           |
| 3.3.6. Sonlu elemanlar modellemesinin doğrulanması.....                                      | 85           |
| 3.3.7. ANOVA ve cevap yüzeylerinin oluşturulması.....  | 90           |
| 3.3.8. Geliştirilen çözüm arama stratejisinin uygulanması.....                               | 91           |
| 3.3.9. Optimum paso tasarımının doğrulanması .....   | 94           |
| 3.3.10. İkincil geometrik parametrelerin optimizasyonu.....                                  | 94           |
| 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....  | 99           |
| 4.1. Durum Çalışmasından Elde Edilen Bulgular .....  | 99           |
| 4.1.1. Deneylerde kullanılan bağımsız değişken değerleri.....                                | 99           |

|   | <b>Sayfa</b> |
|---|--------------|
| 4.1.2. Simülasyon deneylerinde kullanılan sonlu elemanlar yönteminin ve şekillendirme enerjisi hesaplamalarının doğrulanması..... | 100          |
| 4.1.3. ANOVA ve cevap yüzeyleri.....  | 104          |
| 4.1.4. İstenirlik temelli çözüm arama stratejisi uygulama sonuçları .....   | 119          |
| 4.2. Optimum Paso Tasarımın Doğrulanma Sonuçları .....  | 135          |
| 4.3. İkincil Geometrik Parametrelerin Optimizasyon Sonuçları .....  | 140          |
| 4.3.1. Deney Tasarımı .....   | 140          |
| 4.3.2. İkincil geometrik parametreler için cevap yüzeyleri .....  | 141          |
| 4.3.3. İkincil geometrik parametreler için optimizasyon sonuçları .....   | 157          |
| 4.3.4. İkincil geometrik parametre optimizasyonu doğrulama sonuçları .....  | 158          |
| <b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>   | <b>165</b>   |
| 5.1. Birinci Aşama Optimizasyon Sonuçları .....   | 166          |
| 5.2. İkinci Aşama Optimizasyon Sonuçları.....   | 167          |
| 5.3. Öneriler.....  | 168          |
| <b>KAYNAKLAR .....</b>  | <b>170</b>   |
| <b>EKLER.....</b>   | <b>180</b>   |
| <b>DİZİN.....</b>   | <b>187</b>   |

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

| <b>Çizelge</b>   | <b>Sayfa</b> |
|--|--------------|
| Çizelge 3.1. Deneysel setlerinde kullanılan bağımsız değişkenlerle ilgili özet bilgi.....  | 71           |
| Çizelge 3.2. Deneysel paso tasarımlarında kullanılan radyüs ve açılı ölçüleri.....   | 71           |
| Çizelge 3.3. S235JR kalite çeliğin kimyasal özellikleri .....  | 73           |
| Çizelge 3.4. S235JR kalite çelik mekanik özellikleri .....   | 73           |
| Çizelge 3.5. St37-2_h malzemenin tanımlı olduğu sınır değerler .....   | 73           |
| Çizelge 3.6. St-37-2-h malzemenin termal özelliklerinin sabit değerleri.....   | 78           |
| Çizelge 3.7. İtme yayının özellikleri .....  | 80           |
| Çizelge 3.8. Açılı hız ölçümlerinde kullanılan devir ölçerinin teknik özellikleri .....  | 87           |
| Çizelge 3.9. Bağımlı değişkenler (cevaplar) ile ilgili özet bilgiler.....  | 90           |
| Çizelge 3.10. Optimizasyon sırasında bağımsız ve bağımlı değişkenler için belirlenen istenirlik hedefleri ve istenirlik fonksiyonu ile bulunan çözümler ve bunlara karşılık gelen istenirlik değerleri. .... | 93           |
| Çizelge 3.11. İkincil parametre optimizasyonu için kullanılan bağımsız değişkenler ..  | 95           |
| Çizelge 3.12. Cevap yüzeyi oluşturmak için kullanılan deney setleri ve bunlara karşılık gelen bağımlı değişken değerleri.....  | 96           |
| Çizelge 3.13. Deneyler sonucu elde edilen cevap değerleri ile ilgili özet bilgiler.....  | 97           |
| Çizelge 3.14. İkinci geometrik parametre optimizasyonunda tanımlanan hedefler.....   | 97           |
| Çizelge 4.1. Bir kütüğün işlenmesi sırasında ortaya çıkan akım ve bunlara karşılık gelen güç ve enerji değerleri .....   | 101          |
| Çizelge 4.2. Doğrulama için kullanılan paso tasarımının simülasyonundan elde edilen şekillendirme enerjisi değerleri .....   | 102          |
| Çizelge 4.3. $F_r$ için ANOVA sonuçları tablosu .....  | 105          |
| Çizelge 4.4. $F_r$ regresyon modeli için uyum istatistikleri .....   | 105          |
| Çizelge 4.5. $F_r$ cevap modeli için kodlanmış ve gerçek değerler cinsinden denklem katsayıları .....  | 107          |
| Çizelge 4.6. $M_r$ için ANOVA sonuçları.....   | 110          |
| Çizelge 4.7. $M_r$ regresyon modeli için uyum istatistikleri.....  | 111          |

| <b>Çizelge</b>  | <b>Sayfa</b> |
|---|--------------|
| Çizelge 4.8. $M_t$ cevap modeli için kodlanmış ve gerçek değerler cinsinden denklem katsayıları .....   | 112          |
| Çizelge 4.9. $E_d$ için ANOVA sonuçları .....   | 116          |
| Çizelge 4.10. $E_d$ regresyon modeli için uyum istatistikleri.....  | 116          |
| Çizelge 4.11. $E_d$ cevap modeli için kodlanmış ve gerçek değerler cinsinden denklem katsayıları .....  | 117          |
| Çizelge 4.12. Referans endüstriyel tasarımlar ve optimize edilmiş tasarımın SEY simülasyon sonuçları .....  | 136          |
| Çizelge 4.13. Referans endüstriyel paso tasarımları ile birinci aşama optimum paso tasarımı aralarındaki karşılaştırma sonuçları.....                         | 139          |
| Çizelge 4.14. Referans pasolar ve birinci aşama optimizasyon sonucunda elde edilen yüzde kesit daralması başına şekillendirme enerjisi karşılaştırmaları..... | 140          |
| Çizelge 4.15. $F_r$ için ANOVA sonuçları .....  | 142          |
| Çizelge 4.16. İkincil geometrik parametrelerin $F_r$ regresyon modeli için uyum istatistikleri .....  | 142          |
| Çizelge 4.17. İkincil geometrik parametreler için $F_r$ 'nin kodlanmış ve gerçek değerler cinsinden eşitlik katsayıları .....                                 | 143          |
| Çizelge 4.18. $M_t$ için ANOVA sonuçları .....  | 146          |
| Çizelge 4.19. İkincil geometrik parametrelerin $M_t$ regresyon modeli için uyum istatistikleri .....  | 147          |
| Çizelge 4.20. İkincil geometrik parametreler için $M_t$ 'nin kodlanmış ve gerçek değerler cinsinden eşitlik katsayıları .....                                 | 148          |
| Çizelge 4.21. İkincil geometrik parametrelerin $E_d$ modeli için ANOVA sonuçları .....  | 151          |
| Çizelge 4.22. İkincil geometrik parametrelerin $E_d$ regresyon modeli için uyum istatistikleri .....  | 151          |
| Çizelge 4.23. İkincil geometrik parametreler için $E_d$ 'nin kodlanmış ve gerçek değerler cinsinden eşitlik katsayıları .....                                 | 152          |
| Çizelge 4.24. İkincil geometrik parametrelerin optimizasyonundan elde edilen değerler.....  | 158          |
| Çizelge 4.25. İkincil geometrik parametre optimizasyon doğrulamasından elde edilen $E_d$ , $F_r$ ve $M_t$ değerleri .....                                     | 158          |
| Çizelge 4.26. Referans endüstriyel paso tasarımları ile ikinci aşamada elde edilen optimum paso tasarımı aralarındaki karşılaştırma sonuçları.....            | 164          |



**Çizelge****Sayfa**

Çizelge 4.27. Referans pasolar ve ikinci aşama optimizasyon sonucunda elde edilen yüzde kesit daralması başına şekillendirme enerjisi karşılaştırmaları..... 164



## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

| <b>Şekil</b>  | <b>Sayfa</b> |
|---|--------------|
| Şekil 3.1. İstenirlik temelli ardışık çözüm arama stratejisi akış diyagramı .....   | 65           |
| Şekil 3.2. Önerilen paso optimizasyon metodu bilgi akış şeması.....   | 68           |
| Şekil 3.3. Kutu paso geometrisi ve parametrik ölçüleri.....   | 68           |
| Şekil 3.4. Modelleme ve simülasyon çalışmaları sonucu elde edilmiş örnek bir tork zaman grafiği .....   | 84           |
| Şekil 3.5. Kaba haddelme sırasında motor tarafından çekilen akımın zaman bağlı değişimi .....   | 86           |
| Şekil 3.6. Bir kütüğün haddelenmesi sırasında a) motorun çektiği akımın b) volan açışal hızının zamanla değişimi.....   | 89           |
| Şekil 4.1. Kütükler için endüstriyel verilerden hesaplanan ve simülasyon sonuçlarından elde edilen 1 m başlangıç uzunluğundaki malzemenin şekillendirilmesi için gereken enerji değerleri ..... | 103          |
| Şekil 4.2. Simülasyondan elde edilen şekillendirme enerjisi ile her bir kütük için harcanan elektrik enerjisi arasındaki oransal fark .....   | 103          |
| Şekil 4.3. Endüstriyel referans ve birinci aşama optimizasyon çalışmaları sonucunda elde edilen paso tasarımlarının şekillendirme enerjisi karşılaştırması .....                                | 137          |
| Şekil 4.4. Endüstriyel referans ve birinci aşama optimizasyon çalışmaları sonucunda elde edilen paso tasarımlarının şekillendirme radyal kuvvetler karşılaştırması.....                         | 138          |
| Şekil 4.5. Endüstriyel referans ve birinci aşama optimizasyon çalışmaları sonucunda elde edilen paso tasarımlarının döndürme momentleri karşılaştırması .....                                   | 138          |
| Şekil 4.6. İkincil geometrik parametre optimizasyonunun radyal kuvvetlere etkisi.....   | 159          |
| Şekil 4.7. İkincil geometrik parametre optimizasyonunun döndürme momentine etkisi .....   | 160          |
| Şekil 4.8. İkincil geometrik parametre optimizasyonunun şekillendirme enerjisine etkisi .....   | 160          |
| Şekil 4.9. Endüstriyel referans ve ikinci aşama optimizasyon çalışmaları sonucunda elde edilen paso tasarımlarının şekillendirme enerjisi karşılaştırması .....                                 | 161          |
| Şekil 4.10. Endüstriyel referans ve ikinci aşama optimizasyon çalışmaları sonucunda elde edilen paso tasarımlarının radyal kuvvelerinin karşılaştırması .....                                   | 162          |

**Şekil****Sayfa**

Şekil 4.11. Endüstriyel referans ve ikinci aşama optimizasyon çalışmaları sonucunda elde edilen paso tasarımlarının döndürme momentleri karşılaştırması..... 163



## RESİMLERİN LİSTESİ

| <b>Resim</b>   | <b>Sayfa</b> |
|--|--------------|
| Resim 1.1. Merdaneler üzerine açılmış kalibreler ve karşılıklı kalibrelerin oluşturduğu pasolar (Çapan, 2010).....                                   | 2            |
| Resim 2.1. Haddedeleme iş parçasının temel ölçüleri .....  | 8            |
| Resim 2.2. Sacların haddelenmesinin şematik gösterimi.....   | 9            |
| Resim 2.3. Haddedeleme malzeme kalınlığındaki azalma ile malzeme hızının ilişkisi.....   | 10           |
| Resim 2.4. Haddedeleme başlangıcında saca etkiyen kuvvetler .....  | 11           |
| Resim 2.5. Düzlem haddedeleme basınç dağılımının şematik gösterimi (Wusatowski, 1969).....   | 13           |
| Resim 2.6. Bileşke merdane kuvveti ve moment kolunun a) temas yayına, b) temas yayının izdüşümüne göre gösterimi(Wusatowski, 1969) .....             | 14           |
| Resim 2.7. Merdaneler ile a) dar şerit ve b) geniş şerit arasındaki temas yüzey izdüşümünün şematik gösterimi (Wusatowski, 1955).....                | 15           |
| Resim 2.8. Sıcak haddedeleme sıklıkla kullanılan paso şekilleri (Çapan 2010) .....   | 19           |
| Resim 2.9. Tek boyutlu elemanın a) basit gösterimi, b) şematik gösterimi c) düğüm noktalarındaki birden fazla serbestlik derecesinin gösterimi. .... | 23           |
| Resim 2.10. İki boyutlu eleman gösterimleri.....   | 24           |
| Resim 2.11. Üç boyutlu eleman gösterimleri (Rao, 2011) .....   | 24           |
| Resim 2.12. Eksenel simetrik eleman gösterimleri (Rao, 2011).....  | 24           |
| Resim 2.13. Yüksek dereceli eleman gösterimleri (Rao, 2011) .....  | 25           |
| Resim 2.14. a) 3 düğüm noktalı, b) 6 düğüm noktalı, c) 10 düğüm noktalı üçgen eleman (Hutton 2004).....  | 25           |
| Resim 3.1. Durum çalışmasında kullanılan paso düzeni .....   | 70           |
| Resim 3.2. St37-2_h malzemenin elastik modülün sıcaklığa bağlı değişimi (Simufact Engineering GmbH 2012).....  | 74           |
| Resim 3.3. St37-2_h malzeme için elde edilen akma eğrileri .....   | 75           |
| Resim 3.4. St-37-2_h malzemenin termal özelliklerinin sıcaklık ile değişimi .....  | 77           |
| Resim 3.5. İş parçasının başlangıçtaki şekil ve boyutları .....  | 78           |
| Resim 3.6. Bir üçlü merdane setinin ortografik ön ve izometrik görünüşleri.....  | 78           |

| <b>Resim</b>   | <b>Sayfa</b> |
|--|--------------|
| Resim 3.7. Bir pasoyu oluşturan merdane çiftinin 3 boyutlu görüntüsü .....   | 79           |
| Resim 3.8. Merdane modelinin kesit görünümü.....   | 79           |
| Resim 3.9. SEY modelinde kullanılan yardımcı parçalar ve konumlandırılmaları .....   | 79           |
| Resim 3.10. Eleman tipi 7 şematik gösterimi ve entegrasyon noktaları (Simufact Engineering GmbH 2015) .....                    | 82           |
| Resim 3.11. Eleman ağı oluşturulmuş bir iş parçasının görünümü .....   | 82           |
| Resim 3.12. Haddelme sırasında merdaneler ile iş parçası arasında oluşan temas yayı .....                                      | 83           |
| Resim 3.13. Kaba hadde tezgahında hareket aktarma sistemi .....  | 86           |
| Resim 3.14. Volan açısal hızının ölçülmesi.....  | 88           |
| Resim 3.15. Güç-zaman grafiğinin enerji hesaplamasındaki kullanımı .....   | 89           |
| Resim 3.16. Çözüm arama sırasında taranacak bölgenin gösterimi .....   | 91           |
| Resim 4.1. Simülasyon deneylerinde kullanılan a) $e_1$ , $e_2$ değerlerinin ve b) $h_1$ , $h_2$ değerlerinin dağılımları ..... | 100          |
| Resim 4.2. $F_r$ için artıkların normal % olasılık dağılımı.....   | 108          |
| Resim 4.3. $F_r$ için model tahminlerine karşılık artık değerleri dağılımı .....   | 109          |
| Resim 4.4. $F_r$ için gerçek değer – model tahmini dağılımı .....  | 109          |
| Resim 4.5. $M_t$ için dışsal studentize artıkların normal % olasılık dağılımı .....  | 113          |
| Resim 4.6. $M_t$ için model tahminine karşılık dışsal studentize artıkların dağılımı grafiği.....                              | 114          |
| Resim 4.7. $M_t$ için gerçek değerlere karşılık model tahmin değerleri grafiği .....   | 115          |
| Resim 4.8. $E_d$ için dışsal studentize artıkların normal % olasılık dağılımı.....   | 118          |
| Resim 4.9. $E_d$ için model tahminine karşılık dışsal studentize artıkların dağılımı grafiği.....                              | 118          |
| Resim 4.10. $E_d$ için gerçek değerlere karşılık model tahmin değerleri grafiği .....  | 119          |
| Resim 4.11. $F_r$ 'nin $e_1=150$ mm ve $h_1=150$ mm sabit değerleri için 3 boyutlu yüzey grafiği.....                          | 122          |
| Resim 4.12. $M_t$ 'nin $e_1=150$ mm ve $h_1=150$ mm sabit değerleri için 3 boyutlu yüzey grafiği.....                          | 123          |

| <b>Resim</b>   | <b>Sayfa</b> |
|--|--------------|
| Resim 4.13. $E_d$ 'nin $e_1=150$ mm ve $h_1=150$ mm sabit değerleri için 3 boyutlu yüzey grafiği.....                              | 123          |
| Resim 4.14. $F_r$ 'nin $e_1=159,748$ mm ve $h_1=126,122$ mm sabit değerleri için 3 boyutlu yüzey grafiği .....                     | 125          |
| Resim 4.15. $M_t$ ' nin $e_1=159,748$ mm ve $h_1=126,122$ mm sabit değerleri için 3 boyutlu yüzey grafiği.....                     | 126          |
| Resim 4.16. $E_d$ 'nin $e_1=159,748$ mm ve $h_1=126,122$ mm sabit değerleri için 3 boyutlu yüzey grafiği .....                     | 126          |
| Resim 4.17. $F_r$ 'nin $e_1=105.938$ mm ve $h_1=165.283$ mm sabit değerleri için 3 boyutlu yüzey grafiği .....                     | 128          |
| Resim 4.18. $M_t$ ' nin $e_1=105.938$ mm ve $h_1=165.283$ mm sabit değerleri için 3 boyutlu yüzey grafiği.....                     | 128          |
| Resim 4.19. $E_d$ 'nin $e_1=105.938$ mm ve $h_1=165.283$ mm sabit değerleri için 3 boyutlu yüzey grafiği.....                      | 129          |
| Resim 4.20. $F_r$ 'nin $e_2=117,906$ mm ve $h_1=122,168$ mm sabit değerleri için 3 boyutlu yüzey grafiği .....                     | 131          |
| Resim 4.21. $M_t$ ' nin $e_2=117,906$ mm ve $h_1=122,168$ mm sabit değerleri için 3 boyutlu yüzey grafiği.....                     | 131          |
| Resim 4.22. $E_d$ 'nin $e_2=117,906$ mm ve $h_1=122,168$ mm sabit değerleri için 3 boyutlu yüzey grafiği.....                      | 132          |
| Resim 4.23. $F_r$ 'nin $e_1=85,472$ mm ve $h_1= 128.512$ mm sabit değerleri için 3 boyutlu yüzey grafiği .....                     | 133          |
| Resim 4.24. $M_t$ ' nin $e_1=85,472$ mm ve $h_1= 128,512$ mm sabit değerleri için 3 boyutlu yüzey grafiği.....                     | 134          |
| Resim 4.25. $E_d$ 'nin $e_1=85,472$ mm ve $h_1= 128.512$ mm sabit değerleri için 3 boyutlu yüzey grafiği .....                     | 135          |
| Resim 4.26. $A\check{c}ı - r_3$ dağılım grafiği.....   | 141          |
| Resim 4.27. İkincil geometrik parametreler için $F_r$ modelinin dışsal studentize artıklar normal % olasılık dağılımı .....        | 144          |
| Resim 4.28. İkincil geometrik parametreler için $F_r$ modelinin model tahminine karşılık dışsal studentize artıklar dağılımı ..... | 145          |
| Resim 4.29. İkincil geometrik parametreler için $F_r$ modelinin ger\ek değere karşılık model tahmini karşılık dağılımı.....        | 145          |

| <b>Resim</b>  | <b>Sayfa</b> |
|---|--------------|
| Resim 4.30. İkincil geometrik parametreler için $M_t$ modelinin dışsal studentize artıklar normal % olasılık dağılımı.....                              | 149          |
| Resim 4.31. İkincil geometrik parametreler için $M_t$ modelinin model tahminine karşılık dışsal studentize artıklar dağılımı.....                       | 149          |
| Resim 4.32. İkincil geometrik parametreler için $M_t$ modelinin gerçek değere karşılık model tahmini karşılık dağılımı.....                             | 150          |
| Resim 4.33. $r_1 = 10$ mm ve $r_2 = 10$ mm sabit değerleri için $F_r$ 'nin $\alpha$ ve $r_3$ ile değişiminin a) 3B yüzey ve b) kontur grafikleri.....   | 153          |
| Resim 4.34. $r_1 = 10$ mm ve $r_3 = 1000$ mm sabit değerleri için $F_r$ 'nin $\alpha$ ve $r_3$ ile değişiminin a) 3B yüzey ve b) kontur grafikleri..... | 155          |
| Resim 4.35. $r_1 = 10$ mm ve $r_2 = 10$ mm sabit değerleri için $E_d$ 'nin $\alpha$ ve $r_3$ ile değişiminin a) 3B yüzey ve b) kontur grafikleri.....   | 156          |
| Resim 4.36. $r_1 = 10$ mm ve $r_3 = 1000$ mm sabit değerleri için $E_d$ 'nin $\alpha$ ve $r_3$ ile değişiminin a) 3B yüzey ve b) kontur grafikleri..... | 157          |

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

| <b>Simgeler</b>      | <b>Açıklamalar</b>                  |
|----------------------|-------------------------------------|
| <b>A</b>             | Alan                                |
| <b>b</b>             | Genişlik                            |
| <b>C</b>             | Birleşik istenirlik                 |
| <b>c</b>             | Arzulanan değer                     |
| <b>D</b>             | Tasarım matrisi                     |
| <b>d</b>             | İstenirlik değeri                   |
| <b>e</b>             | En                                  |
| <b>E</b>             | Enerji                              |
| <b>e<sub>1</sub></b> | İş parçası başlangıç eni            |
| <b>e<sub>2</sub></b> | İş parçası pasodan çıkış eni        |
| <b>E<sub>d</sub></b> | Şekillendirme enerjisi              |
| <b>f(x)</b>          | Fonksiyon                           |
| <b>Fr</b>            | Radyal kuvvet                       |
| <b>h</b>             | Yükseklik                           |
| <b>h<sub>1</sub></b> | İş parçası başlangıç yüksekliği     |
| <b>h<sub>2</sub></b> | İş parçası pasodan çıkış yüksekliği |
| <b>I</b>             | Akım                                |
| <b>J</b>             | Joule                               |
| <b>k</b>             | Değişken sayısı                     |
| <b>K</b>             | Kelvin                              |
| <b>l</b>             | Boy                                 |
| <b>l<sub>i</sub></b> | Alt limit                           |
| <b>m</b>             | Paso sayısı                         |
| <b>M<sub>t</sub></b> | Döndürme momenti                    |
| <b>n</b>             | Deney sayısı                        |
| <b>n</b>             | İlgilenilen paso numarası           |



|                                    |                                 |
|------------------------------------|---------------------------------|
| <b>N</b>                           | Newton                          |
| <b>P</b>                           | Eleman sayısı                   |
| <b>P<sub>a</sub></b>               | Aktif güç                       |
| <b>r</b>                           | Yarıçap                         |
| <b>R<sup>2</sup></b>               | Regresyon katsayısı             |
| <b>R<sup>2</sup><sub>adj</sub></b> | Düzeltilmiş regresyon katsayısı |
| <b>T</b>                           | Mutlak sıcaklık                 |
| <b>t</b>                           | Zaman                           |
| <b>U</b>                           | İş                              |
| <b>u<sub>i</sub></b>               | Üst limit                       |
| <b>v</b>                           | Hız                             |
| <b>V</b>                           | Voltaj                          |
| <b>W</b>                           | Watt                            |
| <b>w</b>                           | Açısal hız                      |
| <b>x</b>                           | Bağımsız değişken               |
| <b>y</b>                           | Bağımlı değişken                |
| <b><math>\hat{y}(x)</math></b>     | Tahmin edilen cevap             |
| <b>Y<sub>i</sub></b>               | İstenirlik fonksiyonu           |
| <b><math>\beta</math></b>          | Vektör                          |
| <b><math>\epsilon</math></b>       | Rastgele deneysel hata          |
| <b><math>\theta</math></b>         | Açısal yer değiştirme           |
| <b><math>\lambda</math></b>        | Uzama katsayısı                 |
| <b><math>\mu(x)</math></b>         | Ortalama cevap                  |
| <b><math>\sigma_F</math></b>       | Akma gerilmesi                  |
| <b><math>\phi</math></b>           | Deformasyon                     |

**Kısaltmalar****Açıklamalar**

|               |   |
|---------------|---|
| <b>3B</b>     | Üç boyutlu                                    |
| <b>3B-EAA</b> | Üç boyutlu elektrik alan analizi              |
| <b>ANOVA</b>  | Varyans analizi                               |
| <b>CCD</b>    | Merkezi birleşik tasarım                      |
| <b>cDSP</b>   | Uzlaşmalı karar destek problemi               |
| <b>CYY</b>    | Cevap yüzey yöntemi                           |
| <b>ÇAO</b>    | Çok amaçlı optimizasyon                       |
| <b>DRX</b>    | Dinamik yeniden kristalleşme                  |
| <b>ECAP</b>   | Eşit kanallı açısız presleme                  |
| <b>GA</b>     | Genetik algoritma                             |
| <b>GMAW</b>   | Gaz metal ark kaynağı                         |
| <b>İGA</b>    | İyileştirilmiş genetik algoritma              |
| <b>RFSSW</b>  | Geriye doldurmalı sürtünme karıştırma kaynağı |
| <b>SEY</b>    | Sonlu elemanlar yöntemi                       |
| <b>YSA</b>    | Yapay sinir ağları                            |

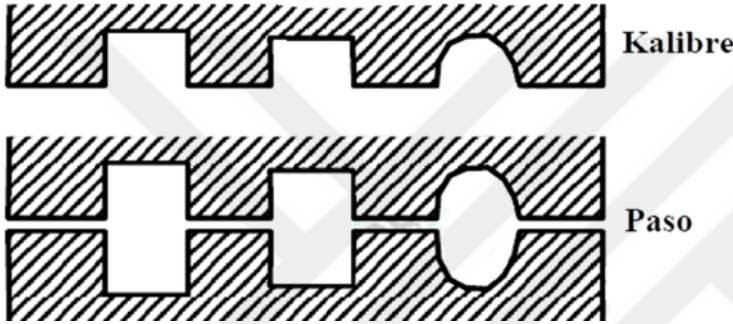
## 1. GİRİŞ

Tüm endüstriyel alanlara çıktı sağlaması nedeniyle demir çelik sektörü, ülkelerin ekonomisi açısından lokomotif bir sektördür. Türkiye'deki çelik üretimi 2001 yılından beri 15 milyon ton seviyesinden 2020 yılında 35,8 milyon tona çıkarak kayda değer bir artış göstermiştir. Türkiye, 2020 yılında üretim bakımından Avrupa'da 1. ve dünyada 7. sırada yer alan önemli bir demir ve çelik üreticisidir (SteelData, 2021). Türkiye, çelik üretiminde miktar olarak dünyada önemli bir yere sahip olmasına rağmen üretimin birim ağırlık başına katma değeri nispeten düşük kalmaktadır. Dünya çelik ihracatındaki rakipleri ile ülkemizin çelik ihracatı ortalama birim fiyatları karşılaştırıldığında, 2014 yılı verilerine göre Çin'in 1,08 USD/kg, Almanya'nın 1,54 USD/kg, Japonya'nın 0,93 USD/kg, Türkiye'nin ise 0,84 USD/kg ile ürünlerini pazarladığı görülmektedir (T.C. Ticaret Bakanlığı, 2018). 2018 yılı için bu değer 0,80 USD/kg olarak hesaplanmıştır. Türkiye'deki demir çelik sektörünün ihracatı ithalatından fazladır. Fakat sektörün üretimlerinde yüksek kaliteli ve katma değeri yüksek mamullerin payının oldukça düşük olduğu sanayi bakanlığı tarafından yayınlanan raporlarda da belirtilmiştir. Bu durum ülkemizde demir çelik sektöründe araştırma ve geliştirmeye daha fazla önem verilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2019).

Türkiye'nin ihraç ettiği demir çelik ürünlerinin büyük çoğunluğunu bar, çubuk, profil gibi sıcak haddeleme yöntemiyle üretilmiş uzun mamuller oluşturmaktadır (International Trade Centre, 2021). İnşaat demiri yukarıda sayılan ürünler arasında ülkemizde en fazla üretilen ve ihracatı yapılan ürün grubudur. Ülkemizdeki çelik üretim tesislerinin çoğunluğunun İskenderun-Osmaniye, İzmir-Aliğa, Marmara ve Batı Karadeniz sahil bölgelerinde yer aldığı görülmektedir (Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği, 2019). İskenderun-Payas-Osmaniye bölgesinde inşaat demiri üreten tesislerde yapılan incelemelerde paso tasarımlarının bilimsel ve mühendislik yaklaşımlarından uzak bir şekilde, el yordamıyla ya da firmalarının birbirlerinin uygulamalarını taklit etmesi şeklinde sürdürüldüğü görülmüştür. Bu durum hadde pasosu tasarımlarının iyileştirilmesinde kullanılacak bilimsel ve mühendislik yaklaşımlarına dayalı yöntemlerin geliştirilmesini ve bunların endüstrinin kullanımına sunulmasının önemini ortaya koymaktadır.

Problemin tanımı:

Çeşitli kesitlerdeki çubuk ve profiller (I ve U demirleri, köşebentler, demiryolu rayları vs.) sıcak haddeleme yöntemiyle kütüğün kesit şeklinin kademeli olarak istenilen forma adım adım yaklaştırılmasıyla üretilirler. Malzeme, her kademedede merdaneler üzerine açılmış karşılıklı boşlukların arasından geçirilerek şekillendirilir (Çapan, 2010). Merdaneler üzerinde açılmış boşluklara kalibre, karşılıklı kalibrelerin oluşturduğu şekle paso adı verilir (Resim 1.1).



Resim 1.1. Merdaneler üzerine açılmış kalibreler ve karşılıklı kalibrelerin oluşturduğu pasolar (Çapan, 2010)

Bir profil hadde hattındaki hadde tezgâhları üç gruba ayrılır (Sharma, 2007; Yılmaz, 1988):

- Kaba haddeleme ya da hazırlama grubu
- Orta hadde grubu ya da ara grup
- Bitirme grubu

Kaba haddeleme aşaması uzun ürün üretiminde kütüğün kesit ölçülerinin şekillendirme (orta hadde grubu) pasolarına girebilecek ölçülere mümkün olduğu kadar hızlı bir şekilde düşürülmesi için kullanılır. Malzemenin bu aşamadaki kesit değişimi her haddeleme hattında farklı olabilmekle birlikte genelde 150x150 mm kare kesitindeki kütük 100x100 mm ile 50x50 mm arasındaki kesit ölçülerine düşürülmektedir. Kaba haddeme tezgahlarında genellikle kutu paso tabir edilen paso tasarımları kullanılmaktadır. Sıcak haddelemenin diğer aşamalarıyla karşılaştırıldığında paso başına en yüksek kesit daralması ve enerji sarfiyatı bu aşamada meydana gelmektedir (Çapan, 2010).

Orta hadde grubunda malzeme kare veya dikdörtgen kesitten aşama aşama nihai ürün kesit şekline ve ölçülerine yaklaştırılır. Bitirme grubunda ise malzemeye son şekli verilir (Sharma, 2007).

Sıcak haddeleme prosesi çelik ürünlerin işlenmesinde eskiden beri kullanılan bir tekniktir ve bununla ilgili araştırmalar uzun zamanlar önce başlamıştır. Yapılan literatür taramalarında haddeleme ile ilgili çalışmaların daha çok yassı ürünlerin haddelenmesi ile ilgili olduğu görülmüştür. Çeşitli kesit şekline sahip profillerin haddelenmesi ile ilgili çalışmaların azınlıkta kalmasında bu proseslerin deneysel olarak incelenmesinin oldukça zor ve maliyetli olması ve prosesin klasik analitik hesaplama yöntemleriyle formüle edilemeyecek derecede karmaşık olmasının etkili olduğu düşünülmektedir.

Haddeleme yöntemi çok eski zamanlardan beri kullanılmaktadır ve bu yöntemle ilgili olarak bilimsel ve mühendislik çalışmaları uzun yıllar önce başlamıştır. Buna rağmen daha fazla kaliteyi daha düşük maliyetlerle elde etmek ve daha az enerji kullanımına yönelik arayışlar devam etmektedir. Çünkü sıcak haddeleme sürecinde kullanılan paso tasarımı, haddeleme sonucunda elde edilen ürün ile ilgili birçok hususu etkilemektedir. Bunlardan bazıları (Huang ve diğerleri, 2014; Yılmaz 1988);

- İstenilen profil şekli ve ölçülerinin toleranslar dahilinde elde edilmesi,
- İstenilen düzgünlükte yüzey elde edilmesi,
- Malzeme iç gerilmelerinin sabit tutulması,
- Üründe fitil ve çapak oluşumu,
- Üründe iç boşlukların ve katlanmaların varlığıdır.

Bunlara ek olarak hadde pasosu tasarımı operasyonu;

- Hadde tezgahlarında oluşan yatak yüklerinin büyüklüğü,
- Millere ve dişlilere gelen radyal ve burulma yükleri,
- Ani yük değişimlerinin olup olmaması,
- Merdane yorulması ve aşınması nedeniyle ortaya çıkan merdane ömrü,
- Gerekli motor güçlerinin büyüklüğü,
- Volanın büyüklüğü ve kinetik enerji depolama kapasitesi,
- Haddeleme süresi,
- Malzemenin şekillendirme için gereken toplam enerji miktarı gibi dikkate alınması gereken birçok husus üzerinde etkilidir (Çapan, 2010; Wusatowski, 1969).

Bu bağlamda yapılmış olan bir çalışmada inşaat demiri üreten beş haddeleme tesisinin kaba haddeleme uygulamaları sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile modellenerek birim kesit alanı daralması için gereken şekillendirme enerjileri karşılaştırılmıştır. Paso tasarımlarının birim kesit daralması için harcadığı şekillendirme enerjileri arasında %23'e ulaşan farklar tespit edilmiştir (Çavdar ve diğerleri, 2015).

Sıcak haddeleme sırasında malzeme davranışı gerilme deformasyon durumu, şekil değişiminden kaynaklanan ısı ve malzemenin mikro yapısı gibi etmenler arasındaki karmaşık ilişkilerden etkilenir. Diğer yandan haddeleme hızı, iş parçasının başlangıç şekli ve sıcaklığı, merdane geometrisi ve sıcaklığı gibi operasyonel parametreler yukarıda sayılan hususlar üzerinde etkilidir (Nellippallil ve diğerleri, 2017). Başarılı bir hadde pasosu tasarımı bu faktörlerin ve bunların birbirleri arasındaki ilişkilerin anlaşılmasını gerektirmektedir. Bu karmaşıklığın üstesinden gelmek için hadde pasosu tasarımı için klasik analitik formülasyonlar, sonlu elemanlar yöntemi, yapay zeka ve istatistiksel yöntemler geliştirilmiştir (Nellippallil ve diğerleri, 2016; Oduguwa ve Roy, 2006).

Klasik analitik çözümlerde basınç dağılımı, haddeleme kuvveti, haddeleme torku gibi büyüklükler ampirik formüller ve hesaplama metotları kullanılarak bulunabilir fakat malzeme özellikleri veya termomekanik faktörler bu hesaplama yöntemlerinde ele alınamamaktadır (Lapovok ve Thomson, 1997; Vinogradov ve diğerleri, 2013). Sonlu elemanlar yöntemi bu zorlukların üstesinden gelmek için bir alternatif olarak öne çıkmıştır. Sonlu elemanlar yöntemleri proses sırasında meydana gelen metal akışını ve kuvvetler, gerilmeler, hızlar, yer değiştirmeler ve sıcaklıklar gibi parametrelerin birbirleri ile etkileşimini detaylı olarak tanımlayabilecek teknikler sunmaktadır (Altan ve Knoerr 1992; Park, Rebelo ve Kobayashi, 1983).

Haddeleme prosesi yapısı itibarıyla ardışıktır. Burada ardışık ifadesi prosesin çok sayıda birbirini takip eden aşamadan oluşması ve her aşamanın parametrelerinin bir önceki ve bir sonraki aşama tarafından belirlenmesi anlamında kullanılmaktadır. Haddeleme prosesinde her pasonun çıktısı bir sonraki pasonun girdisidir bu nedenle bir pasonun tasarımı diğer bütün aşamaları etkilemektedir. Aynı başlangıç ve bitiş kesit şekline birçok alternatif paso sırası tasarımları ile ulaşılabilmektedir. Son ürünün özellikleri ve harcanan şekillendirme enerjisi bu paso sıralamasından etkilenebilmektedir (Brinza ve Kuznetsov, 2014; Çavdar ve diğerleri, 2015). Sonlu elemanlar teknikleri metal şekillendirme proses aşamalarının bağımsız olarak simülasyon ve analizinde başarılı bir şekilde ve yaygın olarak

kullanılabilmesine rağmen hadde pasosu tasarımın ardışık yapısı için bir çözüm olmamıştır (Kurt ve Yaşar, 2020; Oduguwa ve Roy, 2006). Hadde pasosunun ardışık yapısı sebebiyle geleneksel hadde paso sırası tasarımı çok fazla parametreyi içeren tasarım alternatiflerinin el ile tek tek denenmesini içermektedir. Bu durum çok fazla parametrenin göz önünde bulundurulmasını gerektirmekte ve uygun bir çözüm bulunması genellikle çok zaman almaktadır (Oduguwa, Tiwari ve Roy, 2004).

Bahsedilen deneme yanılma sayılarını azaltmak için sonlu elemanlar tekniklerine bazı otomasyon uygulamaları adapte edilmiştir (Park ve diğerleri, 1983). İlk olarak SEY ile birlikte geriye doğru takip algoritması kullanılmıştır. Fakat bu metot da bir miktar yineleme içermekte ve izlenecek yol ile ilgili ön bilgi gerektirmekteydi. Daha sonra yineleme gereksinimini ortadan kaldırmak için geriye ve ileriye doğru takip adımları birleştirilmiş ve algoritma yapısına bazı kısıtlamalar eklenmiştir (Lapovok ve Thomson, 1997). Yapay zeka uygulamalarının gelişmesiyle birlikte bunlar hadde pasosu tasarımında da kullanılmaya başlanmıştır (Huang ve diğerleri, 2012b, 2019; Lambiase, 2013). Bunun yanında son yıllarda bazı çalışmalarda hadde pasosu tasarımında sonlu elemanlar yöntemi istatistik analiz yöntemi ile birlikte kullanılmıştır (Çavdar ve Kanca, 2020; Nellippallil, Song ve diğerleri 2017).

Bu tez çalışmasının birincil amacı inşaat demiri, bar, profil gibi haddeleme işlemlerinde ortak bir aşama olan kaba haddeleme prosesinde kullanılan kutu paso serisinin optimizasyonunu gerçekleştirerek proses sırasında kullanılan toplam şekillendirme enerjisini düşürmektir. İkincil amaç olarak haddeleme sırasında merdanelere gelen tork ve eksenel yük miktarlarının düşürülmesi ve pasolar arası denge sağlanması hedeflenmiştir. Bu büyüklükler kullanılacak olan hadde tezgahının tasarımını, tezgâhı sürmekte kullanılan volanın büyüklüğünü ve elektrik motorunun gücünü etkilemektedir. Belirlenen amaçları aynı anda gerçekleştirebilmek ve prosesin ardışık yapısı ile baş edebilmek için istenirlik fonksiyonu tabanlı bir çözüm arama stratejisi ve bu stratejiyi uygulamak için optimizasyon yöntemi geliştirilmiştir.

Tez kapsamında durum çalışması gerçekleştirilerek geliştirilen istenirlik tabanlı çözüm arama stratejisinin ve önerilen paso sırası tasarımı optimizasyon metodunun uygulanması gösterilmiş ve doğrulama yapılmıştır. Durum çalışması iki aşamadan meydana gelmektedir. Birinci aşamada istenirlik tabanlı çözüm arama stratejisi ve önerilen paso sırası tasarım metodu kullanılarak pasoların en ve yükseklik ölçülerinin optimizasyonu yapılmıştır. İkinci

aşamada ise birinci aşamada tasarlanan optimum paso sırası üzerinde açı ve radyüs ölçüleri cevap yüzey yöntemi ve istenirlik fonksiyonu kullanılarak optimize edilmiştir.

### Çalışmanın Önemi

Sıcak haddeleme yüksek enerji kullanımı gerektiren bir prosestir ve şekillendirme enerjisi bu bağlamda hadde endüstrisinde önemli sarfiyat kalemlerinden birisidir (Orcajo ve diğerleri, 2016). Tez çalışmalarında sanayi tesislerinde yapılan incelemelerde inşaat demiri üreten tesislerin çoğunda kaba haddeleme tezgahında 1000 kW üzerinde güce sahip elektrik motorlarının kullanıldığı tespit edilmiştir. Bu durum enerji sarfiyatında gerçekleştirilecek küçük orandaki iyileşmelerin dahi toplamda büyük enerji ve maliyet tasarrufu sağlayabileceğini göstermektedir. Bunun yanında merdanelere gelen eksenel yüklerin ve döndürme momentlerinin düşürülmesi ve pasolar arası farkların azalması ile hadde tezgahının daha uzun ömürlü olmasını ve kontrollü-kontROLSÜZ duruşların azalmasını sağlayacaktır.

Bu tez kapsamında önerilen istenirlik tabanlı ardışık çözüm arama stratejisi ve optimizasyon yöntemi bazı uyarlamalar yapılarak ardışık yapıdaki diğer optimizasyon problemlerinin çözümünde de kullanılabilir.



## 2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen çözüm arama stratejisi, paso optimizasyon metodu ve durum çalışmasının daha iyi anlaşılabilmesi için tezin bu bölümünde önce optimizasyona konu olan sıcak haddeleme prosesi ve paso tasarımı ile ilgili bazı temel bilgiler sunulmuştur. Sonraki kısımlarda tez çalışması sırasında kullanılan yöntemlerin temel kavramları ve işleyişleri ile ilgili bilgiler aktarılmıştır. Bölümün sonunda ise bahsedilen proses ve metotlar ile ilgili önceki çalışmalardan bahsedilmiştir.

### 2.1. Sıcak Haddeleme

Metallerin kendi eksenini etrafında dönen merdaneler arasından geçirilerek şekillendirilmesi işlemine haddeleme denir. Haddelemede malzemenin şekillendirilmesi, merdanelerin malzemeyi sıkıştırmasıyla oluşan radyal basma gerilmeleri ve merdane ile malzeme arasındaki sürtünme sonucunda oluşan yüzey kayma gerilmeleri ile sağlanır. Bu işlem sırasında malzeme kalınlığı azalır ve genişlikte bir miktar artma meydana gelir. İşlem sonucunda kesit alanında bir daralma meydana geleceğinden malzeme boyu uzar.

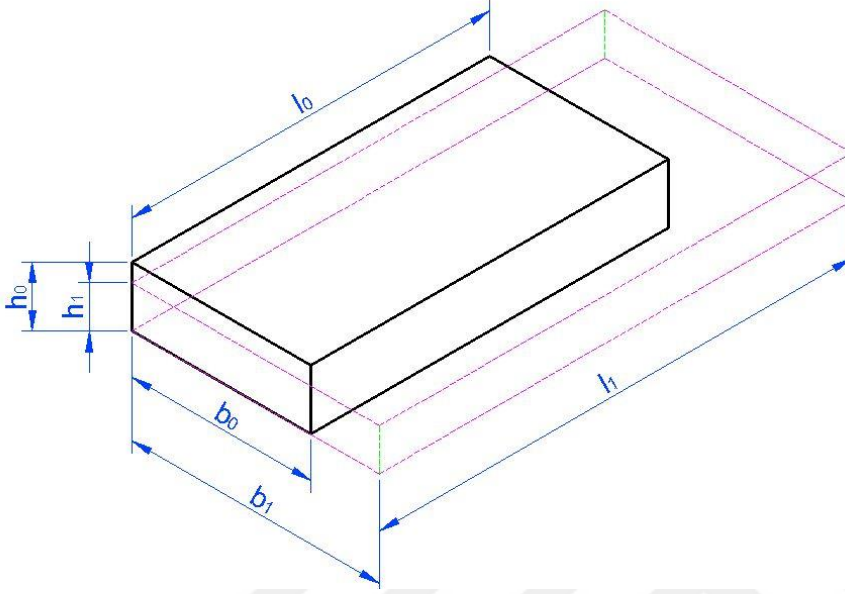
Haddeleme, işlem sırasında iş parçasının sıcaklığına göre sıcak ve soğuk haddeleme olarak sınıflandırılır. Sıcak haddeleme malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda gerçekleştirilir. Yüksek sıcaklıklarda malzemenin akma sınırı ve pekleşme üsteli düşeceğinden büyük oranlarda kesit daralmasının gerçekleştiği işlemler sıcak haddeleme ile yapılır. Slab, blum ve kütük gibi yarı ürünler levha, sac, boru, çubuk, ray ve profiller sıcak haddeleme ile üretilir.

Soğuk haddeleme ile sac, folyo, ince çubuk ve tel gibi küçük kesitli ürünlerin imalatı yapılır. Soğuk haddelemede ortaya çıkan kuvvetler ve harcanan enerji fazladır. Fakat bu yöntemle boyutsal ve geometrik toleransları daha iyi, yüzeyi düzgün ve mukavemeti yüksek ürünler elde edilir (Kayalı ve Ensari, 2000).

#### 2.1.1. Haddelemede prosesinde geometrik parametreler

Haddelenen malzemenin yüksekliği ( $h$ ) merdane eksenine dik, genişlik ( $b$ ) merdane eksenine paralel, uzunluk ( $l$ ) ise haddeleme doğrultusundaki ölçüleri olarak tanımlanır. Resim 2.1

incelenirse, buradan  $V_0 (= h_0 b_0 l_0)$ , iş parçasının haddelenme başlangıcındaki hacmi,  $A_0 (= h_0 b_0)$ , iş parçasının başlangıç alanı olarak tanımlanır. Benzer şekilde,  $V_1 (= h_1 b_1 l_1)$  ve  $A_1 (= h_1 b_1)$  sırası ile iş parçasının birinci paso çıkışıındaki hacim ve yüksekliğini ifade eder.



Resim 2.1. Haddelenmede iş parçasının temel ölçüleri

Bar, profil, ray gibi dikdörtgenel olmayan ürünlerin haddelenmesinde iş parçasının ortalama yüksekliği ( $h_m$ ) terimi ortaya çıkar. Bu ortalama yükseklik;

$$h_m = \frac{A}{b} \quad (2.1)$$

Formülü ile ifade edilir. Bu formülasyonda  $b$  kesitteki en geniş ölçüdür.

Şekillendirme ile hacmin değişmediği kabul edilirse;

$$V_0 = A_0 l_0 = h_{0m} b_0 l_0 = V_1 = A_1 l_1 = h_{1m} b_1 l_1 = V_n = A_n l_n = h_{nm} b_n l_n \quad (2.2)$$

eşitlikleri elde edilir. Eş. 2.1 ve 2.2'den, ortalama ezme miktarı, ortalama ezme oranı ve ortalama ezme yüzdesi sırası ile;

$$\Delta h_m = h_{1m} - h_{2m} = \frac{A_1}{b_1} - \frac{A_2}{b_2} \quad (2.3)$$

$$\varepsilon_m = \frac{h_{1m} - h_{2m}}{h_{1m}} \quad (2.4)$$

$$G_m = \frac{h_{1m} - h_{2m}}{h_{1m}} 100\% \quad (2.5)$$

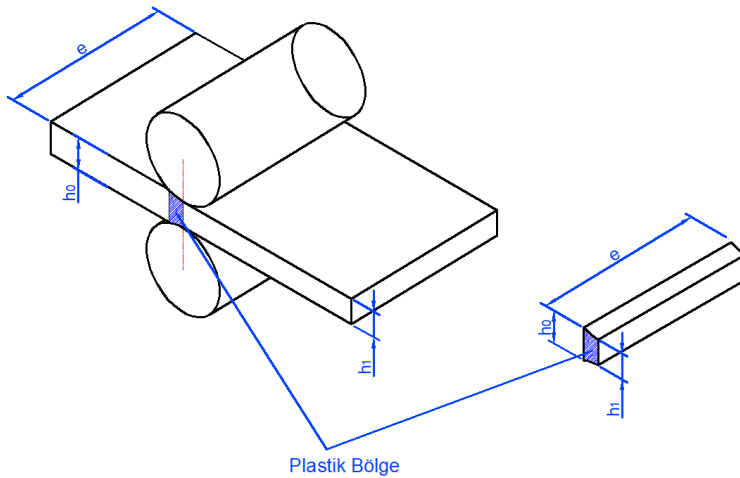
Haddelemede uzama katsayısı ( $\lambda$ ),  $v_2$  malzemenin çıkış hızı ve  $v_1$  malzemenin giriş hızı olmak üzere,

$$\lambda = \frac{A_1}{A_2} = \frac{h_{1m}b_1}{h_{2m}b_2} = \frac{l_2}{l_1} = \frac{v_2}{v_1} \quad (2.6)$$

olarak tanımlanır.

Haddeleme sırasında iş parçasında meydana gelen olayları daha iyi anlamak için prosesin geometrik ve kinematik incelemesi nispeten basit olan yassı ürünlerin haddelemesi üzerinde gerçekleştirilecektir. Resim 2.2' de bir sacın haddelenmesi şematik olarak gösterilmiştir. Merdane yarıçapı  $R$ , malzemenin giriş düzlemiyle merdane merkezlerini birleştiren düzlem arasındaki temas açısı veya kapma açısı  $\alpha$ , malzemenin işlem öncesi ve işlem sonrası kalınlıkları sırasıyla  $h_0$  ve  $h_1$  ile ifade edilirse,

$$\Delta h = h_0 - h_1 = 2R(1 - \cos \alpha) \quad (2.7)$$



Resim 2.2. Sacların haddelenmesinin şematik gösterimi

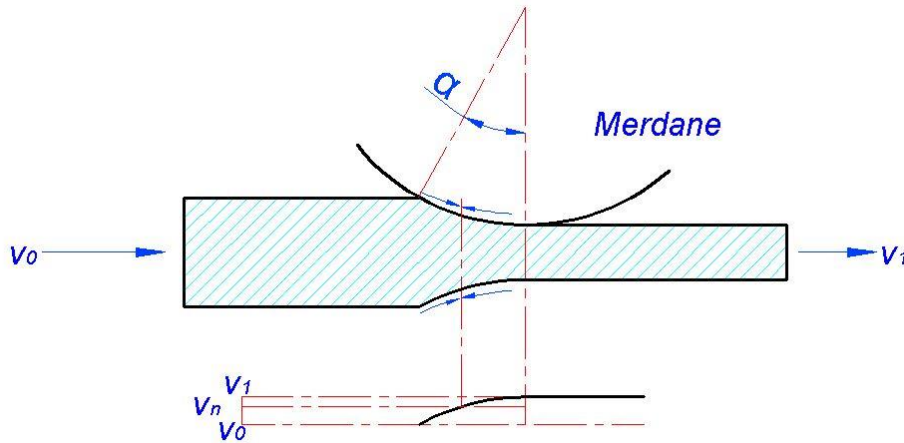
İşlem sırasında kalınlık azalması nedeniyle malzeme uzar ve genişler. Haddelenme sırasında sürtünme yüksek değerlerde olduğundan genişleme ihmal edilebilir seviyelerdedir. Resim 2.2’de taralı olarak gösterilen merdaneler arasında kalan herhangi bir kesitte malzemenin kalınlığı  $h$  ve malzemenin haddelenme doğrultusundaki hızı  $v$  olarak alındığında ve genişleme ihmal edildiğinde,

$$v = \frac{v_0 h_0}{h} \quad (2.8)$$

olarak ortaya çıkar. Merdanelerin çevresel hızı  $v_m$  ve çevresel hızın yatay bileşeni  $v_{my}$  olarak ifade edilirse,

$$v_{my} = v_m \cos \alpha \quad (2.9)$$

olarak hesaplanır. Eş. 2.2’den ve Resim 2.3’ten anlaşılacağı üzere kalınlık azaldıkça malzemenin  $v$  hızı artar. Merdaneler arasında  $v=v_m$  eşitliğinin sağlandığı düzleme nötr düzlem adı verilir. Giriş düzlemi ile nötr düzlem arasında merdanelerin çevresel hızı malzeme hızından yüksek olduğundan sürtünme malzemeyi haddelenme yönüne doğru sürüklemeye çalışır. Nötr düzlemle çıkış düzlemi arasında ise malzeme hızı merdane çevresel hızından yüksek olduğundan sürtünme malzemeyi merdaneler arasında tutmaya çalışır.



Resim 2.3. Haddelenmede malzeme kalınlığındaki azalma ile malzeme hızının ilişkisi

Haddelenme işleminin başlayabilmesi için sürtünme kuvvetlerinin malzemeyi merdaneler arasına çekebilmesi gerekir. Resim 2.4'te görüldüğü gibi merdanelerden birisinin saca uyguladığı normal kuvvet  $N$  ile gösterilirse, sürtünme kuvveti,

$$T = \mu N \quad (2.10)$$

olduğundan, malzemenin ilerleyebilmesi için

$$N \sin \alpha \leq \mu N \cos \alpha \quad (2.11)$$

olması gerekir. Buradan,

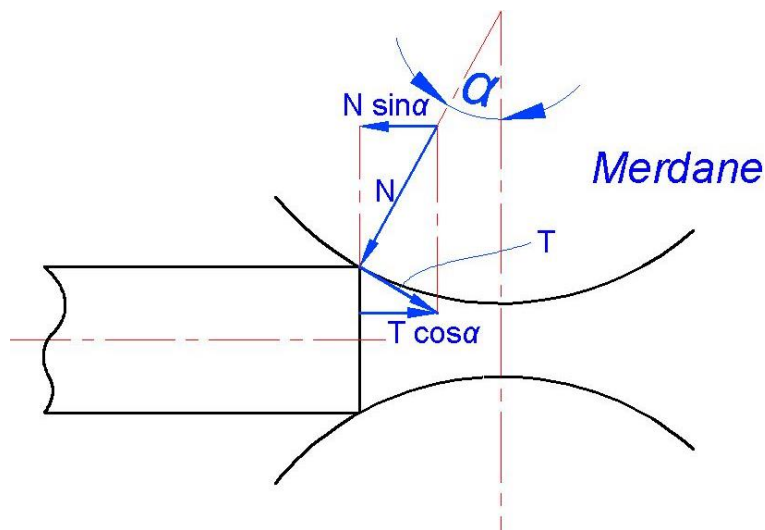
$$\tan \alpha \leq \mu \quad (2.12)$$

ince sacların haddelenmesinde olduğu gibi  $\alpha$  açısının ( $\alpha < 9^\circ$ ) yeterince küçük olduğu durumlarda  $\tan \alpha \approx \alpha$  olarak kabul edilebilir. Bu durumda,

$$\alpha \leq \mu \quad (2.13)$$

elde edilir.

Eğer  $\mu \geq \tan \alpha$  ise haddelenme gerçekleşebilir, aksi durumda malzeme merdaneler arasında ilerleyemez.



Resim 2.4. Haddelenme başlangıcında saca etkiyen kuvvetler

Profil haddelemede yukarıda anlatılan olayların tanımlanması oldukça güçtür. Düzlem haddelemede olduğu gibi giriş düzlemi ile nötr düzlem arasında malzeme merdane ile birlikte sürüklenir. Fakat bu sefer kesit boyunca ezme değişken olduğu için, malzeme akışı kesitin her yerinde aynı olmadığından ve sürtünme katsayısı değiştiğinden gerilmeler düzgün dağılmamıştır. Bu nedenle nötr düzlemin yerini belirlemek zordur.

### 2.1.2. Sıcak haddelemede merdane kuvvetlerinin ve haddeleme torkunun hesaplanması

Temas yayı veya bu yayın iz düşüm uzunluğu boyunca teorik merdane basınç dağılımı Resim 3.5' te dikkate alınarak aşağıdaki integraller ile ifade edilebilir.

$$P = \int_0^{\varphi=\alpha} R\sigma d\varphi = \int_0^{x=l_d} \sigma dx \quad (2.14)$$

Burada:

$R$ : Merdane yarıçapı

$\varphi$ : Haddeleme açısı

$\alpha$ : Kapma açısı

$\sigma$ : radyal merdane baskısı sebebiyle oluşan dik basınç olarak tanımlanmıştır.

Bu formülde  $\sigma$  yerine  $K_w$  kullanılırsa;

$$P = \int_0^{\alpha} RK_{wx} d\varphi = \int_0^{l_d} K_{wx} dx \quad (2.15)$$

elde edilir. Burada;

$P$ : Merdaneleri ayırmaya çalışan kuvvet

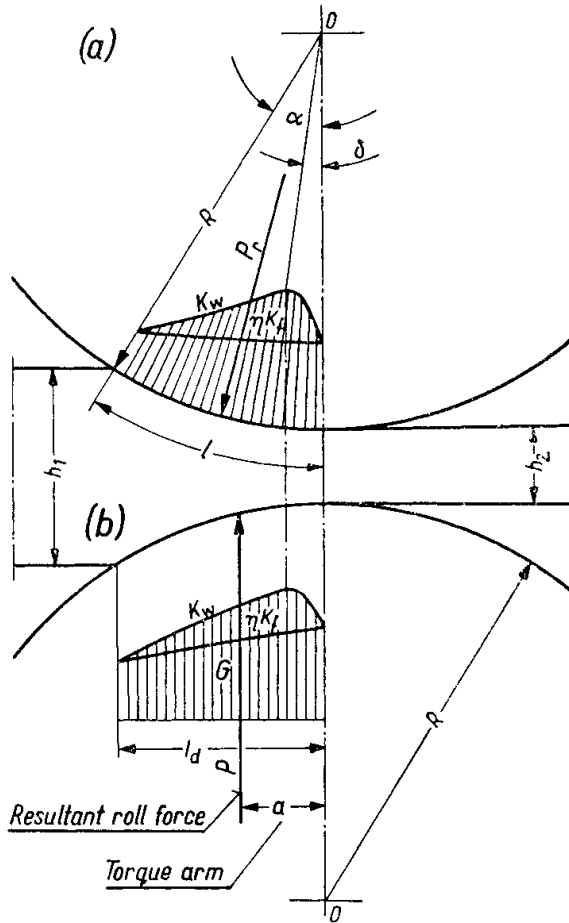
$K_w$ : metalin deformasyon direncini ifade eder.



birleştiren 0-0 eksenine paralel olacaktır. Bileşke kuvvet ile bu eksen arasındaki mesafe tork hesaplamada kullanılacak moment kolunu verecektir.

Tselikov'a göre yukarıda yapılan varsayımlar sadece aşağıdaki üç şartın sağlanmasıyla kabul edilebilir:

- İki merdane de tahrikli, eşit çaplı ve eşit çevresel hızlı olmalı,
- Haddelenen malzemenin mekanik özellikleri hadde açıklığı boyunca değişmemeli,
- Metal akışı hadde açıklığı boyunca düzgün olmalı ve merdane kuvveti haricinde bir dış kuvvet etkilememelidir.



Resim 2.6. Bileşke merdane kuvveti ve moment kolunun a) temas yayına, b) temas yayının izdüşümüne göre gösterimi(Wusatowski, 1969)

Bu durumda bir merdaneyi sürmek için gereken tork  $P_a$  olacaktır. İki merdaneyi sürmek için gereken toplam tork ise;



$$M_w = 2Pa \quad (2.16)$$

olur. Bir hacim elemanın çıkış düzlemine uzaklığı  $x$  dik basıncın dik bileşeni  $q$  olmak üzere,  $qdx$  bu elemente  $b$  genişliği ve  $dx$  kalınlığı boyunca etkiyen dikey kuvveti verir. Bu dikey bileşenin oluşturduğu toplam tork;

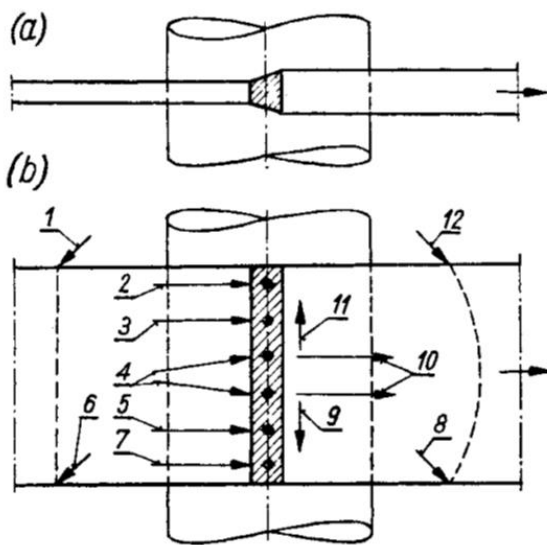
$$m_w = 2b \int_0^{l_d} qxdx \quad (2.17)$$

ile hesaplanabilir (Wusatowski, 1969).

### 2.1.3. Sıcak haddelemede ezme miktarı, uzama ve yayılmanın etkileşimi

Haddeleme sırasında genişlikte meydana gelen artışa yayılma denir. Bu genişleme istendiği durumlarda kalibre kanalının duvarları ile sınırlandırılabilir. Bu durumda kontrollü yayılma, aksi takdirde serbest yayılma olarak adlandırılır.

Geniş şeritlerin veya sacların sıcak haddelemesinde yayılma önemsiz miktardadır. Metal silindirik merdaneler arasında sıkıştırıldığında haddeleme doğrultusunda meydana gelen etkin sürtünme direncinin yanal doğrultudaki sürtünme direncinden düşük olması metalin merdaneler tarafından akış doğrultusunda sürüklenmesi bu sonucu doğurur.



Resim 2.7. Merdaneler ile a) dar şerit ve b) geniş şerit arasındaki temas yüzey izdüşümünün şematik gösterimi (Wusatowski, 1955)

Resim 2.7 a ve b sırasıyla dar ve geniş bir çubuğun haddelenmesindeki temas alanının iz düşümünü göstermektedir. Resim 2.7 b dikkate alındığında 4 numara ile gösterilen noktalardaki parçacıklar 10 yönünde 9 ve 11 yönüne göre daha kolay yer değiştirir. Çünkü haddeleme yönünde daha küçük bir yüzey sürtünmesinin üstünden gelmesi gerekir. Aynı durum biraz daha düşük derecede olmakla birlikte 3 ve 5 numaralı noktalardaki parçacıklar için de geçerlidir.

Diğer yandan 2 ve 7 numaralı noktalara yakın parçacıklara etki eden sürtünme direnci 9 ve 11 yönünde 10 yönüne göre daha fazla değildir. Eğer bu parçacıklar 3, 4 ve 5 numaralı bölgedeki merkezi parçacıklardan bağımsız hareket edebilselerdi serbestçe yayılabilecekti. Bu sebepten çubuğun kenarındaki uzama merdanelerin basma etkisinden değil merkezi bölgedeki parçacıklara olan bağlarından dolayı gerçekleşmektedir.

Aynı zamanda yan kenarlar merkezi kısmın yanal akmasını kısıtlarken çubuğun merkezi kısımları da yanlara bir çekme uyguladığından sadece uzama gerçekleşir. Resim 2.7'da 1 ve 6 noktaları arasındaki düz çizgi merdanelerin arasından geçtikten sonra 8 ile 12 arasında gösterilen bombeli şekli alır (Wusatowski, 1969).

Wusatowski (Wusatowski, 1969) kitabında şerit haddelemede yayılma ile ilgili olarak; Siebel (Siebel, 1932), Tafel ve Sedleczeck (Tafel, 1921), Koncewicz (Koncewicz, 1956), Zolotnikov, Bakhtinov ve Tselikov tarafından değişik formüller önerildiğini bildirmiştir. Fakat bu formüller yayılmanın belirlenmesinde yeterli doğrulukta sonuçlar vermemiştir. Bunun sebebi, birbiri ile yakından bağlantılı olan ezme, uzama ve olaylarının birbirinden bağımsız değerlendirilmesidir.

Yayılmanın uzamaya oranı şu faktörlerden etkilenir:

- Ezme miktarı
- Haddeleme hızı
- Haddeleme sıcaklığı
- Malzeme ile merdane arasındaki sürtünme
- Malzemenin kimyasal yapısı
- Merdaneye giren malzemenin şekli
- Kalibre kanal formu

#### 2.1.4. Düzlem haddedeleme deformasyon işinin hesaplanması

Wusatowski (Wusatowski, 1969), deformasyon işin Pavlov tarafından incelenerek aşağıdaki üç temel forma dönüştürüldüğünü bildirmiştir:

$$W_w = K_w V \frac{h_1 - h_2}{h_1} \quad (2.18)$$

$$W_w = K_w V \frac{h_1 - h_2}{h_2} \quad (2.19)$$

$$W_w = K_w V \log_e \frac{h_1}{h_2} \quad (2.20)$$

Yukarıdaki formüllerden Eş. 3.18 malzemenin  $v_1$  giriş hızına göre deformasyon işine, Eş. 2.19 malzemenin  $v_2$  çıkış hızına göre hesaplanmış deformasyon işine karşılık gelmektedir. Doğru sonuçlar ortalama haddedeleme hızına göre elde edilen Eş. 2.20'den elde edilebilir.

Bu formüllerde:

V: Haddelenen kütük hacmini

$K_w$ : Kısım 2.1.2'te açıklanan deformasyon direncini ifade eder.

Bu zamana kadarki hesaplamalarda düz merdaneler ile yapılan haddedeleme işlemleri ele alınmış kalibre kullanılarak yapılan haddedeleme işlemlerinde ortaya çıkacak ek sürtünmeler, kalibrelerin yan duvarlarından dolayı malzeme akışının sınırlandırılması ve malzemenin iş parçasında meydana gelebilecek iç malzeme akışları dikkate alınmamıştır. Bu durumlar ampirik formüller ile hesaplanması oldukça zor olduğundan araştırmacılar bazı özel durumlar için (bazı paso serileri, malzeme, sıcaklık değerleri vs.) tablo ve diyagramlar kullanılarak hesaplama metotları geliştirmişlerdir.

## 2.2. Paso Tasarım Temelleri

Paso tasarımının amacı istenilen kesit şeklini kabul edilebilir ölçü toleransları dahilinde, yüzey kusurları olmadan iç gerilmeleri minimum tutarak elde etmektir. Bunu yaparken en

yüksek verimin en düşük maliyetle elde edilmesi, personelin işinin zorlaştırılmaması ve merdane aşınmasının en düşük seviyede tutulması gözetilmelidir (Wusatowski, 1969).

Paso tasarımında basit formüller yoktur ve tasarım çoğunlukla deneyimler kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Paso tasarımlarında genellikle seri olarak bilinen bazı paso düzenleri kullanılmaktadır. Bunun yanında günümüzde kullanılan bilgisayar destekli teknikler paso tasarımı ile ilgili gelişmelere yol açmıştır (Lange ve diğerleri, 1985).

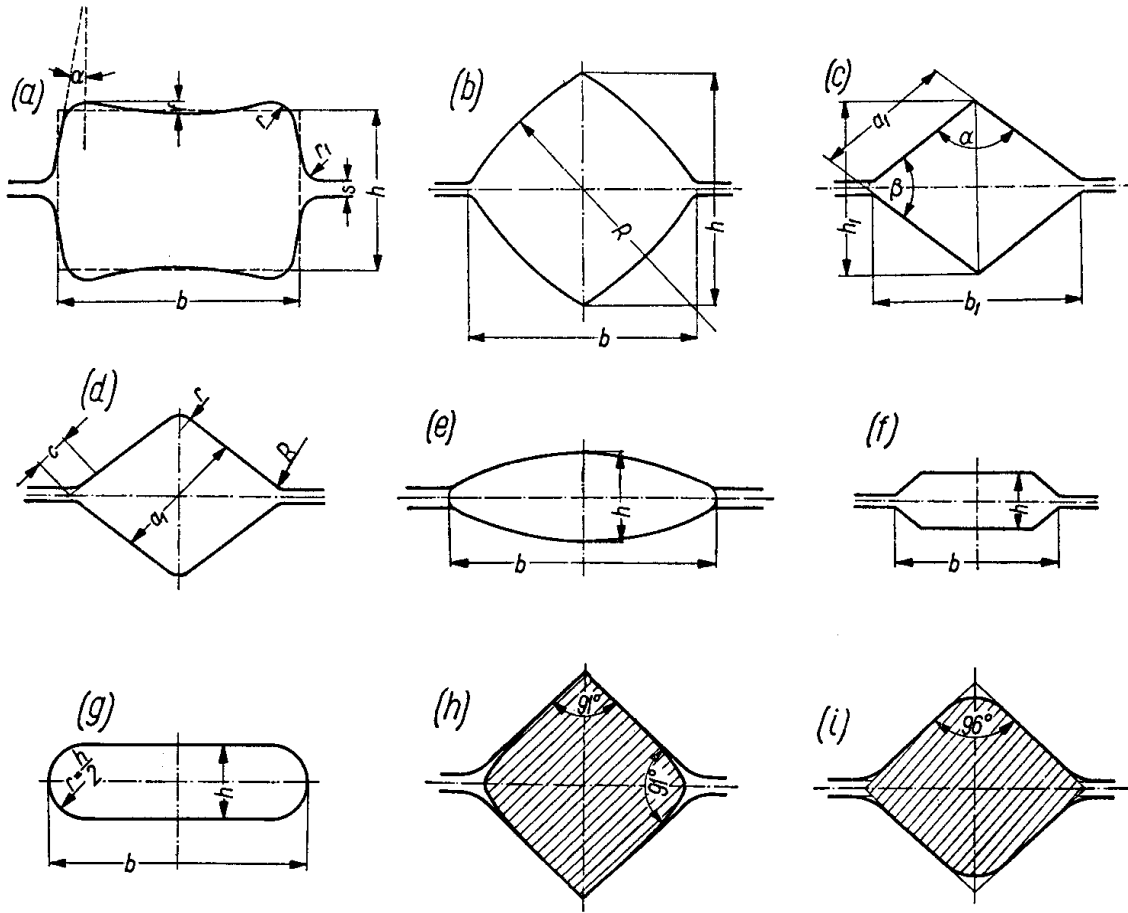
Paso düzeni tasarlamada sık kullanılan paso şekilleri Resim 2.8'de gösterilmiştir. Bunlar, kutu (a), gotik kare (b), baklava (c), yuvarlatılmış baklava (d), oval (e), altıgen oval (f), düz oval (g), açık kare (h), yuvarlatılmış açık kare paso şekilleridir.

İş parçasının kesitini küçültmek amacıyla kullanılan başlıca paso düzenleri şunlardır:

- a. Kutu paso
- b. Gotik kare-gotik kare
- c. Kare-kare
- d. Oval-oval
- e. Baklava-baklava
- f. Kare-baklava
- g. Kare-oval
- h. Yuvarlak-oval

Blum ve kütüklerin haddelenerek başlangıç kesitlerinin küçültülmesinde kutu paso serileri kullanılır. Bu paso serisi genelde 75x75 mm'den büyük kesitlerin haddelenmesinde kullanılır (Çapan, 2010; Wusatowski, 1969).

Kutu pasolarda kalibrelerin yan yüzeyleri merdane eksenine dik olmayıp genellikle eğiktirler. Merdanelerin kalibrelerin yan yüzeylerinin eğimli yapılması malzemenin pasoya giriş ve çıkışını kolaylaştırır, merdaneler zamanla aşındığında pasonun düzeltilmesinde kolaylık sağlar ve haddelenen malzemenin yan yüzeylerinde katmer gibi kusurların oluşmasını önler.



Resim 2.8. Sıcak haddelemede sıklıkla kullanılan paso şekilleri (Çapan 2010)

Baklava-kare paso serileri kesit küçültme işlemlerinde ve bitmiş kare kesitin elde edilmesinde kullanılır. Baklava pasonun geniş açısı 100 ile 125 arasındadır. Kare pasonun tepe açısı ise kesit düşürme işlemlerinde 93, bitirme işlemlerinde  $90^\circ 30'$  alınır.

En az paso adediyle en fazla kesit azalması sağlayan paso serileri oval-kare paso geçişidir. Orta ve küçük kesitlerin haddelemesinde uygulanabilir. Oval pasoda büyük eksenin küçük eksene oranı iki veya daha fazla, uzama katsayısı ise 1,5 ile 2,5 arasında olabilir.

### 2.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Klasik yaklaşımda tasarım, fiziksel laboratuvarlarda gerçekleşen bir süreci ve deney düzeneği gerçek durumun bir benzetimi idi. Bu yaklaşımda süreç, geometrinin modellenmesi, istenilen verilerin belirlenmesi, verilerin alınması, verilerin yorumlanması ve çıkarımların ortaya konulması şeklinde gerçekleşmekteydi.

Dijital bilgisayarların gelişmesiyle birlikte mühendislik, bilgisayar bilimleri ve modern yaklaşımlar teorisi bir araya gelerek bilgisayar simülasyonunu oluşturmuştur. Bu yaklaşımda ise süreç, matematik modelleme, fiziksel modelleme, verilerin hesaplama yoluyla bulunması, verilerin yorumlanması ve çıkarımların ortaya konulması şekline dönüşmüştür. Bu yeni yaklaşım, tasarım optimizasyonunu destekleyen alternatif bir yöntem olarak ortaya çıkmıştır (Baker, 2012).

Sonlu elemanlar yöntemi (SEY) mühendislik ve bilimde eski çağlardan beri kullanılan problemi daha basit bir duruma benzetmek ve parçalara ayırarak çözme yaklaşımının nispeten güncel bir uygulamasıdır. Örneğin, çok eski matematikçiler çemberin çevresini bulmak için onu bir çokgene benzetmiş ve bu çokgenin kenar uzunluğunu hesaplamışlardır. Schellback, 1851'de kapalı bir eğriyle sınırlanmış en küçük alanın diferansiyel denklemini bulmak için onu üçgenlere bölmüş ve toplam bölünmüş alanı sonlu farkların yaklaşımını kullanmıştır. Uçak endüstrisindeki mühendisler 1950'li yılların ortalarından itibaren uçak kanatlarında oluşan gerilmelerin hesaplanması için yaklaşık metotların geliştirilmesi için çalışmışlardır. Turner, Clough, Martin ve Topp 1956'da kanat yüzeyini modellemek için üç düğümlü üçgenler kullanan bir metot ortaya koymuşlardır (Turner ve diğerleri, 1956). Aynı yıllarda Argyris ve Kelsey yapısal analiz problemlerinde sonlu elemanlar bazı sonlu eleman fikirlerini de içeren matris prosedürlerinin oluşturulması ile ilgili makaleler yayınlamışlardır (Argyris, 1954; Kelsey ve Argyris, 1954). Sonlu eleman (finite element) ifadesi ilk olarak Clough tarafından 1960 yılında kullanılmıştır (Clough, 1960; Rao, 2011).

Mühendislik ve diğer değişik bilim dallarıyla ilgili birçok olay kısmi diferansiyel denklemler kullanılarak tanımlanmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi genelde klasik analitik metotlar ile çözülmesi neredeyse imkânsız olan bu denklemlerin yaklaşık olarak çözümünde kullanılan nümerik bir yaklaşımdır. Mühendislik bakış açısıyla açıklamak gerekirse SEY, gerilim analizi, ısı transferi, akışkan hareketleri, elektromanyetik gibi alanlarda problemlerin bilgisayar simülasyonu ile çözülmesidir (Fish ve Belytschko, 2007).

SEY ilk olarak karmaşık yapılarda gerilme analizi gerçekleştirmek amacıyla geliştirilmiş olsa da teorinin genel yapısı onun mühendislikteki sınır değer problemlerinin oldukça geniş bir alanında kullanımına izin vermektedir. Sınır değer problemi, çözümün bağımlı değişkenler veya türevleri ile ilgili önceden belirlenmiş sınır koşullarını sağlayan bir bölge içerisinde arandığı problem türüdür.

Sonlu elemanlar yöntemi uygulamaları sınır değer problemlerinin üç ana kategorisi içerisinde olabilir:

1. Denge, sabit durum veya zamandan bağımsız problemler: Sabit bir durum için çözümlerin hesaplanmasını gerektiren problemlerdir. Bu çözüm, katı mekaniği problemlerinde yer değiştirme veya gerilme dağılımı, ısı transferi problemlerinde sıcaklık veya ısı akısı dağılımı, akışkanlar mekaniği problemlerinde hız veya basınç dağılımı olabilir.
2. Öz değer problemleri: Bu problemlerde de zaman açıkça yer almaz. Bu problemler genelde denge problemlerinin ilgili sabit durum koşulları için belirli parametrelerin kritik değerlerinin hesaplandığı versiyonları olarak düşünülebilir. Bu problemler, katı mekaniğinde doğal frekanslar, burkulma yükleri veya modal şekillerinin, akışkanlar mekaniğinde düzgün akışın korunmasına, elektrik devrelerinde rezonans karakteristiğinin bulunmasına yönelik olabilir.
3. Yayılım ve geçiş problemleri: Bu problemler ise örneğin katı mekaniğinde zamanla değişen yükler altında bir cismin davranışını, ısı transferi alanında ani ısıtma ya da soğutma gibi konuları içerebilir. Plastik şekillendirme problemleri de bu konuya dahil edilebilir (Rao, 2011).

SEY aşağıda sayılan beş aşamadan oluşur:

1. Ön işlemler (Preprocessing): Problem alanını sonlu küçüklükteki elemanlara ayırma
2. Eleman formülasyonu: Elemanlar için denklemlerin oluşturulması
3. Birleştirme: her bir elemanın denklemleri kullanılarak bütün sistemin denkleminin oluşturulması
4. Denklemlerin çözülmesi
5. Son işlemler (post processing): İlgilenilen büyüklüklerin ortaya çıkarılması, raporlanması ve sonuçların görselleştirilmesi (Fish ve Belytschko, 2007).

### 2.3.1. Çözüm bölgesinin ayrıklaştırılması

Çoğu mühendislik problemlerinde yer değiştirme, gerilme, sıcaklık, basınç, hız gibi değişkenlerin üç boyutlu mekân koordinatların fonksiyonu olarak değerlerinin bulunması istenir. Geçiş veya kararsız durum problemlerinde ise değişkenler sadece mekânsal koordinatlar değil, bunlara ek olarak zamanın da bir fonksiyonu olarak tanımlanır.

Problemlerin çözüm bölgesi çoğu zaman düzensizdir. SEY’de ilk aşama çözüm bölgesinin sonlu eleman adı verilen daha küçük ve düzenli alt bölgelere ayrılmasıdır.

Çözüm bölgesinin sonlu elemanlara ayrılmasında değişik yöntemler kullanılabilir. Bu yöntemlerin her birisi fiziksel problemlerin çözümüne değişik yaklaşımları da beraberinde getirir ve değişik çözüm süreleri gerektirir. Etkin sonlu eleman idealleştirme metotları deneyim ve temel kuralların bilinmesini gerektirir. Karmaşık geometrilerin bulunduğu kapsamlı problemlerde manuel gerçekleştirilen sonlu eleman idealleştirme ciddi bir çaba ve zaman gerektiren işlemlerdir. Bundan dolayı kullanıcı ile en az etkileşimi gerektiren otomatik sonlu elemanlar ağı oluşturma yazılımları geliştirilmiştir.

Eleman ağı oluştururken, elemanların şekil, sayı ve konfigürasyonları çözüm için gereken bilgisayar eforunu arttırmadan orijinal cismin veya bölgenin simülasyonunu mümkün olduğu kadar gerçeğe yakın yapacak şekilde seçilmelidir. Eleman seçiminde belirleyici etken genelde cismin geometrisi ve sistemi tanımlamak için gereken bağımsız koordinat sayısıdır.

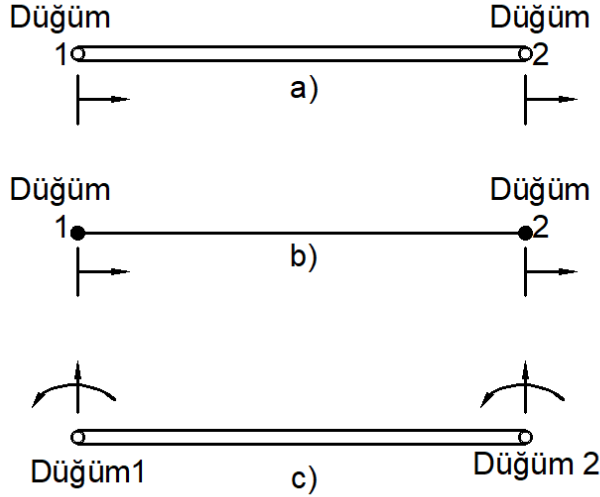
Eğer geometri, malzeme özellikleri ve probleme ait alan değişkenleri tek mekân koordinatı cinsinden tanımlanabiliyorsa Resim 2.9 ‘da gösterilen tek boyutlu veya doğrusal eleman tipleri kullanılabilir. Bir çubuktaki veya findeki sıcaklık dağılımı, boru akışında basınç dağılımı, aksenal yük altındaki çubuk bu elemanlar kullanılarak tanımlanabilecek durumlara örnek olabilir. Bu elemanlar için bir kesit alanı tanımlanmış olsa da şematik olarak Şekil 2.9 b’ de olduğu gibi gösterilirler. Kirişlerin analizinde alan değişken değerleri (enine yer değiştirme) ve bunun türevi (eğim) bilinmeyenler olarak seçildiğinde her bir düğüm noktası Şekil 2.9 c’de olduğu gibi gösterilir (Reybrouck ve diğerleri, 2020).

Eğer problemin konfigürasyonu ve diğer detayları iki bağımsız uzamsal koordinat ile tanımlanabiliyorsa Resim 2.10’da gösterilen iki boyutlu elemanlar kullanılabilir (Tati, 2021). İki boyutlu analizlerde kullanılacak temel eleman türü üçgendir.

Eğer geometri, malzeme özellikleri ve diğer parametreler ancak üç bağımsız uzamsal koordinatla tanımlanabiliyorsa cisim veya sistem Resim 2.11’de gösterilen üç boyutlu eleman tipleriyle idealize edilebilir. İki boyutlu durumun karşılığı olarak temel üç boyutlu eleman şekli dörtyüzlüdür. Burada da beş tane dörtyüzlünün birleşimiyle elde edilebilecek



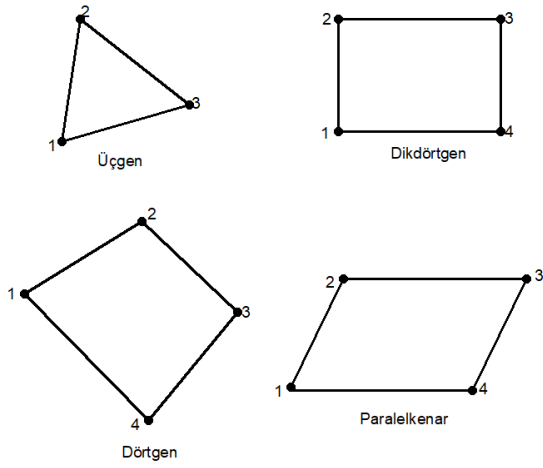
olan altı yüzlü eleman geometrisi bazı durumlarda avantajlarından dolayı tercih edilmektedir.



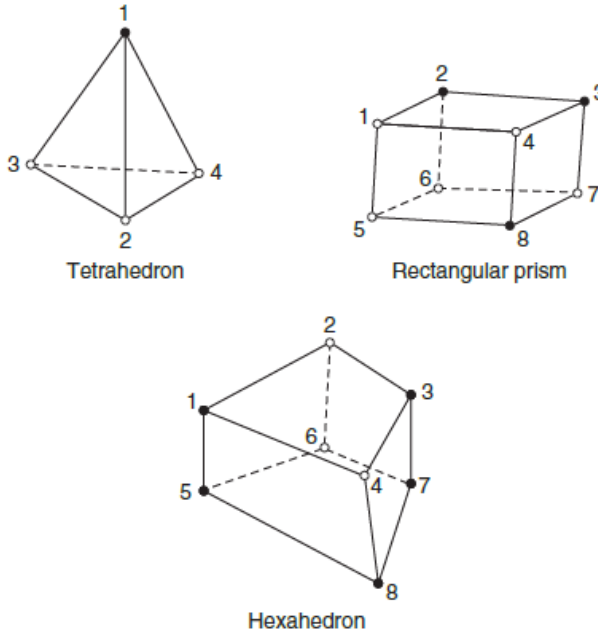
Resim 2.9. Tek boyutlu elemanın a) basit gösterimi, b) şematik gösterimi c) düğüm noktalarındaki birden fazla serbestlik derecesinin gösterimi.

Bazı durumlarda geometri aslında üç boyutlu almasına rağmen problem değişkenleri bir veya iki bağımsız koordinat kullanılarak tanımlanabilmektedir. Böyle durumlarda problem Resim 2.12’te görülen aksenal simetrik veya halka eleman tipleriyle idealize edilebilmektedir. Bu tür problemler üç boyutlu eleman tiplerinin kullanılması durumuna göre çok daha az bilgisayar eforu gerektirmektedir.

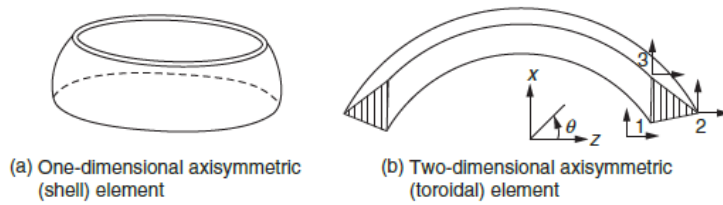
Kavisli geometrilerin bulunduğu problemlerin ayrıklaştırılmasında kavisli kenarları olan sonlu elemanların kullanılması kullanışlı olabilmektedir. Bu eleman türleri Resim 2.13’te görüldüğü gibi orta düğüm noktalarının eklenmesiyle elde edilebilmektedir. Düz kenarlı eleman tipleri doğrusal eleman, kavisli kenarlara sahip olanlar ise yüksek dereceli elemanlar olarak adlandırılmaktadır (Rao, 2011).



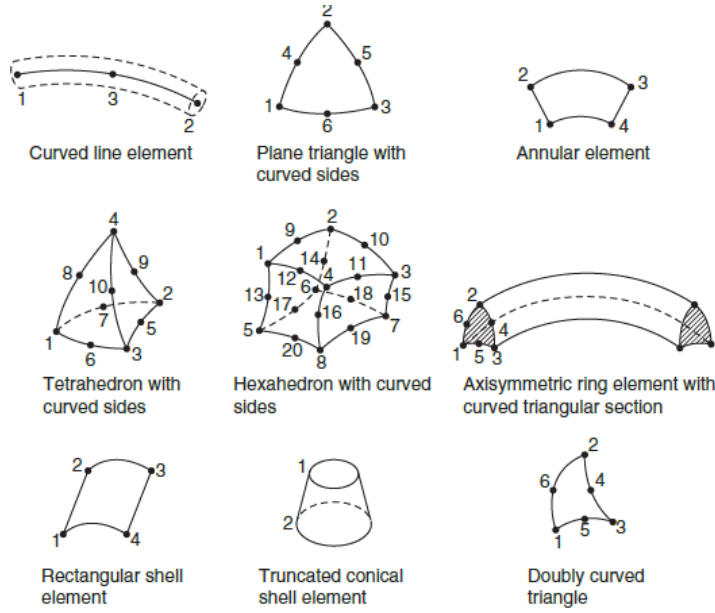
Resim 2.10. İki boyutlu eleman gösterimleri



Resim 2.11. Üç boyutlu eleman gösterimleri (Rao, 2011)



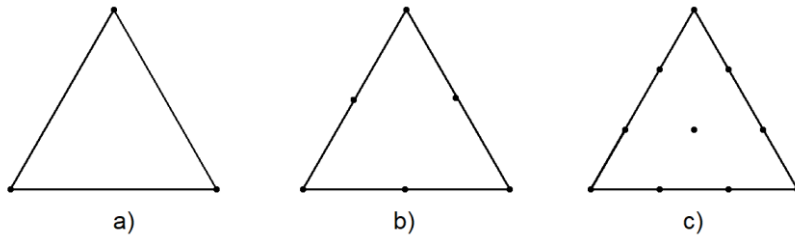
Resim 2.12. Eksenel simetrik eleman gösterimleri (Rao, 2011)



Resim 2.13. Yüksek dereceli eleman gösterimleri (Rao, 2011)

### 2.3.2. Eleman denklemlerinin oluşturulması

Sonlu elemanlar yönteminin temel fikri parçalı yaklaşımdır. Resim 2.14 a'da görülen bir üçgen şeklindeki elemanın çözüm bölgesinin sonlu boyutta bir alt bölgesi olduğu,  $z$  yönündeki kalınlığın sabit ve diferansiyel denklemin  $z$  koordinatına bağımlı bileşeninin olmadığı varsayılabilir. Üçgenin köşeleri elemanın düğüm noktaları olarak belirlenmiştir. Düğüm noktaları sonlu alan değişkeninin değerinin kesin olarak hesaplandığı sonlu elemanın özel noktalarıdır. Dış düğümler elemanın sınırları üzerinde bulunur ve sonlu elemanın komşu eleman ile bağlantısını sağlar. Eleman sınırları üzerinde bulunmayan düğüm noktaları (Resim 2.14 b ve c) ise iç düğümlerdir ve diğer elemanlar ile bağlantıları bulunmaz (Hutton, 2004).



Resim 2.14. a) 3 düğüm noktalı, b) 6 düğüm noktalı, c) 10 düğüm noktalı üçgen eleman (Hutton 2004)

Alan değişkeninin bir eleman dahilindeki davranışını ifade etmek için, interpolasyon fonksiyonu, biçim fonksiyonu veya interpolasyon modeli olarak adlandırılan fonksiyonlar kullanılır. Aşağıdaki sebeplerden dolayı interpolasyon modeli olarak çoğunlukla polinom tipindeki fonksiyonlar kullanılmaktadır:

1. Polinom tipindeki interpolasyon fonksiyonu içeren sonlu eleman denklemleri kolayca formüle edilebilir ve bilgisayar ortamına aktarılabilir. Özellikle polinomların türev ve integral işlemleri kolaydır.
2. Polinomların derecesini artırarak sonuçların hassasiyetini iyileştirmek mümkündür.

Bunun dışında, trigonometrik fonksiyonlar da bu özelliklerin bir kısmını karşılasa da sonlu elemanlar analizinde nadiren kullanılır (Hutton, 2004).

### 2.3.3. Direngenlik matrisinin oluşturulması

Bir sonlu elemanın temel karakteristiği direngenlik matrisinde vücut bulur. Yapısal bir sonlu eleman için direngenlik matrisi elemanın yük uygulandığında şekil değiştirmeye direncini ifade eden geometrik ve malzeme davranışı bilgisini içerir. Bu bilgi eksenel, eğilme, kesme ve burma etkilerini içerir. Yapısal olmayan akışkan akışı ve ısı transferi gibi analizlerde kullanılan sonlu elemanlarda direngenlik matrisi terimi yine kullanılır ve matris elemanın dış etkilere maruz kaldığında değişime direncini ifade eder.

Alan değişkenleri yer değiştirme ya da hız gibi vektörel bir büyüklük ise koordinat dönüşümü gereklidir. Bazen yerel koordinat sistemlerinde hesaplanan vektör ve matrisler hesaplama işini en aza indirecek şekilde düzenlenir. Bundan dolayı kullanılan koordinat sistemi elemandan elemana değişiklik gösterebilir. Bir yerel koordinat sistemi kullanıldığında düğüm noktalarının serbestlik derecesinin yönelimi de uygun biçime getirilir. Böyle bir durumda element denklemleri birleştirilmeden önce yerel koordinat sisteminde türetilmiş eleman vektör ve matrislerinin dönüştürülmesi, böylece bütün eleman denklemlerinin ortak bir evrensel koordinat sistemine dayandırılması gerekir. Evrensel koordinat sisteminin seçimi genelde rastgeledir ve genel uygulamalarda mühendislik çizimlerinde kullanılanların aynısı seçilir. Böylece cismin değişik düğüm noktalarının koordinatları kolayca tespit edilir (Hutton 2004).

Eleman matrisleri ve eleman vektörleri ortak evrensel koordinasyon siteminde elde edildikten sonraki aşama genel veya sistem denklemlerinin oluşturulmasıdır. Eleman karakteristiklerinden sistem denklemlerini elde etme prosedürü problem tipinden ve kullanılan eleman tipi ve sayısından bağımsız olarak aynıdır. Element matris ve vektörlerinin birleştirilmesi prosedürü element düğüm noktalarındaki uyum temellidir. Bu elemanların birbirlerine bağlandığı düğüm noktalarında bilinmeyen düğüm serbestlik derecelerinin veya değişkenlerin dereceleri bu düğümde birleşen bütün elemanlar için aynı olduğu anlamına gelir. Katı mekaniği ve yapısal problemlerde düğüm değişkenleri genellikle öteleme, dönme, kavışlenme veya yer değiştirmenin uzamsal türevleri de olabilen yer değiştirmedir. Ortak düğüm noktalarını paylaşan elemanların ortak düğüm noktalarında genelleştirilmiş yer değiştirmeler örtüştüğünde düğümleri paylaşan her elemanın o düğüm noktasındaki direngenlik ve yükleri toplam direngenlik ve yükü bulmak için eklenir (Hutton 2004).

#### **2.3.4. Sonlu eleman denklemlerinin çözümü**

Çözüm aşamasında sonlu elemanlar yazılımı matris formunda oluşturulmuş etkin denklemler çözülerek ana alan değişkenlerinin bilinmeyen değerleri hesaplanır. Daha sonra hesaplanan değerler kullanılarak tepki kuvvetleri, eleman gerilmeleri, ısı akışı gibi diğer türetilmiş değişkenler bulunur (Hutton, 2004).

#### **2.3.5. Son işlemler (postprocessing)**

Sonuçların analizi ve değerlendirmesi ile ilgili işlemlerdir. Genelde SEY yazılımları bir sonlu elemanlar analizine ait seçilmiş sonuçların sıralama, yazdırma ve resmedilmesi için bir modüle sahiptir. Bu şekilde SEY ile çözülen problemin sonuçlarının raporlanması ve değerlendirmesi yapılır (Hutton, 2004).

### **2.4. Cevap Yüzeyi Yöntemi**

Cevap yüzeyi yöntemi (CYY) birden fazla bağımsız değişkenin bir bağımlı değişkeni etkilediği problemleri analiz etmekte kullanılacak matematiksel ve istatistiksel tekniklerden oluşur (Das, 2014). Bu metot ilk olarak Box ve Wilson tarafından ortaya çıkarılmıştır (Box ve Wilson, 1951). CYY, proseslerin oluşturulması, geliştirilmesi ve optimize edilmesinde kullanılabilir.

Bazı bilimsel ve mühendislik kavramlarının mekanizmaları yeterince anlaşılmiş ve bunların kullanışlı matematiksel modelleri elde edilmiştir. Çoğu durumda ise araştırmacılar ve mühendisler bilimsel teoriler veya prensiplerin doğrudan uygulanamadığı ürünler ya da prosesler üzerinde çalışmak durumunda kalmaktadırlar. CYY birden çok etkenin bir prosesin veya ürünün bazı özelliklerini ya da performans değerlerini etkilediği durumlarda kullanılabilen bir araçtır (Box ve Draper, 2007).

Etkenlerin değerlerinin belirli kombinasyonu sonucunda ortaya çıkan ürün özellikleri veya performans değerleri cevap ya da bağımlı değişken olarak adlandırılmaktadır. Araştırmacı tarafından değerleri belirli amaçlar doğrultusunda kontrol edilebilen etkenlere de bağımsız değişken denilmektedir.

CYY' de deneylerin uygun şekilde tasarımı ve analizi, cevap ya da bağımlı değişkenler ile bunları etkileyen etken ya da bağımsız değişkenlerin etki dereceleri araştırılır. İlgili cevap  $y$  ve bağımsız değişkenler  $x_1, x_2, \dots, x_k$  olarak ifade edilirse, bunların arasındaki bilinmeyen ilişki genellikle düşük dereceli bir çokterimli modeli ile

$$y = f'(x)\beta + \epsilon \quad (2.21)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada,  $x = (x_1, x_2, \dots, x_k)$  ve  $f(x)$  ise  $q$  elemandan oluşan ve  $x_1, x_2, \dots, x_k$ ' terimlerinin belli bir dereceye kadar üstleri ve üstlerin kendi aralarında çarpımlarını içeren bir vektör fonksiyonunu,  $\beta$   $f(x)$  ile ilgili  $q$  adet bilinmeyen sabit katsayının oluşturduğu vektör,  $\epsilon$ , sıfır ortalamalı rastgele deneysel hatayı ifade eder.

CYY'nin birinci ve ikinci dereceden modelleri sıklıkla kullanılmaktadır. Birinci dereceden model,

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \epsilon \quad (2.22)$$

ve ikinci dereceden model,

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \epsilon \quad (2.23)$$

şeklinde ifade edilir (Khuri ve Mukhopadhyay, 2010; Myers, Montgomery ve Anderson-cook, 2016).

Cevap yüzeyi metodolojisi genel olarak aşağıdaki endüstriyel problemlerin çözümünde kullanışlıdır:

1. Test edilmiş bir bölgede sistem davranışlarının sayısal olarak belirlenmesi,
2. Cevabın optimize edilmesi,
3. Belirli koşulları ve müşteri gereksinimlerini karşılamak için gerekli operasyon şartlarının belirlenmesi,
4. Gerçekte denenmemiş faktör kombinasyonlarında ürün özelliklerinin tahmin edilmesi,
5. Proses kararlılığı için gereken şartların bulunmasıdır.

Bu metod, kimya, biyoloji ve imalat gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır (Box ve Draper, 2007; Myers ve diğerleri, 2016).

#### 2.4.1. CYY'nde kullanılan deney tasarımları

Deney tasarımının amacı, deney sayısını azaltmak veya regresyon katsayılarındaki hatayı minimize etmektir. Bahsedilen amaçlara ulaşmak için  $n$  sayıdaki deneyden oluşan bir deney serisi uygulanmalı ve her deneyde belirlenmiş kontrol değişkenleri için ortaya çıkan cevap ölçülmelidir. Bu kontrol değişkenlerinin düzenindeki bütünlük cevap yüzeyi tasarımı ya da kısaca tasarım olarak adlandırılır ve  $n \times k$  terimli  $D$  ile gösterilen tasarım matrisi ile ifade edilir (Myers ve diğerleri, 2016).

$$D = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1k} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2k} \\ \cdot & \cdot & \cdots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdots & \cdot \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nk} \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Burada  $x_{ui}$ ,  $x_i$ 'nin  $u$ 'ncü ( $i=1, 2, \dots, k$ ;  $u=1, 2, \dots, n$  olmak üzere) tasarım değerlerini temsil etmektedir.  $D$ 'nin her satırı  $k$  boyutlu Öklit uzayında tasarım noktası olarak adlandırılan bir noktayı tanımlar. Eğer  $y_u$ 'yu  $x$ 'in  $u$ 'ncü değerlerinin uygulanmasıyla elde edilen cevap değeri olarak tanımlarsak. Eş. (2.21)'den;

$$y_u = f' x_u \beta + \epsilon_u, \quad u = 1, 2, \dots, n \quad (2.25)$$

elde edilir. Burada  $\epsilon_u$ ,  $u$ 'ncü deney sonucuna ait hatayı temsil etmektedir. Böylece Eş. (2.25) matris formunda;

$$y = \mathbf{X}\beta + \epsilon \quad (2.26)$$

olarak ifade edilebilir. Burada  $y=(y_1, y_2, \dots, y_n)'$ ,  $\mathbf{X}$ ,  $u$ 'ncü satırı  $f'(x_u)$  ve  $\epsilon=(\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_n)'$  olan  $n \times p$  dereceli bir matristir.  $X$  matrisinin ilk sütunu 1'lerden oluşmaktadır (Khuri and Mukhopadhyay 2010).

Hataların ( $\epsilon$ ) ortalamasının sıfır olduğu ve varyans-kovaryans matrisinin  $\sigma^2 \mathbf{I}_n$  ile gösterildiği varsayıldığında  $\beta$ 'nin en küçük tahmin edicileri,

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1}X'y \quad (2.27)$$

ile hesaplanır ve  $\hat{\beta}$ 'nin varyans-kovaryans matrisi,

$$Var(\hat{\beta}) = (X'X)^{-1}X'(\sigma^2 \mathbf{I}_n)X(X'X)^{-1} = \sigma^2(X'X)^{-1} \quad (2.28)$$

eşitliği ile tanımlanır. Ortalama cevabın  $x_u$ 'daki hesaplanması  $\hat{\beta}$ 'nin  $\beta$  yerine konulmasıyla elde edilir;

$$\hat{\mu}(x_u) = f'(x_u)\hat{\beta}, \quad u=1, 2, \dots, n. \quad (2.29)$$

Bunun dışında  $f'(x_u)\hat{\beta}$   $u$ 'ncü tasarım noktasındaki tahmini cevabı ( $\hat{y}(x_u)$ ) verir. Genelde,  $R$  ile temsil edilen deney bölgesindeki herhangi bir  $x$  noktası için tahmin edilen  $\hat{y}(x)$  cevabı aşağıdaki formülle bulunabilir.

$$\hat{\mu}(x) = f'(x)\hat{\beta}, \quad x \in R \quad (2.30)$$

$\hat{\beta}$ ,  $\beta$ 'nin yansız bir hesaplayıcısı olduğundan  $\hat{y}(x)$  de  $x \in R$ 'daki ortalama cevap anlamına gelen  $f'(x)\beta$ 'nin bir yansız hesaplayıcısıdır. Eş. (2.28) kullanılarak  $\hat{y}(x)$ 'in varyansı;

$$Var[\hat{y}(x)] = \sigma^2 f'(x)(X'X)^{-1}f(x) \quad (2.31)$$

olarak bulunur (Khuri ve Cornell, 1996).



Deney tasarımı sırasında çoğu zaman kontrol değişkenleri doğrudan değil de kodlanmış değerleriyle kullanılırlar. Kodlanmış değerler,

$$x_{ui} = \frac{2(X_{ui} - \bar{X}_i)}{R_i}, \quad u=1, 2, \dots, N \quad i=1, 2, \dots, k \quad (3.32)$$

formülü ile hesaplanır. Burada,  $\bar{X}_i = \sum_{u=1}^N X_{ui}/N$  ve  $R_i$ , en büyük ve en düşük değer arasındaki farktır.

Bu şekilde bütün faktörler -1 ile 1 arasında, boyutsuz, ortalaması sıfır olan ve standart sapması aynı değerler almış olur (BAŞ, 2010; Myers ve diğerleri, 2016).

CYY'de kullanılan deney tasarımlarından istenen özelliklerden bazıları şunlardır;

#### Diklik (Orthogonality)

Bir D tasarımı, X Eş. 2.26'daki model matrisi olmak üzere,  $X'X$  matrisi diyagonal ise dik olarak kabul edilir. Eş. 2.28 deki  $Var(\hat{\beta})$  matrisinin diyagonal dışındaki terimlerinin sıfır olması  $\hat{\beta}$  matrisinin terimlerinin bağımsız olmasını sağlar. Ayrıca, Eş. (2.26)'daki  $\epsilon$  hata vektörü  $N(0, \sigma^2 I_n)$ 'da olduğu gibi normal dağıldığı varsayılırsa bu elemanlar istatistiksel olarak bağımsız olacaktır. Bu da modeldeki bilinmeyen parametrelerin anlamlılığını test etmeyi kolaylaştırmaktadır (Das 2014).

#### Dönersellik (Rotatability)

Eğer Eş. (2.31)'deki tahmin varyansı tasarım merkezinden eşit uzaklıktaki noktalarda sabit olacak şekilde kodlama yapılmışsa bu d tasarımı dönersel olarak tanımlanır. Bu özellik sayesinde tahmin varyansı koordinat sistemi herhangi bir şekilde döndürülse bile sabit kalır (Das 2014).

#### Düzenli hassasiyet (Uniform Precision)

Eğer orijindeki  $Var[\hat{y}(x)]$  değeri orijinden uzaktaki değerine eşitse bu dönersel tasarım ek olarak düzenli hassasiyet özelliğine sahiptir. Bu özellik yarıçapı 1 olan hiperkürenin içerisinde tahmin varyansının yaklaşık olarak düzenli dağılmasını temin eder. Bu da tasarım

merkezi yakınlarında tahmin varyansının kararlılığının elde edilmesine yardım eder (Das 2014).

### Tasarım sağlamlığı (design robustness)

CYY ve deney tasarımı çalışmalarında aşağıdaki amaçları sağlamak için metotlar geliştirmeye özel çabalar gösterilmiştir:

- Çevresel koşullara karşı sağlam ürün ve proses tasarlamak
- Bileşenlerdeki değişimlere karşı sağlam tasarımlar veya ürünler geliştirmek
- Belirli bir hedef değer yakınlarında ürün çıktı cevabının değişkenliğini minimize etmek.

Burada sağlamlık, ürün veya prosesin hedef üzerinde kararlı ve kontrol edilmesi zor olan faktörlere karşı nispeten duyarsız olması anlamında kullanılmaktadır (Myers ve diğerleri, 2016).

### Tasarım optimallığı (design optimality)

Optimal tasarımlar tahmin edilen cevabın ( $\hat{y}(x)$ ) ortalama cevaba ( $\mu(x)$ ), ilgilenilen belirli bir R bölgesinde yakınlığını sağlamak için uygun tasarımlardır.

En çok kullanılan CYY modelleri birinci ve ikinci dereceden çok terimli modelleridir. Bu nedenle birinci ve ikinci dereceden deney tasarımları üzerinde durulacaktır.

Birinci dereceden tasarımlar:

#### $2^k$ faktöriyel tasarım

Bu tasarımda her kontrol değişkeni -1 ve 1 ile kodlanmış düşük ve yüksek seviye olarak adlandırılan iki değer ile temsil edilir. Bu tasarım k adet değişkenin bahsedilen iki seviyesinin bütün kombinasyonlarını içerir. Bu durumda deney sayısı  $2^k$ 'ya eşit olur ve her tasarım noktası bir kez kullanılmış olur. Örnek olarak 3 kontrol değişkeninin etkili olduğu bir deney tasarım matrisi 8 satır ve 3 sütundan oluşur ve kodlanmış değerler cinsinden aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$D = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

### 2<sup>k</sup> faktöriyel tasarımların kesirli tekrarları

Bir önceki tasarımda k değeri büyükse ( $k \geq 5$ ) çok fazla tasarım noktasına ihtiyaç olacaktır. Eş. (2.22)'deki bilinmeyen sayısı  $k+1$  olduğu için  $2^k$ 'nin kesirleri bu modeli oluşturmak için yeterli olabilir. Genel olarak  $2^k$  tasarımının  $2^{-m}$ 'inci kesri  $2k-m$  adet nokta içerir. Burada m pozitif bir tam sayıdır ve  $2^{k-m} \geq k+1$  şartının sağlanması şartıyla modeldeki bütün parametreler hesaplanabilir.

### Plackett-Burman Tasarımları

Bu tasarım k adet kontrol değişkeninin her biri için iki seviye kullanır. Fakat deney sayıları (n),  $k+1$  olduğu için özellikle k'nin büyük olduğu durumlara göre çok daha ekonomiktir. Ancak bu tasarım sadece n dördün katları olduğu, yani kontrol değişkenlerinin sayıları 3, 7, 11, 15, ... olduğu zaman uygulanabilir. Örnek olarak 7 kontrol değişkenli bir Plackett-Burman tasarımı Eş. (2.29)'da verilmiştir.

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

### Simpleks Tasarımları

Bu tasarım da  $n=k+1$  noktadan oluşan yoğun bir tasarımdır. Bu tasarımın noktaları k boyutlu düzgün yüzlü şeklin veya simpleksin ayrıtlarına yerleştirilmiştir. Burada herhangi iki tasarım noktaları ile tasarım merkezi arasındaki açı  $\theta$ ,  $\cos \theta = -1/k$  ile bulunur.

İkinci dereceden tasarımlar:

### 3<sup>k</sup> faktöriyel tasarımlar

Her birisi üç seviyeye sahip olan k adet kontrol değişkeninin bütün kombinasyonlarını içeren bir tasarımdır. Değişkenler eşit aralıklarla kodlandığında seviyeler -1, 0, 1 şeklinde oluşur. Bu tasarımdaki deney sayısı 3<sup>k</sup> olduğu için k'nın büyük değerleri için çok büyük sayılara ulaşacaktır. Bu sebepten maliyeti düşürmek için 3<sup>k</sup> tasarımın kesirleri de kullanılmaktadır (Montgomery, 2008).

### Merkezi birleşik tasarımlar (CCD)

İkinci dereceden tasarımlar arasında en çok kullanılanıdır. Bu tasarımlar üç kısma ayrılır;

1. Faktör seviyelerinin -1 ve 1'ler ile kodlanmış tam veya kesirli 2<sup>k</sup> faktöriyel tasarımı. Bu kısım faktöriyel bölüm olarak adlandırılır.
2. Noktaların her kontrol değişkeninin tasarım merkezinden  $\alpha$  kadar uzakta olacak şekilde düzenlendiği 2k noktadan oluşan aksenal kısım.
3.  $n_0$  merkez noktası

böylece CCD'de tasarım noktası sayısı  $n=2^k+2k+n_0$  olarak bulunur. Örneğin k=2 için  $\alpha=\sqrt{2}$  ve  $n_0=2$  olur ve tasarım matrisi aşağıdaki gibi oluşur:

$$D = \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ 1 & -1 \\ -1 & 1 \\ 1 & 1 \\ -\sqrt{2} & 0 \\ \sqrt{2} & 0 \\ 0 & -\sqrt{2} \\ 0 & \sqrt{2} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

Dikkat edilirse CCD birinci dereceden 2<sup>k</sup> tasarımına 2k faktöriyel ve noktalarının ve  $n_0$  merkez noktası tekrarlarının eklenerek geliştirilmiş halidir. Dolayısıyla bu tasarım cevap yüzeyi çalışmalarının sıralı yapısıyla uyumlu bir şekilde birinci dereceden tasarımla başlar daha sonra ikinci dereceden modelin uydurulması için ek tasarım noktaları ile devam edilir.

Eksenel parametrenin  $\alpha$  ve merkez noktası tekrarının sayısı  $n_0$  değerleri CDD'ın bazı istenen özelliklerin elde edilebileceği şekilde seçilir. Örneğin F faktöriyel kısımdaki nokta sayısını göstermek üzere,  $\alpha = F^{1/4}$  seçilmesi CCD'in dönersel olmasını sağlar. Bunun dışında  $n_0$  değeri CCD'nin diklik veya düzenli hassasiyet özelliğini de sağlayacak şekilde seçilebilir.

### The Box–Behnken Tasarımı

Bu tasarım her faktör için üç seviye ve 3k faktöriyel tasarımın özel bir alt setini içerir. Box–Behnken tasarımı ekonomik bir tasarım olduğu için endüstriyel amaçlı araştırmalarda yaygın olarak kullanılırlar. Her zaman olmamakla birlikte bazı Box–Behnken tasarımlar dönerseldir.

Yukarıda bahsedilenler dışında ikinci dereceden tasarımlar da geliştirilmiştir ancak yaygın olarak kullanılmamaktadır (Khuri ve Mukhopadhyay, 2010).

#### **2.4.2. Optimum şartların tespit edilmesi**

CYY'nin ana amaçlarından birisi, ilgilenilen belirli bir R bölgesinde bölgede, kontrol değişkenlerinin, cevabı maksimum ya da minimum yapan optimum değerlerinin tespit edilmesidir. Bu ortalama cevabın yeterli bir şekilde temsilini sağlayan iyi uydurulmuş bir modeli gerektirir. Çünkü optimum değerlerin tespitinde bu model kullanılacaktır. CYY'de kullanılacak optimizasyon teknikleri uydurulan modelin yapısıyla ilgilidir. Birinci dereceden modeller için endik çıkış (veya iniş) optimum cevaba yaklaşmak için uygun bir tekniktir.

### Birinci dereceden Cevap Yüzeyi Modellerinin Optimizasyonu

Deneysel çalışmalarda model kurma ve cevabın daha iyi olduğu bölgenin bulunması için sıralı deneyler düzenleme işlemleri endik çıkış yöntemi ile yapılır. Birinci dereceden modelin yani düzlemsel ifadenin  $x_1, x_2, \dots, x_k$  başlangıç bölgesinde sistem için kabul edilebilir bir yaklaşım olduğu varsayılarak başlanır. En dik çıkış yönteminin aşamaları şunlardır (Baş 2010):

1. Bir dik tasarım kullanılarak birinci dereceden bir model kurulur. Burada iki seviyeli tasarımlar oldukça yeterli olabilmektedir; fakat merkez noktaların da kullanılması tavsiye edilmektedir.
2. Cevabın en büyük olması gerektiği durumlarda en dik çıkış, en küçük olması gerektiğinde ise en dik iniş yolu hesaplanır. Birincisi cevabın maksimum artışını, ikincisi maksimum düşüşünü gerektirir.
3. Yol boyunca deneyler yapılarak iyileşmenin azaldığı ve ortadan kalktığı nokta tespit edilir. Bu basit birinci dereceden modelin bozulduğunu ve ilk deney bölgesinden fazla uzaklaşıldığını gösterir. Genelde en dik çıkış yönteminde peş peşe iki noktada azalma görülene kadar devam edilir.
4. Maksimum veya minimuma yaklaşılan noktalar kullanılarak yeni deney noktaları tespit edilir. Tasarım yine birinci derece olarak fakat merkez noktaları eklenerek yapılır.
5. İkinci deneyler yürütülür ve yeni bir birinci dereceden model kurulur. Uyum eksikliği testi yapılır. Uyum eksikliği belirgin ise yeni modele göre yeni bir yol hesaplanır. Uyum eksikliği belirgin değilse ikinci dereceden yeni bir deney tasarımı yapılarak optimum nokta bulunur.

### İkinci dereceden modelin optimizasyonu

Eş. 2.23'te formülasyonu verilen ikinci dereceden model;

$$y = \beta_0 + x' \beta_* + x' B x + \epsilon \quad (2.36)$$

Burada  $x = (x_1, x_2, \dots, x_k)'$ ,  $\beta_* = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k)'$ , ve  $B_i$ 'nci diyagonal elemanı  $\beta_{ii} (i=1, 2, \dots, k)$  ve  $(i, j)$ 'nci diyagonal olmayan elemanı  $\frac{1}{2}\beta_{ij} (i, j=1, 2, \dots, k; i \neq j)$  olan  $k \times k$  dereceden bir simetrik matristir. Eğer Eş. (2.24)'deki  $D$  matrisi kullanılarak  $y$  üzerinde  $n$  adet deney yapıldıysa Eş. 2.36 Eş. 3.26'daki gibi vektör formunda yazılabilir. Parametre vektörü  $\beta$ ,  $\beta_0$  ve  $\beta_*$  ile  $B$ 'yi içerecektir.  $E(\epsilon)=0$  ve  $\text{Var}(\epsilon)=\sigma^2 I_n$  olduğu varsayılırsa,  $\beta$ 'nın en düşük kareler tahmini Eş. (2.27)'de verildiği gibi  $\hat{\beta}$ 'dir.  $R$  bölgesi içindeki  $x$  noktasının tahmini cevabı şu şekilde olur:

$$\hat{y}(x) = \hat{\beta}_0 + x' \hat{\beta}_* + x' \hat{B} x \quad (2.37)$$

burada  $\widehat{\beta}_0$  ve  $\widehat{\beta}_*$  ile  $\widehat{B}$ 'nin elemanları, sırasıyla  $\beta_0$  ve  $\beta_*$  ile  $B$ 'nin en düşük kareler tahminleridir (BAŞ 2010).

### Ridge Analizi Yöntemi

Bu yöntem, Eş. (2.37)'ye göre uydurulmuş ikinci derecen modele göre hesaplanan cevabın optimize edilmesinde kullanılabilir. Bu yöntemde Eş. (2.37)'deki  $\hat{y}(x)$ , Eş. (2.38)'de ifade edildiği üzere, merkezi orijinde olan  $r$  yarıçaplı bir hiperküre üzerindeki  $x$  için optimize edilir.

$$\sum_{i=1}^k x_i^2 = r^2 \quad (2.38)$$

Bu sınırlandırılmış optimizasyon orijinden  $R$  bölgesi içinde kalan değişik  $r$  değerleri için uygulanır. Bundaki amaç orijinden değişik uzaklıklar için en büyük tahmini cevap değerleri ve hiperküre üzerinde bunlara karşılık gelen sonuçların ne olduğu diğer bir değişle faktörlerin hangi değerlerinin tahmin edilen cevabı arttırdığı ile ilgili bilgi toplamaktır.

Bu optimizasyon Eş. (2.38) ile sınırlandırılmış olduğundan Lagrange çarpanları yöntemi optimumunun araştırılmasında kullanılabilir. Fonksiyon,  $\lambda$  bir Lagrange çarpanını ifade etmek üzere aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Box and Draper 2007).

$$H = \hat{\beta}_0 + x' \hat{\beta}_* + x' \widehat{B} x - \lambda(x'x - r^2) \quad (2.39)$$

$H$ 'nin  $x$ 'e göre türevi alınıp sonuç sıfıra eşitlenirse,

$$\hat{\beta}_* + 2(\widehat{B}x - \lambda x) = 0 \quad (2.40)$$

Eşitliği elde edilir. Bu Eş.  $x$  için çözümlerse,

$$x = -\frac{1}{2}(\widehat{B} - \lambda I_n)^{-1} \hat{\beta}_* \quad (2.41)$$

Bu eşitliğin çözümü  $\hat{y}(x)$  fonksiyonunun durağan bir noktasını verir. Eğer  $H$ 'nin  $x$ 'e göre ikinci dereceden kısmi türevleri olan Hessian matrisi negatif tanımlı ise yerel maksimum, pozitif tanımlı ise yerel minimum noktasına ulaşılmış olunur. Eş. (2.20)'den bu matris;

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{\partial H}{\partial x^r} \right] = (2\hat{B} - \lambda I_n) \quad (2.42)$$

olarak elde edilir.

Bu sebepten Draper tarafından bir maksimuma ulaşmak için  $\lambda$ 'nın  $\hat{B}$ 'nin en büyük öz değerinden daha büyük seçilmesi önerilmiştir. Bu durumda  $\hat{B} - \lambda I_n$  negatif tanımlı olacaktır. Tersine  $\lambda$ ,  $\hat{B}$ 'nin en küçük öz değerinden daha küçük seçilirse  $\hat{B} - \lambda I_n$  pozitif tanımlı olacaktır ve bu da minimumu sonuç verecektir. Bu şekilde  $\lambda$  için değişik değerler seçerek her  $\lambda$  için optimum konum Eş. (2.41) kullanılarak bulunabilir. Aynı şekilde  $x^r = r^2$ 'nin değeri bulunabilir. Eş. 2.41'den elde edilen sonuç  $r$  tamamen  $R$  bölgesi içinde kalan bir hiperküre olduğu sürece geçerlidir. Optimum  $\hat{y}(x)$  değeri Eş. 2.21'den elde edilen  $x$ 'in Eş. 2.17'nin sağ tarafına konularak hesaplanır. Bu işlem  $\hat{y}(x)$  ve  $x_i$ 'nin  $r$  ( $i = 1, 2, \dots, k$ )'ye karşılık gelen grafiğini oluşturur. Bu grafik orijinden herhangi bir  $r$  uzaklığındaki nokta için optimum değeri ve bunun yerini belirlemede kullanılabilir (Box and Draper 2007).

Ridge analizi metodu  $R$  bölgesi içindeki konsantrik küreler  $\hat{y}(x)$ 'leri optimize ettiği için Eş. (2.31) ile tanımlanan tahmin varyansı verilen herhangi bir hiperküre üzerinde sabit olduğu sürece anlamlıdır. Bu Eş. (2.36) ile tanımlanan uydurulması için dönersel tasarımı gerektirir. Eğer tasarım dönersel değilse tahmin varyansı hiperküre yüzeyi üzerinde belirgin bir şekilde değişken olur bu da optimum cevap tahmininin zayıf olmasına yol açabilir. Bu sebepten ridge analizinin tahmin varyansının boyutuna bazı ek sınırlamalar altında yürütülmesini içeren modifikasyonlar Khuri ve Myers tarafından önerilmiştir (Khuri ve Myers, 1979). Bu modifikasyon sayesinde Eş. 2.36'nın oluşturulmasında kullanılan tasarım dönersel olmadığı durumlarda da daha iyi optimizasyon sonuçları elde edilebilmektedir.

## 2.5. Çok amaçlı optimizasyon ve istenirlik fonksiyonu

İstenirlik fonksiyonu, birden fazla bağımlı değişkenin bir arada optimize edilmesini gerektiren durumlarda kullanılan çok amaçlı optimizasyon (ÇAO) yöntemlerinden birisidir.

ÇAO yöntemleri genel olarak problemin formülize edilmesi, optimizasyon ve karar verme olmak üzere üç aşamadan oluşmaktadır.

Sınırlandırılmış çok amaçlı ÇAO problemlerin formülizasyonu üç unsura odaklanmaktadır:



- i. Aynı anda minimize veya maksimize edilecek olan amaç fonksiyonları
- ii. İfade edilen fonksiyonun parametreleri olarak kullanılacak olan karar değişkenleri
- iii. Hedef fonksiyonunun sınırlamaları

Optimizasyon maksimizasyon veya minimizasyonu gerektirebilir. Eş. 2.43 bir minimizasyon problemini ifade etmektedir.

$$\text{Minimize}[f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)] \quad (2.43)$$

Bu ifade 3.44' teki gibi eşitsizlik veya 3.45' teki gibi eşitlik fonksiyonlarını içerebilir.

$$g_i(x) \leq 0, i = 1, 2, \dots, m, \quad (2.44)$$

$$h_j(x) \leq 0, j = 1, 2, \dots, p, \quad (2.45)$$

Burada n amaç fonksiyonlarının sayısını,  $x = [x_1, x_2, \dots, x_d]^T$  karar değişkenleri vektörünü, m ve p ise eşitlik ve eşitsizlik kısıtlarını ifade eder. Optimizasyonda hedef bütün  $x = [x_1, x_2, \dots, x_d]$  vektörlerinden 2.44 ve 2.45'i sağlayan bir kümeyi bulmak ve önceden tanımlanmış amaçları dikkate alarak optimal sonuçlara ulaşmaktır. Muhtemel çakışmalardan dolayı tanımlanmış bütün amaçları sağlayan optimum sonucu bulmak çoğu zaman pratikte mümkün olmamaktadır. Bundan dolayı beklenti belirli bir kaliteyi sağlayan optimal çözümleri bulmaya dönüşmektedir (Al-Jamimi ve diğerleri, 2021).

İstenirlik fonksiyonu Harrington tarafından ortaya atılmış ve Derringer ve Suich tarafından geliştirilmiştir (Derringer ve Suich, 1980; Harrington, 1965). Bu yaklaşımda amaç istenen yanıtların en iyi uzlaştığı faktör seviyelerini bulmaktır. İstenirlik fonksiyonu yaklaşımında her yanıt belirli aralıkta birimsiz bir değer (istenirlik) olacak şekilde ölçeklendirilir (Akteke-Öztürk, Weber ve Köksal, 2020).

Eğer r adet yanıtın her biri k faktör ile bağıntılı ise:

$$y_{ui} = f_i(x_1, x_2, \dots, x_k) + \varepsilon_{ui}, u = 1, 2, \dots, N_i, \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (2.46)$$

Burada  $f_i$ ,  $y_i$  yanıt değişkenlerinden her birisi ile  $x_1, x_2, \dots, x_k$  faktörleri arasındaki fonksiyonel ilişkiyi temsil eder ve  $f_i$  her  $y_i$  için değişebilir. Eğer model hatası  $\varepsilon_{ij}$  her i için sıfıra eşitse, ortalama veya beklenen yanıt  $\eta_i$ , k bağımsız değişkene

$$\eta_i = f_i(x_1, x_2, \dots, x_k), \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (2.47)$$

ile bağıntılıdır.

Tahmin edilen her yanıt değişkeni  $Y_i$  istenirlik fonksiyonu temelinde 0 ile 1 arasında bir istenirlik değerine dönüştürülür. Tekil istenirlik değerleri geometrik ortalama kullanılarak birleştirilebilir:

$$C = (d_1 x d_2 x \dots x d_k)^{1/k} \quad (2.48)$$

Burada D değeri birbirine bağlanmış yanıt değerlerinin genel istenirliğini temsil eder. D değeri de 0 ile 1 arasındadır ve her yanıt istenen koşula yaklaştığında 1'e yaklaşır. Eğer yanıtların herhangi biri Kabul edilebilir sınırların dışına çıktığında ( $d_i=0$ ) C değeri de sıfır olur.

$Y_i$  'den  $d_i$  'ye dönüşüm tek taraflı veya çift taraflı olmak üzere iki şekilde de gerçekleşebilir. Yanıt değişkeni  $Y_i$  'yi maksimize etmek için tek taraflı dönüşüm kullanılır. Bu durumda  $Y_i$  'nin minimizasyonu  $-Y_i$  'nin maksimizasyonuna denktir. Cevabın alt ve üst limiti sırası ile  $l_i$  ve  $u_i$  olarak kabul edilirse ve amaç cevabın maksimizasyonu olduğunda dönüşüm Eş. 3.49'daki gibi tanımlanabilir. Bu eşitlikte r kullanıcı tarafından belirlenir.

$$C = \begin{cases} 0 & , Y_i < l_i \\ \left(\frac{Y_i - l_i}{u_i - l_i}\right)^r & , l_i \leq Y_i \leq u_i \\ 1 & , Y_i > u_i \end{cases} \quad (2.49)$$

Cevabın en çok istenen bir değeri ( $c_i$ ) bulunduğu iki yönlü istenirlik dönüşümleri kullanılır. Bu durumda dönüşüm Eş. 2.50'deki şekilde tanımlanır.

$$C = \begin{cases} \left(\frac{Y_i - l_i}{c_i - l_i}\right)^s & , l_i \leq Y_i \leq c_i \\ \left(\frac{Y_i - u_i}{c_i - u_i}\right)^t & , c_i \leq Y_i \leq u_i \\ 0 & , Y_i < l_i \text{ or } Y_i > u_i \end{cases} \quad (2.50)$$

Burada s ve t tek taraflı transformasyondaki r ile aynı şekilde kullanılır.

Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen metot ve stratejisi sonlu elemanlar yöntemi, cevap yüzey yöntemi ve istenirlik fonksiyonunu bir arada kullanarak hadde pasosu tasarımı optimizasyonuna yöneliktir. Yapılan literatür taramalarında hadde pasosu tasarımı ile ilgili çalışmaların sınırlı sayıda olduğu görülmüştür. Tezin bu bölümünde önce hadde pasosu tasarımına yönelik çalışmalar sunulmuştur. Daha sonra sırası ile haddeleme işleminin araştırılmasında sonlu elemanlar yöntemini kullanmış olan güncel çalışmalar, değişik talaşlı ve talaşsız üretim yöntemlerinin parametrelerinin birbirleri ile ilişkilerinin incelenmesinde cevap yüzey yöntemini kullanan ve bu üretim yöntemlerinin parametrelerinin optimizasyonu için istenirlik fonksiyonunun kullanıldığı çalışmalardan bahsedilmiştir.

## **2.6. Önceki Çalışmalar**

Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen metot ve çözüm arama stratejisi, sonlu elemanlar yöntemi, cevap yüzey yöntemi ve istenirlik fonksiyonunu bir arada kullanarak hadde pasosu tasarımı optimizasyonuna yöneliktir. Yapılan literatür taramalarında hadde pasosu tasarımı ile ilgili çalışmaların sınırlı sayıda olduğu görülmüştür. Tezin bu kısmında önce hadde pasosu tasarımına yönelik çalışmalar sunulmuştur. Daha sonra sırası ile haddeleme işleminin araştırılmasında sonlu elemanlar yöntemini kullanmış olan güncel çalışmalar, değişik talaşlı ve talaşsız üretim yöntemlerinin parametrelerinin birbirleri ile ilişkilerinin incelenmesinde cevap yüzey yöntemini kullanan ve bu üretim yöntemlerinin parametrelerinin optimizasyonu için istenirlik fonksiyonunun kullanıldığı çalışmalardan bahsedilmiştir.

### **2.6.1. Hadde paso tasarımı ile ilgili çalışmalar**

Bu bölümde hadde pasosu tasarımı ile ilgili olarak yapılmış çalışmaların bir özeti tarihsel sıralama gözetilerek verilmiştir.

Hadde pasosu tasarımında paso sayısını düşürmek ve işlem sırasında metal akışını iyileştirmek amacıyla Shivpuri ve Shin tarafından tekrarlamalı bir metot geliştirilmiştir. Bu metot üç boyutlu sonlu elemanlar simülasyonu ile ampirik yöntemleri bir arada kullanmaktaydı. Geliştirilen metot kareden yuvarlağa haddeleme işleminde kullanılan mevcut 7 pasolu bir tasarımın iyileştirilmesinde kullanılmış ve paso sayısında azalma, kesit daralmasında ve haddelenmiş ürünün etkin deformasyon dağılımında iyileşmeler elde edilmiştir (Shivpuri ve Shin, 1992).

Lee, Shin ve Shivpuri, kareden yuvarlağa sıcak haddeleme için kullanılan, sırasıyla yedi ve altı pasodan oluşan iki değişik paso sırası tasarımının bir önceki çalışmada bahsedilen yazılımı kullanarak simülasyonlarını yapmışlardır. İki tasarım kesit alanındaki daralma, haddeleme yönündeki haddeleme hızın ve son ürünlerdeki etkin deformasyon dağılımı ve son üründe etkin deformasyon açısından karşılaştırılmış ve iki paso düzeni arasında altı pasolu tasarımın daha büyük daralmalar olmasına rağmen daha homojen dağılım gösterdiği tespit edilmiştir (Lee, Shin ve Shivpuri, 1992).

Lapovok ve Thomson, daha önce çok aşamalı dövme işlemlerinde ön şekil ve ara kalıp tasarımlarının optimizasyonunda kullanılmış olan bir yöntemi kesit haddelemede proses tasarımı için kullanmışlardır. Bu yöntemde varılmak istenen şekil parametreleri esas alınarak geriye doğru hesaplama ile ara pasoların ana şekil parametreleri belirlenmiş, daha sonra ileri doğru hesaplama ile detaylar belirlenmiştir. Bu çalışmada optimizasyon kriteri olarak eşdeğer deformasyonun kesit boyunca dağılımının düzgünlüğü ele alınmıştır ve kare-oval-kare paso sıralamasının en iyi sonucu verdiği belirlenmiştir. Yazarlar tarafından, bulunan sonuçların daha önce yayınlanmış deneysel gözlemlerle karşılaştırıldığında hesaplamaların doğrulandığı ifade edilmiştir (Lapovok ve Thomson, 1997).

Kim ve Im, yuvarlak ve kare çubuk üretiminde ara paso şekillerini belirlemek için bir bilgi tabanlı uzman sistem yazılımı geliştirmişlerdir. Bu çalışmada literatürden çıkartılmış kurallar uygulanmış ve önceki bahsedilen çalışmada olduğu gibi sonuçta elde edilecek şekilden geriye doğru hareket eden bir algoritma kullanılmıştır. Ara paso geometrisi olarak kutu, kare, baklava, oval ve yuvarlak belirlenmiştir. Bu çalışmada optimizasyon hedefi olarak tasarımda paso sayısının azaltılması seçilmiştir (Kim ve Im, 1999).

Kwon ve Im, endüstriyel uygulamalarda deneme yanılma olaylarını azaltmak amacı ile çubuk haddelemede, hadde pasosu ve profili tasarımında kullanılmak üzere bir bilgisayar destekli tasarım sistemi geliştirmişlerdir. Geliştirilen sistemde, optimum tasarım için karar verilmesinde kullanılacak değişik örnekleri temin etmek için etkileşimli bir metodoloji geliştirmişlerdir. Ek olarak lokal pasoların otomatik tasarımının elde edilmesi için bir algoritma önermişlerdir. Etkileşimli tasarım prosesinde, malzeme akışı, ayırma kuvvetleri, gerekli güç gibi mühendislik verileri güvenilir ampirik formüller kullanarak hesaplanıp kullanıcıya raporlanmaktadır. Sonuç olarak geliştirilen sistem bir kare çubuk proses tasarımında kullanılmış ve sistemin tasarım sürecinde zaman ve maliyeti düşürdüğü görülmüştür (Kwon ve Im, 2002).

Minutolo, Durante, Lambiase ve Langelle, inşaat demiri haddelenmesinde yuvarlak-düz oval ve yuvarlak- düz pasolar için en büyük yayılmanın deneysel değerlerini ve çubuk çaplarını analitik model ve MSC.Marc Autoforge ticari yazımı kullanılarak yapılan SEY analizi ile karşılaştırmışlardır (Minutolo ve diğerleri, 2006).

Tiwari, Oduguwa ve Roy, yaptıkları çalışmada haddeleme sistemini ardışık aşamaları arasında ardışık etkileşimin bulunduğu çok aşamalı işlem olarak ele almışlardır. Ardışık etkileşimde bir aşamanın çıktısı bir sonraki aşamanın girdisi olduğu için ilişkiler iki yönlüdür. Bu çalışmada haddeleme sisteminin optimizasyonu genetik algoritma tabanlı ve problemin ardışık etkileşim yapısına uygun bir yaklaşımla ele alınmıştır. Optimizasyonda merdane kuvvetleri minimize edilirken üretim miktarının maksimizasyonu hedeflenmiştir. Literatürde rapor edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında önerilen optimizasyon yöntemiyle elde edilen yakın optimal çözümlerin literatürdeki sonuçlardan daha iyi olduğu belirtilmiştir (Oduguwa, Tiwari ve Roy, 2006).

Huang, Xing, Abhary ve Spuzic, değişik boyutlarda yuvarlak çubuk üretiminde kullanılan hadde pasolarının tasarımını desteklemek amacıyla genetik algoritma (GA) tabanlı bir optimizasyon sistemi geliştirmişlerdir. Geliştirilen sistem ile paso sayısını düşürmek, endüstrideki deneme yanılma olaylarını azaltmak, bunların yanında çok pasolu çubuk haddeleme sistemlerinin çalışma aralığını genişletmek hedeflenmiştir. Bunun için geometrik modelleme ve grafik çizimler için parametrik denklemler oluşturularak paso tasarımı ve optimizasyonu sırasında parametrik dönüşümlerin yapılabilmesi sağlanmıştır. Çok pasolu haddeleme sistemlerine değişik profildeki pasoların seçilmesi için melez model temelli bir yöntem önerilmiştir. Ek olarak hadde pasolarının optimizasyonu için iyileştirilmiş genetik algoritma (IGA) kullanılmıştır. Çalışmanın bu amaçlarını gerçekleştirmek için MATLAB programlama dili kullanılmıştır. Karmaşıklığı ve yazılımın hesaplama yükünü azaltmak için sistemde bazı güvenilir ampirik formüller de kullanılmıştır. Önerilen yaklaşım bir çubuk haddeleme sistemine uygulanarak diğer araştırmacılar tarafından sunulan analitik sonuçlar, numerik analizler ve deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak sistemin güvenilir, etkin ve kullanımının daha kolay olduğu sonucuna varılmıştır (Huang ve diğerleri, 2011).

Huang, Xing, Abhary ve Spuzic (2012) oval kenar-oval pasoların optimum tasarımını desteklemek için geliştirilmiş bir strateji sunmuştur. Güç sarfiyatını minimize etmek, deneme yanılma sayısını azaltmak yanında tasarım etkinliğini ve esnekliğini arttırmak üzere bir sistem geliştirmişlerdir. Oval kenar-oval pasoların geometrik modellenmesi ve grafik

çizimi için bir seri denklem oluşturulmuş ve bu denklemler ile merdane paso tasarımı ve optimizasyonunun parametrik dönüşümleri yapılmıştır. Güç sarfiyatı hesaplaması için istatistiksel analiz ve veri uydurma kullanılarak yeni bir formül önerilmiştir. Bu formülün doğrulanması için elde edilen sonuçlar Smirnov'un tork formülü ile hesaplanmış olanlar ile karşılaştırılmıştır. Son olarak önerilen yaklaşım oval kenar-oval paso tasarımının optimizasyonuna uygulanmıştır. Simülasyon sonuçları ve literatürden elde edilen deneysel datalar ile karşılaştırıldığında önerilen metodun güç sarfiyatını azaltabileceği ve etkinliği ve esnekliği arttırabileceği görülmüştür (Huang ve diğerleri, 2012a).

Genetik algoritma kullanılan diğer bir çalışmada Huang, Xing, Abhary ve Spuzic, genel oval – yuvarlak paso tasarımını destekleyen bir bilgisayar destekli optimum tasarım sistemi önermişlerdir. Bu sistem ve verimi iyileştirmek, üretim hatalarını azaltmanın yanında aşınmayı düzenleyerek kullanışlı merdane ömrünü iyileştirmek için geliştirilmiş melez ve genetik algoritma tabanlı modeldir. Oval – yuvarlak pasoların geometrik modellemesi ve grafiksel çizimi yanında kesit alanının, temas alanının ve yuvarlak paso kesiti boyunca temas yay uzunluğunun hesaplanması için MATLAB programlama ortamında geliştirilmiş parametrik denklemler oluşturulmuştur. Bunun yanında bu denklemler, merdane profili ve oval yuvarlak paso tasarımı ve optimizasyonu matematik modelleri arasında parametrik dönüşümü sağlayabilmektedir. Bu çalışmada oval yuvarlak pasoların optimum tasarımı için genetik algoritma kullanılmıştır. Amaç fonksiyonları, haddeleme prosesi sırasında güç tüketiminin, ideal ölçüler ve tasarım ölçüleri arasındaki farklılığın, temas yayları arasındaki farklılıkların minimizasyonu için formüle edilmiştir. Karmaşıklığı ve sistemin hesaplama yükünü azaltmak için, temas alanının hesaplanması ve temas yay boyunun hesaplanması için bazı güvenilir ampirik formüller kullanılmıştır. Sonuç olarak önerilen yaklaşım oval yuvarlak paso tasarımına uygulanmıştır. Simülasyondan elde edilen sonuçların literatürden alınan deneysel sonuçlarla karşılaştırılmasıyla sistemin güvenilir, etkin ve kullanımının kolay olduğu doğrulanmıştır (Huang ve diğerleri, 2012b).

Lambiase, kare ve yuvarlak tel üretiminde paso sıralamasını otomatik olarak belirleyen ve tasarımını yapan bir uzman sistem ortaya koymuştur. Çalışmada mevcut güç ve tork miktarı, merdane boşluğu doldurma davranışları gibi sınırlamalar göz önünde bulundurularak paso sayısının düşürülmesi hedeflenmiştir. Kullanılan metodun birinci aşamasında istenen ürüne ulaşmayı sağlayan uygun paso sıralamasının seçiminde genetik algoritma kullanılmıştır. İkinci aşamada ise pasoların uygun tasarımlarını yapmak için paso optimize aracı kullanılmıştır. Bu çalışmada yapay sinir ağları doğrusal sonlu elemanlar modeli ile elde

edilen sonuçlar kullanılarak eğitilmiştir. Önerilen metodun paso sayısının düşürülmesi ve uygulanan metodun sağlamlığı açısından geçerliliği bazı endüstriyel vakalar üzerinde uygulanarak gösterilmiştir (Lambiase, 2013).

Sakhaei, Salimi ve Kadkhodaei, U profillerin sıcak haddelenmesi prosesinin üç boyutlu SEY modellemesini gerçekleştirip analiz etmişlerdir ve bu analizi temel alarak ve paso sayısını azaltmayı hedefleyerek yeni bir sıcak profil haddeleme prosesi tasarlamışlardır. Bahsedilen çalışmada kesit küçültme, ara haddeleme ve bitirme aşamalarından ve toplam 13 pasodan oluşan bir endüstriyel kesit haddeleme hattı modellenmiştir. Bu simülasyonlar, her pasoda elde edilen ürün geometrisi bir endüstri tesisinden alınan veriler ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Daha sonra belirli bir kesiti elde etmek için örnek bir hadde prosesi tasarımı yapılmıştır. Yeni kalibre tasarımının ana stratejisi yayılmayı etkileyen parametreler ile tutarlı en az sayıda paso kullanımınıdır. Yeni kalibre tasarımı sonlu elemanlar kodu kullanılarak tekrar simüle edilmiştir. Çıkış kesitinin geometrisi ve ölçüleri, ayırma kuvveti, merdane torkları ve güç tüketimi her aşama için hesaplanmıştır. Yeni önerilen metotla gerçekleştirilen ve geleneksel hadde pasosu tasarımlarının karşılaştırılması sonucunda önerilen metodu kullanmanın tasarım mühendislerine daha düşük işletme maliyeti olan karmaşık pasoları tasarlama imkânı sağladığı iddia edilmiştir (Sakhaei, Salimi ve Kadkhodaei, 2013).

Turczyn, Dziedzic ve Kuźmiński, (2014) yarma prosesindeki deformasyonların değerlendirilmesi için sonlu elemanlar metodu kullanılmıştır. Hesaplamalar termo mekanik deformasyon modeline göre yapılmıştır. Çalışma sırasında yarma bıçaklarının şekli ve genişliğinin değişik teknolojik parametrelere etkilerinin analizi yapılmıştır. Bu kapsamda yarma bıçağının görelî yüksekliğinin üç değişik değeri, bıçağın üç değişik şekli ve üç değişik genişliği analiz edilmiştir. Ek olarak Gleeble simülatörü kullanılarak iki yarma pasosunun fiziksel deformasyon modeli gerçekleştirilmiştir. Görelî olarak yüksek şekil değiştirme hızlarında çeliğin gerilme-deformasyon karakteristikleri elde edilmiştir. Hesaplamalar sonucunda yarma pasolarında metalin akış çizgileri belirlenmiştir. Gerilim ve deformasyon dağılımını ifade eden grafikler, merdane boşluğundaki olayların daha fazla bilgi doğrudan analize izin vermiştir. Elde edilen sonuçlar yarma pasosu tasarımlarını daha hassas yapılmasını ve yarma metodunun daha iyi kullanımına imkân sağlamıştır (Turczyn, Dziedzic ve Kuzminski, 2014).

Lambiase (2014) yaptığı çalışmada yarma pasosunda meydana gelen yanal yayılmayı sonlu elemanlar modeli kullanarak incelemiştir. Yarma yapılan iş parçasının geometrik özellikleri

ve yarma merdanesinin geometrik özelliklerinin ortaya çıkan yayılmaya etkisi üzerinde çalışılmış ve yanal yayılmanın en fazla basmaya maruz kalan alanın genişliğine bağlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu modelin sonuçları ise şerit ve iç bükey profil haddelemesi için geliştirilmiş iki analitik modelin uyarlanmasında ve kalibrasyonunda kullanılmıştır. Sonlu elemanlar modeli ile analitik modelin sonuçları karşılaştırıldığında iş parçasının son ölçülerinin hesaplanmasında ortaya çıkan en büyük hatanın %2'den az olduğu görülmüştür (Lambiase, 2014).

Çavdar ve diğerleri (2015) tarafından bir çalışmada inşaat demiri üretimi yapan beş değişik üretim tesisinin kaba haddelemede kullandıkları paso tasarımları Simufact.forming ticari yazılımı kullanılarak modellenmiş ve simülasyonları yapılmıştır. Simülasyon sonuçları kullanılarak her bir üretim prosesi için harcanan şekillendirme enerjisi ve işlem süresi belirlenmiştir. Çalışma sonucunda haddeleme sırasında kullanılan şekillendirme enerjisinin ve işlem süresinin paso tasarımıyla önemli ölçüde değişiklik gösterdiği tespit edilmiştir (Çavdar ve diğerleri, 2015).

Abhary, Kovacic, Lundberg, Narayanan ve Spuzic, bulanık mantık, regresyon analizi ve paso tasarım veri tabanından bilgi elde eden doğrusal olmayan optimizasyonu birleştiren bir melez algoritmanın gücünü arttırmak için insan-bilgisayar ara yüzü kullanmışlardır. Bu stratejiyi çelik üretiminde geniş kapsamlı olarak kullanılan yatay ve dikey simetrik başlangıç paso kalibrelerine uygulamışlardır (Abhary ve diğerleri, 2015).

Aksenov, Chumachenko, Logashina ve Kubina, analitik metotlar kullanarak, yuvarlak kesitli çubuk haddeleme için, birincisi oval yuvarlak, ikincisi düz merdanelerin ve yuvarlak pasoların kombinasyonu şeklinde olmak üzere iki paso sıralaması geliştirilmiş ve 2,5 boyutlu sonlu eleman simülasyonu kullanarak optimizasyonunu yapmışlardır. SEY simülasyonu sonuçları kullanılarak gerekli çubuk şeklinin elde edilmesi ve haddeleme kuvvetlerinin düzgün dağılımı için gerekli merdane boşlukları ayarlanmıştır. Bu çalışmada iki paso tasarımının yapılan karşılaştırmalar sonucunda merdane kuvvetleri ve torklarının dağılımı yanında sıcaklığın ve mikro yapının kesit boyunca dağılımı yönlerinden benzer olduğu tespit edilmiştir (Aksenov ve diğerleri, 2015).

Lee ve diğerleri üç boyutlu elektrik alan analizini (3B-EAA) profil haddelemede ara pasoların tasarımında kullanmayı önermişlerdir. Yazarlar, haddelenecek malzemenin başlangıç ve bitiş şekilleri arasındaki 3B-EAA ile belirlenen eş potansiyel çizgilerinden



bazılarını ara paso profilleri olarak seçmişlerdir. Seçilen merdane profillerinin etkinliği sonlu eleman simülasyonu kullanılarak son ürünün şekilsel doğruluğu, etkin deformasyon dağılımı ve merdane kuvvetleri doğrulanmıştır. Eksik veya aşırı doldurulmuş alanlar sonlu elemanlar simülasyonu sonuçlarından hesaplanmış, hatalı alanın telafisi başka bir eş potansiyel çizgi kullanılarak yapılmıştır. Seçilen merdane profillerinin etkinliği sonlu eleman simülasyonu kullanılarak son ürünün şekilsel doğruluğu, etkin deformasyon dağılımı ve merdane kuvvetleri dikkate alınarak değerlendirilmiş ve doğrulanmıştır. Önerilen metot ile belirlenen paso tasarımları kullanılarak kapı menteşesi şeklinde bir profilin laboratuvar ölçeğinde cam macunu ile deneysel üretimi yapılmış ve  $\pm 0,5$  mm aralığında ölçüsel hatalar tespit edilmiştir. Sonuç olarak önerilen metodun rastgele şekillerin hadde ile üretilmesinde merdane profillerinin tasarımında kullanılabileceği öne sürülmüştür (Lee ve diğerleri, 2015).

Park ve diğerleri, büyük ölçekli inşaat makinelerinde kullanılan L kesitli halka üretiminde kullanılan profil halka haddeleme prosesi geliştirmişlerdir. Dövme yolu ile ön şekil verilmiş çevrim süresini azaltmak için parça tek paso olarak tasarlanan halka haddeleme prosesi ile son şeklini almaktadır. İş parçasının ön şekli balık kuyruğu, doldurmama veya halkanın çarpılması gibi şekillendirme kusurları olmayan bir proses tasarımı için önemlidir. Şekillendirme hatalarını minimize etmeye yönelik bir optimizasyon için bir sonlu elemanlar analizi kullanılmıştır. Ön şekil belirlendikten sonra, mandrel ve eksenel merdanelerin ilerleme şartları gibi proses değişkenlerinin son ürün şekline etkisi ölçü tamlığını sağlamak amacı ile incelenmiştir. Bunun dışında sonlu elemanlar sonuçlarına göre düzenlenmiş deneyler gerçekleştirilmiş sonlu elemanlar analizi ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir (Park ve diğerleri, 2016).

Strycharska, Szota ve Mróz, 16 mm çapındaki nervürlü çubukların üç şeritli haddeleme işleminde dilme pasolarının dayanıklılığını artırmak amacıyla ticari bir sonlu elemanlar yöntemi yazılımı kullanarak değişik paso tasarımlarında bant şeklindeki değişimleri ve tasarlanan yeni yarma paso tasarımının doğruluğunu teyit etmek için sayısal modellemeler gerçekleştirmişlerdir. Modellemeler sonucunda haddelenen şerit üzerindeki yerel deformasyonları ve merdane yüzeylerindeki birim sürtünme kuvveti dağılımlarını belirlemişlerdir. Araştırma sonucunda, yeni yarma geçiş sisteminin kullanımının, köprü oluşum bölgelerinde daha küçük bir bant deformasyonuna neden olduğu ve bunun da kesme pasosunun bıçak bölümlerinin daha az aşınmasıyla sonuçlandığı belirtilmiştir. Dilme geçişlerinin artan dayanıklılığı, yeni geçiş sisteminde kullanılan yarma pasoları için daha

düşük bir birim sürtünme kuvveti iş değerinin ortaya çıkmasıyla da doğrulandığı ifade edilmiştir (Strycharska, Mróz ve Szota, 2017).

Nellippallil ve diğerleri, hedef yönelmeli, sıralı bir tersine tasarım metodu geliştirmişlerdir. Bu metotta son ürün için belirlenen gereklilikleri sağlamak için gereken parametreler son pasodan başlanarak geriye doğru belirlenmektedir. Pasolar arasındaki bilgi akışı oluşturulan uzlaşmalı karar destek problemi (compromise decision support problem – cDSP) yapısı ile sağlanmaktadır. Yapılan çalışmada cDSP yapısı oluşturulurken uzama, yayılma, merdane kuvvetleri gibi olguların belirlenmesinde iyi bilinen ampirik modeller, ovalliğin belirlenmesinde ise sonlu elemanlar simülasyonlarının sonuçları kullanılarak oluşturulmuş cevap yüzeyi yöntemi yardımıyla türetilen matematik model kullanılmıştır. Geliştirilen metodun etkinliği dört pasodan oluşan çok aşamalı haddeleme sistemi tasarlanarak ortaya konulmuştur. Çalışmada hedefler son pasoda ovalliğin ve hadde yükünün minimize edilmesi ile birim zamandaki üretim artırılması olarak belirlenmiştir. Bunun için ikinci ve dördüncü pasolar için cDSP oluşturulmuştur. Bütün pasolar son paso için oluşturulan cDSP'nin değişik senaryolar için uygulanması birbiriyle çakışan tasarım hedeflerine en uygun değişken kombinasyonlarının tespit edilerek diğer pasolara aktarılmasıyla tasarlanmıştır. İkinci pasosu için oluşturulan sDSP dördüncü pasodan ilk pasoya doğru bilgilerin uygun bir şekilde aktarılmasında kullanılmıştır (Nellippallil ve diğerleri, 2017).

Huang ve diğerleri, şekil haddeleme prosesinde paso tasarımlarını optimize etmek için melez modellemeye ve iyileştirilmiş genetik algoritmaya dayalı genel bir strateji oluşturmuşlardır. Çalışmada hadde pasosu tasarımlarının kalitesi ve verimliliği artırırken şekil haddelemede güç gereksinimini azaltmayı, bunların yanında tasarım sürecinde maliyetli deneme yanılma ve uzman bilgisi gereksiniminin ortadan kaldırılması hedeflenmiştir. Disiplinler arası bilgiye dayalı melez modelleme sayesinde izole tek disiplinli modellerin sınırlamalarının üstesinden geldiği ve optimum tasarımlara ulaşabilmek için de geleneksel genetik algoritmanın iyileştirildiği belirtilmiştir. Çalışmada deneysel verileri ve yayınlanmış güvenilir çözümleri optimizasyonlara entegre etmeyi hedefleyen, başlangıçta yanlış yönlendirilmiş modelleri düzgün bir modele aktaran bir parametre tahmin yöntemi önerilmiştir. Önerilen metodolojiyi uygulamak için Matlab platformuna dayalı bir araç geliştirilmiştir. Karşılaştırma çalışmaları sonucunda, optimizasyondan sonra toplam güç tüketiminin ve haddeleme torkunun azaldığını ve her pasoda iş yapan çapın arttığını belirtilmiştir. Fakat yayında verilen değerler incelendiğinde güç gereksiniminin sadece 1. pasoda (K3) azaldığı diğer iki pasonun birisinde arttığı diğerinde ise değişmediği görülmüştür. Orijinal çözümlerle karşılaştırılarak, optimal

çözümünden elde edilen son ürün boyutlarının istenen boyutlara daha yakın olduğu ek olarak, ara geçişlerin (K3 ve K2) kesit küçültme verimliliği iyileştiği raporlanmıştır. Bununla birlikte, son pasoda kesit küçültme verimliliğinin arttığı, bunun da haddelenmiş iş parçaları için üretim hassasiyetinin ve yüzey kalitesinin iyileştirilmesine fayda sağladığı belirtilmiştir (Huang ve diğerleri, 2019).

Çetinkaya, tez çalışmasında yapay sinir ağları kullanarak çubuk ve kangal haddelenmesinde verimlilik ve kalite artışı için bir algoritma geliştirmiştir. Çalışmada geliştirilen yapay sinir ağı 8 giriş ve 8 de çıkış parametresi içermektedir. İleri beslemeli geri yayılım mimarisi kullanılarak çıkış değerleri yapay sinir ağına ağırlık güncellemesi ile tahmin edilmeye çalışılmıştır. Geliştirilen yazılımın etkinliğini değerlendirmek için aynı veri setleri Matlab uygulaması ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca yapay sinir ağları ile elde edilen sonuçlar gerçek değerler ile karşılaştırılmış ve hata oranlarının kabul edilir seviyede olduğu belirtilmiştir (Çetinkaya, 2020).

Kalibre haddelenmede, işlem rotası, başlangıç ve bitiş geometrisini değiştirmeden ara pasolarda kalibre geometrisine göre değiştirilebilir. Lia ve diğerleri, işlem rotası varyasyonunun hasar gelişimi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Ayrıca ve kalibre profilinin geometrik özelliklerinin doldurma derecesi ve yük yolu üzerindeki etkisine dayalı olarak iki yuvarlak-oval-yuvarlak paso sırası temelli dört pasolu bir haddelenme işlemi optimize edilmiştir. Bunlara ek olarak hasar kriterleri (örneğin Oyane kriteri) artan hasar seviyesini tahmin etmek için uygulanmıştır. Sonuç olarak işlem rotası varyasyonu nedeniyle sürecin sonunda meydana gelen hasarda önemli farklar olduğu ve sonlu elemanlar simülasyonlarına göre iş parçasının simetrik ekseninin yakınında her zaman daha yüksek hasar meydana geldiğini belirtilmiştir (Li ve diğerleri, 2020).

Ganguly ve ark. çalışmalarında, I ve H kirişlerin sıcak haddelenmesinde prosesinde kesit düşürme aşamasında düşük karbonlu bir çeliğin şekillendirilmesi sonlu elemanlar analizi kullanılarak incelenmiştir. Döküm kiriş taslağı, hadde merdanesi profilleri ve sıcak haddelenme paso düzeni geometrisi, endüstriyel sıcak haddelenme işlemi sırasında kullanılanlar ile aynı şekilde modellenmiştir. Sonuçlar, I-kirişin flanşa, kesit düşürme haddelenmede ağıla göre daha fazla deformasyona uğradığını göstermiştir. Simülasyon sırasında kiriş flanşı boyunca küçük çöküntü veya dalgalanmaların geliştiği bulunmuştur. Ayrıca merdane boşluğunun kütle akışı ve kiriş taslak yüzey çökmeleri üzerindeki etkisinin parametrik bir çalışması yapılmıştır. Daha büyük bir merdane boşluğu için, yüzey

çöküntüsünün boyut olarak arttığı gözlenmiştir. Aksine, daha fazla kütle akışı nedeniyle çöküntünün daha küçük bir merdane boşluğu ile azaldığı bulunmuştur. Bu sonuçlar, endüstriyel olarak üretilen I-kiriş ile uyumlu olduğu belirtilmiştir. Bunların dışında kiriş taslak flanşı üzerinde önceden var olan bir yüzey kusurunun varlığının, çöküntünün nihai boyutu üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu çıkarımına varılmıştır (Ganguly ve diğerleri, 2021).

### **2.6.2. Sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile ilgili çalışmalar**

Sonlu elemanlar yöntemi farklı mühendislik problemlerinin çözümünde uzun yıllardan beri kullanılmaktadır ve sonlu elemanlar yönteminin haddeleme işlemlerinin modellenmesi ile ilgili olarak ta birçok çalışma bulunmaktadır. Bu kısımda bu çalışmaların görece güncel olanlarından bahsedilmiştir. Sonrasında ise tez çalışmalarında kullanılan simufact.forming yazılımı ile ilgili çalışmalar sunulmuştur.

Bagheripoor ve Bisadi, sıcak şerit haddeleme işleminde haddeleme kuvveti ve haddeleme torkunu tahmin etmek için yapay sinir ağlarını (YSA) kullanarak bir matematiksel model oluşturmuşlardır. Sinir ağının eğitimi ve doğrulaması için bir veri temeli elde etmek amacıyla, farklı proses değişken kümeleri için çok sayıda üç boyutlu sonlu eleman simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar modelini doğrulamak için deneysel veriler sonlu eleman tahminleriyle karşılaştırılmıştır. Giriş değişkenleri olarak, haddeleme hızı, kesit düşürme yüzdesi, şeridin başlangıç sıcaklığı ve temas alanındaki sürtünme katsayısı seçilmiştir. Model, temas alanındaki şerit sıcaklığı, ezme oranı, haddeleme hızı ve sürtünme katsayısı gibi önemli parametrelerin etkilerini dikkate alma yeteneğine sahiptir. YSA tahminlerinin, modelin farklı sıcak haddeleme koşullarında doğru silindir kuvveti ve tork tahmini için bir araç olarak kapasitesini gösteren simülasyon sonuçlarıyla son derece iyi bir uyum içinde olduğu belirtilmiştir (Bagheripoor ve Bisadi, 2013).

Na ve Lee, kalibre (veya oluk) haddeleme işleminde AISI 4140 çelik malzemede yüzey kusurlarının başlangıcını tahmin etmek için sonlu elemanlar yöntemiyle birleştirilmiş bir kesme kırılma modeli kullanan bir yaklaşım önermişlerdir. Çalışma sırasında kesme kırılma modelinde kullanılan malzemenin akış gerilimi davranışına göre kesme gerilmesi oranı-eşdeğer plastik deformasyon eğrisi elde edilmiştir. Kesme kırılması kriterini karşılayan hasarlı elemanların sayısının, gerçek malzemedeki bir yüzey kusurları zincirine, yani yüzey buruşmalarına eşdeğer olduğu görülmüştür. Bu çalışmada önerilen yaklaşım, bir endüstriyel

kaba haddeleme stantlarında uygulanmıştır. Çalışmalar sonucunda yüzey buruşmaları, sonlu elemanlar yöntemi ile birleştirilmiş kesme kırılma modelindeki bir durum değişkenini karşılayan hasarlı elemanların toplam sayısı hesaplanarak tahmin edilebileceği sonucuna varılmıştır. Endüstriyel uygulamadaki 2. stanttaki kare kalibre, haddeleme sırasında malzeme üzerinde daha düşük kesme gerilimi oranı sağlayacak şekilde yeniden tasarlandığında yüzey buruşukluklarının azaltılmasında büyük bir etkisi olduğu belirtilmiştir. Yeni tasarlanan kalibre kullanıldığında, sonlu elemanlar analizi toplam hasarlı eleman sayısının %21,0 oranında azaldığını göstermiştir. Saha testi sonuçları, toplam kusurlu ürün sayısının %36,0 azaldığı ve toplam yıllık (veya aylık) üretim hesaba katıldığında, kırışıklık oluşum hızındaki bu azalmanın, verimliliği büyük ölçüde artırdığı raporlanmıştır. Çalışma sonucunda önerilen yaklaşımın, malzeme üzerinde yüzey kusurlarının oluşma eğilimini tahmin etmek ve kalibre (veya oluk) haddeleme işlemindeki yüzey kusurlarını saha testlerine dayanmadan azaltmak için faydalı bir araç olabileceği ifade edilmiştir (Na ve Lee, 2013).

Pan ve diğerleri, açık dinamik sonlu elemanlar yöntemi ve modifiyeli güncellenen geometrik yöntemle 60 kg / m ağır ray için tüm haddeleme sürecinin üç boyutlu metal partikül akış simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada ağır ray haddeleme sırasında haddelenmiş stok kesiti boyunca tipik metal parçacıkların metal akış kuralları elde edilmiştir. Bunun yanında sonlu elemanlar modelini doğrulamak için dairesel deliklerden oluşan yapay yüzey çatlaklarına sahip sürekli döküm slab Wuhan Iron and Steel (Group) Company'nin gerçek üretim hattında haddelenmiştir. U71Mn ağır ray için kesitteki malzeme akışlarının sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplanan sonuçlarının, deneysel olanlarla iyi bir uyum içinde olduğu belirtilmiştir (Pan ve diğerleri, 2017).

Kurt, tez çalışmasında HEA 240 yapı profilinin kaba haddelemesi sonundaki gerçek üretim parametrelerini 3 boyutlu SEY analizi sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Buna ek olarak IPE 140 yapı profilinin kalibre tasarımı yapılmış ve haddeleme parametrelerinin analitik hesap ve 3B SEY analizi ile elde edilen sonuçları karşılaştırılmıştır. HEA 240 haddelenmesi sırasında ilk 3 pasonun gerçek proses ve modelleme ile elde edilen şekilleri karşılaştırıldığında ölçüler arasındaki benzerliğin %95 ile %99,1 arasında olduğu görülmüştür. Aynı karşılaştırma IPE 140 için yapıldığında benzerlik oranları %95 ile %100 arasında bulunmuştur. IPE 240 üretiminin haddeleme kuvvetleri yönünden analizi yapıldığında gerçek ölçümler ile simülasyon sonuçları arasında %76,9 ile %89,7 benzerlik tespit edilmiştir. Analitik hesaplamalar ile simülasyon sonuçları karşılaştırıldığında bir paso

hariç tutulursa %80,4 ile %96,9 arasında benzerlik bulunmuştur. Hariç tutulan pasoda ise %50 bir fark tespit edilmiştir (Kurt, 2019).

Nioi ve diğerleri, çalışmalarında tek geçişli sıcak haddeleme işlemine tabi tutulan yüksek silikonlu elektrik çeliğindeki yüzey kusurlarının gelişimini simüle etmek için bir sonlu eleman modeli geliştirilmiştir. Yüzey kusurları, çeşitli en boy oranına sahip ön tanımlı boşluklar olarak modellenmiş ve bu boşlukların yakınındaki büyük yerel deformasyon gradyanlarını yakalamak için çok ölçekli bir yaklaşım kullanılmıştır. ABAQUS / standart sonlu eleman paketindeki Sellars-Tegart modeline dayalı olarak farklı deformasyon hızlarında ve sıcaklıklarda malzeme yapıcı davranışını tanımlamak için kullanıcı tanımlı bir alt yordam geliştirilmiştir. Modelleme sonuçları, ölçülen haddeleme kuvvetleri ve boşlukların plastik deformasyonu açısından laboratuvar ölçekli sıcak haddeleme deneyleri ile doğrulanmıştır. Bu çalışmadan ortaya çıkan en önemli bulgu olarak, kusurların yan duvarlarının burkulması ve bunun sonucunda gözlenen çatlak oluşumu olgusu olduğu belirtilmiştir. Bu deformasyon mekanizmalarının, haddeleme sırasında yüzey kusuru oluşumunun ana nedeni olduğu ve çeşitli en-boy oranlarına ve uygulanan kesit düşürmeye bağlı olduğu tespit edilmiştir (Nioi ve diğerleri, 2019).

Kalantarı, tez çalışmasında inşaat demiri üretiminde kullanılan sıcak haddeleme merdane kalibrelerine uygulanan kuvvetlerin deneysel formüller ve geleneksel teoriler kullanılarak ve SEY yöntemi simülasyonları ile hesaplanan değerlerinin karşılaştırmasını yapmıştır. Çalışmada her paso ve stant için kalibreye uygulanan kuvvetler Geligi ve Oravan-Pasque yöntemleri ile hesaplanmıştır. Daha sonra prosesin sonlu elemanlar simülasyonu ticari bir yazılım kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemlerle elde edilen sonuçlar üretim hattında yapılan ölçümlerle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda üretim hattında ölçülen değerlerle simülasyon sonuçları arasındaki farkın %5'ten az olduğu belirtilmiştir. Bunun dışında hata payı ortalamalarının Geligi yönteminde %21, Oravan-Pascoe yönteminde ise %98 olduğu tespit edilmiştir (Kalantarı, 2020).

Imran ve diğerleri, dört pasolu bir kalibre haddeleme prosesinde dinamik yeniden kristalizasyon (DRX) nedeniyle malzeme yumuşamasından dolayı meydana gelen dahili hasarları tahmin etmek için sonlu elemanlar yöntemine Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN) modelini de dahil ederek simülasyonlar gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada 60 mm çapındaki 16MnCrS5 çelik çubukların 40 mm çapa kadar haddelendiği yuvarlak-oval-yuvarlak haddeleme dizisi ile 4 pasolu bir kalibre haddeleme işlemi gerçekleştirilmiştir.

Çubuklar hasar gelişimi için analiz edilmiş ve hasar gelişimi, genişletilmiş bir GTN modeli kullanılarak simüle edilmiştir. Her pasodan sonra 90 ° döndürülen iş parçasının sonlu eleman sonuçları, maksimum hasarın paso 1'den sonra görüldüğünü ve paso 4'ten sonra minimum hasar miktarına ulaştığını görülmüştür. Her pasodan sonra hasarın azalmasının nedeni olarak, negatif Lode parametresinden dolayı boşluk çekirdeklenme eğiliminin, boşluk kapanma davranışına dönüşmesi olarak yorumlanmıştır. Artan DRX nedeniyle, malzeme sonraki geçişlerde yumuşadığı ve bu da boşluk kapanmasını hızlandırdığı belirtilmiştir. Hasarın süreç modellenmesinin, hasarı azaltmak ve ürün performansını artırmak için kalibre geometrilerini, pasolar arası süreleri ve yuvarlanma sıcaklıklarını optimize etmeye yardımcı olabileceği ifade edilmiştir (Imran ve diğerleri, 2020).

Milenin ve ark. perlitik ve beynitik rayların üretim teknolojisi için tasarım sistemi oluşturmuşlardır. Sistem sıcak haddeleme sırasında meydana gelen termal- mekanik olgular ve mikro yapı gelişiminin modellenmesi için SEY modülü ile birlikte soğuma sırasında meydana gelen faz dönüşümleri için modül içermektedir. Model parametreleri, dilatometrik testler temellidir. Modellerin doğrulanması için Gleeble testlerini de içeren fiziksel simülasyonlar kullanılmıştır. Ayrıca perlitik çelikler için ray kafasının sonradan polimer çözültisine daldırılması prosesinin de sayısal olarak simülasyonu yapılmıştır (Milenin ve diğerleri, 2020).

Hwang, sıcak haddeleme sırasında bir çubuğun ve bir plakanın termal davranışını çevrimdışı sıcak haddeleme simülatörü ve sayısal simülasyon kullanarak incelemiştir. Çalışma sırasında sıcak haddeleme sırasında çubuk ve levhanın sıcaklık dağılımlarının birbirinden çok farklı olduğu belirlenmiştir. Sıcaklığın alana göre değişimi çubukta levhaninkinden çok daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Çubuğun merdane ile sıkı temas ettiği yüzeyde ölçülen sıcaklık 600 ° C'den düşükken, levhanınki yaklaşık 800 ° C'dir. Çevresel yön boyunca çubuğun etkin gerilimindeki daha yüksek varyasyonun, çubuk haddelemede sıcaklığın alana göre değişiminin düz levha haddelemeye göre daha fazla olabileceği ifade edilmiştir (Hwang, 2020).

### **2.6.3. Simufact.forming yazılımı ile ilgili çalışmalar**

Cao, Hua ve Qian, çelik bilyelerin soğuk helisel haddelemede şekillendirme koşullarını açıklamak için Simufact.forming yazılımı ortamında üç boyutlu elastik-plastik bir sonlu elemanlar modeli oluşturmuşlardır. Lemaitre'nin göreceli hasar modeline dayalı olarak

şekillendirme süreci boyunca deformasyon, gerilme ve hasar oluşma süreci, ilerlemesi incelenmiştir. İncelemeler sonucunda plastik deformasyon dağılımı dış katmanda yüksek deformasyonların içerideki düşük deformasyonlu bölge etrafında bir kabuk gibi dağılım oluşturduğu bu sebeple radyal yönde homojen olmayan bir yapı olduğu görülmüştür. Ayrıca proses sırasında aksenal uzama, radikal sıkıştırma ve enine genişleyen deformasyon davranışları görüldüğü belirtilmiştir. Bunun dışında helisel haddeleme sırasında oluşan iç kusurların sebebinin, çok boyutlu çekme gerilmeleri, yüksek seviyeli enine çekme gerilmeleri, ve enine kesitte dairesel değişen kayma gerilmeleri nedeniyle merkez bölgesinde oluşan büyük negatif hidrostatik basınçlar olduğu belirtilmiştir (Cao, Hua, ve Qian, 2015).

Bauer ve diğerleri düz bir sacın U/O bükme işlemini ve tam otomatik robotik gaz metal ark kaynağını (GMAW) zincirleme olarak simufact.forming ve Simufact.welding yazılımı kullanarak modellemişlerdir. Çalışmada DC04 malzemeden yapılmış 300 mm boyunda, 20 mm dış çapta ve 1,5 mm kalınlıkta bir tüp üretimi simüle edilmiştir. Parçanın bükme prosesinin simülasyonu sonucundaki malzeme ve mekanik özellikler olduğu gibi kaynak modellenmesine de aktarılmıştır. Aynı işlemler deneysel olarak da gerçekleştirilerek kaynak dikişi boyutu, çarpılmalar ve artık gerilmeler karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda kaynak dikişi boyutu ve artık gerilme için %12'nin altında; çarpılmada ise 0,35 mm 'den az hata aralıkları tespit edilmiştir. Borunun üzerindeki geometrik ölçümlerde borunun kaynak işleminden önce ve sonrasında kaynaklanabilecek küçük sapmalar tespit edilmiş olmasına rağmen geometrik değişimi eğimi ve şekli benzer olduğu gözlemlenmiştir. Çalışma sonucunda zincirleme proses simülasyonunun deneysel çalışmaları azaltmak için ve gerçek işlem ayarlarının ve parametre değişimlerinin sonuçlarını görmek için kullanılacağı sonucuna varılmıştır (Bauer ve diğerleri, 2019)

Gontarz ve diğerleri, helisel haddelemede şekillendirme bölgesinin optimizasyonu gerçekleştirmek için SEY ile farklı uzunlukta helisel pasolara sahip 6 değişik hadde seçeneği modellemişlerdir. Simufact.forming yazılımı ile gerçekleştirilen simülasyonlara dayanarak etkin gerilim, hasar kriteri ve sıcaklık dağılımları ile yükler ve torklardaki değişimler analiz edilmiştir. Çalışma sonucunda helisel haddelemede kararlılığın ve ürün geometrisindeki doğruluğun önemli ölçüde kalıp geometrisine bağlı olduğu tespit edilmiştir. Şekillendirme bölgesinin uzun olmasının üretilen bilyelerin doğruluğunu ve kalıp çalışması üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu bulunmuştur. Bununla birlikte şekillendirme bölgesinin aşırı



uzun olmasının maliyet bakımından uygun olmadığı sonucuna ulaşılmıştır (Gontarz ve diğerleri, 2019).

Pater, 3 ve 4 merdaneli CNC çapraz haddeleme işleminin karşılaştırmalı analizini gerçekleştirmiştir. Çalışmada analizler Simufact.forming yazılımı ile yapılmıştır. Dolu ve içi boş demiryolu akslarının şekillendirmeleri sırasında iş parçaları üzerindeki etkin deformasyon, sıcaklık ve hasar kriteri belirlenmiş ve takımlar üzerindeki yükler ve torklar hesaplanmıştır. Çalışma sırasında tespit edilen deneysel ve numerik yük ve tork sonuçlarının nicelik ve nitelik açısından yüksek derecede uyumlu olduğu belirtilmiştir. Yazar CNC haddelemenin yüksek verime ve esnekliğe sahip olduğunu ve bu işlemde ortaya çıkan yük ve torkların görece olarak düşük olduğunu belirtmiştir. 4 merdaneli haddelemenin 3 merdaneli olana göre daha belirgin uzama gerçekleştirdiği sonuç olarak katı dolu akslarda daha düşük hatalara ve daha düşük et kalınlıklarına yol açmaktadır. Yine 4 merdaneli haddelemede 3 merdaneliye göre yaklaşık % 20-25 oranında daha az enerji tüketildiği ve merdane yüklerinin de % 20 ile 40 oranında daha düşük olduğu görülmüştür (Pater, 2020).

Kubit ve Trzepiecinski tekrar doldurulmalı sürtünme karıştırma kaynağı (RFSSW) işleminin fiziğini anlamak için Simufact.forming yazılımı ile sayısal modellemesini yapmışlardır. Bu amaçla Alclad-T6 alüminyum alaşımli levhalar arasındaki RFSSW bağlantılarının üç boyutlu tam bağlantılı modelleri oluşturulmuştur. Çalışmada simülasyon sonuçları ile deneysel işlemler karşılaştırıldığında malzeme akışlarının uyumlu olduğu raporlanmıştır. Kaynak bölgesinde sıcaklığın dalma sırasında hızla arttığı, kaynak kenarında bu hızın 250° C/s'e çıktığı ve deneysel sonuçlarla numerik sonuçların uyduğu tespit edilmiştir. En yüksek sıcaklığın pin ucunun gömleğin iç kenarıyla buluştuğu nokta olduğu, gömleğin sıcaklığının işlem süresinin %90'ında 512° C ye ulaştığı ve kaplamanın termal izolasyon oluşturduğu ve sıcaklığın homojen dağılmasına engel olduğu bildirilmiştir (Kubit ve Trzepiecinski, 2020).

Hönsch ve diğerleri kendiliğinden delmeli perçin bağlantılarını önceden belirlenmiş vasıflara göre değerlendirmek için tahribatlı muayene prosedürlerinin 3B SEY simülasyonlarını gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada üç değişik kendinden delmeli perçin bağlantısının yük kapasiteleri deneysel olarak simufact.forming yazılımı kullanılarak sayısal olarak araştırılmıştır. Modellemelerde çelik perçinin yer değiştirme hızına bağlılığı, alüminyum malzemenin katodik daldırma kaplama işlemi sırasındaki ısıl tavlama ve hem perçin hem de test ekipmanının gerçek katılımları dikkate alınmıştır. Beş değişik yük durumu

için (perçin eksenine 0, 30, 45, 60 ve 90 açılarda uygulanan germe kuvvetleri) için kaldırılabilen maksimum kuvvetler tespit edilmiştir. Her yük durumu için maksimum taşınabilen yük fiziksel deneylere göre % 10 hata payı içerisinde tahmin edilmiştir (Hönsch ve diğerleri, 2020).

Vogel ve Merklein karmaşık parçaların şekillendirilmesinde kalıpların uygun bir şekilde doldurulabilmesi için ön şekillendirilmiş parça tasarımı üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmada iş parçasına ön şeklin verilmesi için orbital forming prosesi kullanılmıştır. Bunun için prosesin sayısal modeli Simufact.forming yazılımı kullanılarak geliştirilmiştir. Modellemelerde ilk kalınlığı 2 mm, çapı 50 mm olan DC04 malzemeden yapılmış ön parçalar kullanılmıştır. Proses sırasında meydana gelen radyal ve teğet yöndeki malzeme akışı analiz edilmiştir (Vogel ve Merklein, 2021).

Bartnicki, Xia ve Shu içi boş parçaların CNC çapraz haddeleme prosesiyle üretilmesinde enine kesit küçülmesinin ve dönüş başına ilerleme hızının metal akış mekanizmaları üzerindeki etkisini Simufact.forming ile yapılan sonlu elemanlar modellemesi kullanarak incelemiştir. Çalışmada parka tutucunun hızı dönüş hızına göre arttırıldığında çap ölçüsündeki boyutsal sapmaların arttığı bildirilmiştir. Benzer şekilde haddelenmiş ürünün uzamasının da arttığı görülmüştür. Fakat et kalınlığındaki artış nispeten düşük gerçekleşmiştir. Şekillendirme hızı azaldığında şekillendirilen alandaki malzemenin iş parçası merkezine doğru akmaya başladığı ve bunun et kalınlığında 1.5 kata artış sağladığı görülmüştür. Belli bir sınıra kadar küçük ilerleme adımlarının boyutsal sapmaları önemli ölçüde azalttığı belirtilmiştir. Fakat belirli bir limitin aşılmasından sonra şekilsel sapmalarda keskin bir artışın gerçekleştiği ifade edilmiştir (Bartnicki, Xia ve Shu, 2021).

#### **2.6.4. Cevap yüzey yöntemi ile ilgili çalışmalar**

Cevap yüzey yöntemi temel bilimler, tıp, mühendislik gibi oldukça geniş bir alanda kullanımını olan istatistiksel bir yöntemdir (Anfar ve diğerleri, 2020; Favre ve diğerleri, 2020; Pinto ve diğerleri, 2021; Simsek ve Uslu, 2020). Bu yöntem özellikle çok sayıda bağımsız faktörün bu faktörlere bağlı olarak değişen bağımlı faktörlerin etkisinin tespiti için kullanılmaktadır. Bu kısımda cevap yüzey yönteminin incelenen bağımsız ve bağımlı parametrelerin ilişkilerinin incelendiği talaşlı ve talaşsız imalat yöntemleri ile ilgili güncel yayınlar sunulmuştur.

Sahoo, Rout ve Das, AISI 1040 çeliğinin kaplamalı karbür uç kullanılarak işlenmesinde yüzey pürüzlülüğünün kesme derinliği, ilerleme ve kesme hızına göre tahmini için cevap yüzey yöntemi (CYY) ve yapay sinir ağları kullanarak modeller geliştirmişlerdir. Oluşturulan CYY modelinin belirleme katsayısı  $R^2=0,99$  olarak bulunmuştur. CYY modellerinde hata yüzdesi -2,63 ile 2,47 arasında hesaplanırken Yapay sinir ağı modelinde hata % -1,27 ile %0,02 arasında tespit edilmiştir. Çalışmada ek olarak üç boyutlu yüzey grafikleri kullanılarak optimum kesme parametreleri de tespit edilmiştir (Sahoo, Rout ve Das, 2015).

Tebassi ve diğerleri, 35 HRC sertliğe sahip olan Inconel 718 süper alaşım SiC partikülleri ile güçlendirilmiş seramik takım ile çeşitli kesme parametrelerinde (kesme derinliği, ilerleme hızı, kesme hız ve burun yarıçapı) tormalayarak yüzey pürüzlülüğü ve üretkenliği için matematiksel modeller geliştirmişlerdir. Çalışmada CCD kullanılarak üç kez tekrarlanan 16 temel deney setini içeren benimsenmiş ve istatistiksel varyans analizi (ANOVA) ile oluşturulan cevap yüzey grafikleri üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, yüzey pürüzlülüğü kriteri  $R_a$ 'nın esas olarak kesme hızından, radyüs ucundan ve ilerleme hızından etkilendiğini ve kesme derinliğinin üretkenlik üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu bulunmuştur. Son olarak, seri endüstriyel üretim için optimize edilmiş kesme koşulları bir aralık önerilmiştir (Tebassi ve diğerleri, 2017).

Yu ve diğerleri, çok yönlü şekillendirme kalıbı parametrelerinin optimizasyonu için yaptıkları çalışmalarında çıkıntılı bir motor muhafazasının imalatını ele almışlardır. Şekillendirilmiş parçanın çapak kalitesi ve şekillendirme yükü bağımlı değişkenler olarak geçmeli kalıp yüzey parametreleri (kalıp taban açısı, dış uzunluğu ve çıkıntı ağız radyüsü) ise bağımsız değişkenler olarak seçilerek cevap yüzey yöntemiyle ikinci dereceden bir matematiksel model oluşturulmuştur (Yu ve diğerleri, 2017).

Parida ve Maity, çalışmalarında Monel 400 malzemenin sıcak tormalanmasında dört işleme faktörünün (kesme hızı, ilerleme hızı, kesme derinliği ve iş parçası sıcaklığı) kesici takımın yan yüzeyindeki aşınma (flank wear) ve yüzey pürüzlülüğü üzerine etkilerini incelemişlerdir. Deneyler yüzey merkezli tasarıma dayalı olarak gerçekleştirilmiş ve bireysel parametrenin yanıtlar üzerindeki etkisi ANOVA analizi kullanılarak değerlendirilmiştir. Yan yüzey aşınması ve yüzey pürüzlülüğünün matematiksel modellemesini gerçekleştirmek için cevap yüzey yöntemi (CYY) kullanılmıştır. Tahmin edilen ve deneysel sonuçlar

arasında sırasıyla maksimum % 13 ve % 7 yanak aşınması ve yüzey pürüzlülüğü hatası gözlenmiştir (Kumar Parida ve Maity, 2019).

Singh ve diğerleri, yaptıkları bir çalışmada, B<sub>4</sub>C parçacıkları ile güçlendirilmiş Al-5083 alaşımının (Al5083 / B<sub>4</sub>C) işleme performansını tahmin etmek için sağlam ve kararlı öngörülebilir bir yapay zekâ hesaplama modeli geliştirmeyi hedeflemişlerdir. Çalışmanın deneysel bölümünde 5 farklı Al5083 / B<sub>4</sub>C numunesi, karıştırma döküm yöntemi ile ex situ tekniği ile hazırlanmıştır. Deney tasarımları Taguchi yöntemi ile yapılmıştır. Çalışmanın hesaplama kısmı üç farklı aşamadan oluşuyordu. İlk aşama, performans ölçümlerinin matematiksel modellemesini ve modellerin istatistiksel incelemesini içerir. İkinci aşamada, en iyi parça işleme parametreleri bulanık eğer .... ise kurallarına göre seçilmiştir. Makalenin son aşaması, optimum işleme parametrelerini elde etmek için yapılan takas (trade off) analizidir (Singh ve diğerleri, 2020).

Kadiyan ve diğerleri, çalışmalarında Al-6063 malzemeden yapılmış silindirik numuneleri eşit kanallı açısız presleme (ECAP) tekniği ile kalıp kanal açısı, paso sayısı ve ara işlem sıcaklığı parametrelerinde değişiklikler yaparak işlemişlerdir. Tane boyutlarındaki incelmeye, şekil değiştirme desenleri, çökeltilerin oluşumu gibi hususlar optik mikroskop, elektron geri saçılım kırınımı ve taramalı elektron mikroskobu teknikleriyle gözlemlenmiştir. Çalışmada deneysel veriler ile mikro yapısal parametrelerin (ortalama tane boyutu) ve, yüzey özellikleri (Vickers sertliği) arasındaki ampirik ilişkileri modellemek için CYY kullanılmıştır (Kadiyan ve diğerleri, 2021).

Moghaddas, alüminyum 6061'in titreşim ile destekli delme (UAD) sürecini karakterize etmek için yanıt yüzey metodolojisini (CYY) özel bir çözünürlüklü V tasarımı ile birlikte kullanılmıştır. Bu çalışmada, iş mili hızı, ilerleme hızı ve itme kuvvetinin genliği değişkenlerinin tork ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini değerlendirmek için varyans analizi (ANOVA) yapılmış ve cevap yüzeyleri oluşturulmuştur. Daha sonra bu parametreleri minimize eden delme parametrelerinin optimum değerleri tespit edilmiştir. Son olarak matematik modellerin doğrulanması için örneklem dışı testler kullanılmıştır (Moghaddas, 2021).

### 2.6.5. İstenirlik fonksiyonu ile ilgili çalışmalar

İstenirlik fonksiyonu birbiri ile uyumlu olmayan birden çok değişkenin optimum değerlerini bulmada oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kısımda talaşlı ve talaşsız imalat yöntemlerinin optimizasyonunda istenirlik fonksiyonun kullanıldığı çalışmalar sunulmuştur.

Kim ve Lin, istenirlik fonksiyonu değerlendirme sürecini basitleştirmek için üstel bir fonksiyonel istenirlik formu önermişlerdir. Önerilen yaklaşım, tahmin edilen yanıt modellerinin şekli veya derecesi ile ilgili herhangi bir varsayım gerektirmemektedir ve yanıt değişkenleri arasındaki potansiyel bağımlılıklardan etkilenmemektedir. Önerilen yaklaşım birisi literatürden diğerleri yazarların çelik endüstrisinden almış oldukları iki örnek kullanılarak doğrulanmıştır (Kim ve Lin, 2000).

Sahoo ve Mistra, TiN kaplamalı karbür kesici uç kullanılarak EN 24 çeliğinin (50 HRC) sert tornalanması sırasında kesme sıcaklığının optimizasyonunu CYY ve istenirlik yaklaşımı kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada deneysel veriler ile birlikte yanıt yüzey metodolojisi kullanılarak tahmin modelini geliştirmişler ve istenirlik yaklaşımı kullanarak proses parametresinin optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. İlerleme ve kesme hızı yükseltildiğinde kesme sıcaklığında sert bir artış görüldüğü, kesme derinliğinin kesme sıcaklığı üzerindeki etkisinin kesme hızı ve ilerleme kadar önemli olmadığı rapor edilmiştir. Çalışmada proses parametresi için en uygun kombinasyonun 0,2 mm'de kesme derinliği, 0,1597 mm / dev ilerleme ve 70 m / dk kesme hızı olduğu ve bu kombinasyona göre, tahmin edilen değeri 302,95 °C olarak belirlenmiştir (Sahoo ve Mishra, 2014).

Gopalakannan, ve Senthilvelan, çalışmalarında sıvı metalürji yoluyla SiC parçacıkları ile güçlendirilmiş bir alüminyum metal matris kompozitin elektrik deşarjı işleme (EDM) ile bakır elektrod kullanılarak işlenmesinin optimizasyonunu yapmışlardır. Yanıt yüzeyini oluşturmak için işlem parametreleri olarak darbe akımı, boşluk voltajı, darbe açma süresi ve darbe kapatma süresi merkezi birleşik deney tasarımı yapılmıştır. Malzeme kaldırma oranı (MRR), elektrot aşınma oranı (EWR) ve yüzey pürüzlülüğü (SR) gibi işleme özelliklerini tahmin etmek için yanıt yüzeyi yöntemi uygulanarak matematiksel bir model formüle edilmiştir. İstenirlik fonksiyonu kullanılarak, MRR'yi en üst düzeye çıkarmak, EWR ve SR'yi en aza indirmek için gereken gerilim, darbe akımı, darbe açık süresi ve darbe kapalı süresi belirlenmiştir (Gopalakannan ve Senthilvelan, 2014).

Chabbi ve diğeri, çalışmalarında polioksimetilen polimer POM C malzemenin sementit karbür kesme aleti kullanılarak tornalanması işleminde minimum yüzey pürüzlülüğünün yanı sıra kesme kuvveti, kesme gücü ve maksimum üretkenliği sağlayacak optimum kesme koşullarının belirlenmesinde istenirlik fonksiyonunu kullanmışlardır. Farklı işleme parametrelerinin teknolojik parametreler üzerindeki etkisi araştırmak için cevap yüzey yönteminden yararlanılmıştır. Optimizasyon, yanıt yüzey metodolojisi olan CYY'ye (arzu edilirlik fonksiyonu yaklaşımı) dayanmaktadır. Ayrıca, varyans analizinden (ANOVA), incelenen farklı teknolojik parametreler üzerindeki kesme parametrelerinin istatistiksel önemini belirlemek için yararlanılmıştır. Sonuçlar, yüzey pürüzlülüğünün ilerleme hızından büyük bir katkı ile güçlü bir şekilde etkilendiğini, ardından kesme derinliğinin geldiğini, fakat kesme hızının hiçbir etkisi olmadığını ortaya koymuştur. Kesme kuvveti ile ilgili olarak, kesme derinliği ve ilerleme hızının en önemli terimler olduğu bulunmuştur (Chabbi ve diğeri, 2017).

Fnides ve diğeri, çalışmalarında yanıt yüzey metodolojisi (CYY) kullanarak AISI 1040 çeliğini GC1030 kaplamalı karbür kesici uçlarla kuru yüzey frezelemede işlerken kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliği gibi faktörlerin yüzey pürüzlülüğü ve malzeme çıkarma oranı (MRR) üzerindeki etkisini değerlendirmişlerdir. Bu amaçla, matematiksel modeller geliştirmek ve bu teknolojik parametrelerin faktörlerinden anlamlı olanları belirlemek için, istatistiksel üç faktörlü ve üç seviyeli faktöriyel deney tasarımlarına dayanan, istatistiksel varyans analizi (ANOVA) ile tamamlanan (L27) bir dizi işleme deneyi gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen matematiksel modelleri kullanarak  $R_a$ ,  $R_y$  ve  $R_z$ 'yi en aza indirmek ve MRR'yi en üst düzeye çıkarmak için istenirlik yaklaşımı ile çok amaçlı optimizasyon prosedürü de uygulamışlardır (Fnides ve diğeri, 2017).

Başar, Kahraman ve Önder, çalışmalarında 5083 alüminyum alaşımının alın frezelemede ilerleme, fener mili hızı ve talaş derinliği gibi kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisini CYY ile incelemişlerdir. Daha sonra istenirlik fonksiyonu kullanılarak yüzey pürüzlülüğünü minimize etmek için optimizasyon yapılmıştır (Başar, Kahraman ve Önder, 2019).

Świercz, Oniszczyk-Świercz ve Chmielewski, çalışmalarında 55NiCrMoV7 takım çeliğinin elektro erozyon (EDM) ile işlenmesi sırasında parametrelerinin etkisinin analitik ve deneysel bir incelemesini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada deşarj akımı, darbe süresi ve zaman aralığının yüzey pürüzlülüğü, beyaz tabakanın kalınlığı ve malzeme kaldırma oranı üzerine

etkisi ile ilgili ampirik modeller oluşturmak için yanıt yüzey yöntemi (CYY) kullanılmıştır. Hesaplamalar sonucunda deşarj akımının yüzey pürüzlülüğüne, beyaz tabaka kalınlığı ve malzeme kaldırma oranı üzerinde en fazla etkiye (%50'nin üzerinde) sahip olduğu ve ardından deşarj süresinin geldiği görülmüştür. Finiş işleme, yarı finiş işleme ve kaba işleme için çoklu yanıt optimizasyonları istenirlik fonksiyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan doğrulama testi, tahmin edilen ve deneylerden elde edilen değerler arasındaki maksimum hataların % 6'yı geçmediğini göstermiştir (Świercz, Oniszcuk-Świercz ve Chmielewski, 2019).

Liman ve Abou-El-Hossein, karmaşık şekiller ve nano metrik yüksek optik yüzeyler üretme kabiliyeti nedeniyle gelişmiş kontak lenslerin imalatında kullanılan son zamanlarda geliştirilen ultra yüksek hassasiyetli işleme tekniklerinden birisi olan tek noktalı elmas tornalama (SPDT) işleminde kesme koşulları üzerinde durmuşlardır. Çalışmalarında mono kristalin elmas kesme aleti kullanılarak polimetil metakrilat (PMMA) kontak lens polimerinin SPDT'sinde CYY regresyon analizi kullanılarak yüzey pürüzlülüğü ( $R_a$ ), elektrostatik yük (ESC) ve malzeme kaldırma oranı (MRR) için matematiksel bir model geliştirilmişlerdir. Ayrıca istenirlik fonksiyonu kullanılarak minimum yüzey pürüzlülüğü, elektrostatik yük ve maksimum malzeme kaldırma oranı için kesme koşullarının optimizasyonu yapılmıştır (Liman ve Abou-El-Hossein, 2019).

Mesalamy ve Youssef, alüminyum alaşımlarının aşındırıcı su jeti (AWJ) ile işlenmesinde farklı kesme hızları ve yönleri ile tek, çift ve çoklu kesme geçişlerine dayanan bir strateji geliştirmişlerdir. Çalışmada CYY kullanarak kesme geçişi sayısının, hareket hızı stratejisinin ve kesme yönü stratejisinin kesme kalitesine etkisi araştırılmış ve bunun için belirli bir yüzey pürüzlülüğünü elde etmek için yeterli olan minimum geçiş sayısını ve uygun kesme stratejisini tahmin edebilecek bir matematiksel model oluşturulmuştur. Son olarak model, farklı kesim stratejilerine karşılık gelen en iyi yüzey kalitesini elde etmek için istenirlik fonksiyonu kullanılarak optimize edilmiştir (Mesalamy ve Youssef, 2020).

Prabhu, Kulkarni ve Sharma, mekanik yüzey iyileştirme yöntemlerinden birisi olan derin soğuk haddeme işlemlerinde artık gerilme ve yüzeye yakın özelliklerinin iyileştirilmesi için cevap yüzey yöntemi ve istenirlik fonksiyonunu sonlu elemanlar modellemesi ile birlikte kullanmışlardır. Çalışmada AISI 4140 çeliğinden yapılan numuneler önce çeşitli işlem parametreleri ile derin soğuk haddelenmiştir. Mikro yapı, yüzey sertliği, yüzey kalitesi, yorulma ömrü ve işlem sonrası artık basınç gerilmesi incelenmiştir. Çeşitli işlem

değişkenleri ve bağımlı değişkenler arasındaki ampirik ilişkiyi karşılaştırmak için cevap yüzey yöntemi (CYY) ve istenirlik fonksiyonu yaklaşımı kullanılarak daha iyi yanıtlar için optimum parametre değerleri belirlenmiştir. Ayrıca, torna yardımcı derin soğuk haddeleme işleminin sayısal simülasyonu, çeşitli işlem değerlerinde artık gerilmenin durumunu anlamak için ANSYS-LS-DYNA yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Optimum olarak belirlenmiş değişkenlerin CYY ile tahmin edilen yanıtlar ve doğrulama deneylerinden elde edilen değerler arasındaki sapmanın yaklaşık % 5 olduğu bulunmuştur (Prabhu, Kulkarni, ve Sharma, 2020).

Usman ve arkadaşları, ultrasonik eliptik titreşimli kesme (UEVC) işleminde yüzeye ilgili fonksiyonel parametrelerinin değişim eğilimini değerlendirmek için Taguchi analizi ve yanıt yüzey metodolojisi (RSM) yaklaşımını kullanarak deneyler gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada kesme hızı, ilerleme hızı, kesme derinliği ve titreşim genliğinin, yüzey yatak indeksi (Sbi) ve çekirdek sıvı tutma indeksi (Sci) üzerindeki etkilerinin modellenmesi yapılmıştır. Analiz sonuçları, kesme hızının hem (Sbi) hem de (Sci) üzerinde en önemli etkiye sahip olduğunu, ardından yanıtlar arasında değişen sıralamalarda ilerleme hızı ve titreşim genliğinin ve son olarak, en az etkiyi gösteren kesme derinliğinin geldiğini ortaya çıkarmıştır. Doğrulama testi sonucunda, geliştirilen RSM tahmin modelinin yeterli doğrulukta olduğu görülmüştür. Son olarak, çıktı değişkenleri arzu edilirlilik fonksiyonu (CDF) yaklaşımı ile optimize edilmiştir. Optimize edilmiş parametre ayarı altında geleneksel kesim (CC) ve UEVC arasında karşılaştırmalı bir deneysel analiz gerçekleştirilmiş ve fonksiyonel endekslerin UEVC ile önemli ölçüde iyiye gittiği görülmüştür. (Usman ve diğerleri, 2021).

Qazi ve ark. kuru ve az miktarda yağlayıcı ortamında AA5005H34 malzemenin alın frezelemede kesme işlemi parametrelerinin etkisini araştırmayı amaçlamaktadır. Çalışmada frezelemede temel performans göstergeleri olarak yüzey pürüzlülüğü profili, malzeme kaldırma oranı ve takım aşınması belirlenmiştir. Çalışmada Taguchi ortogonal dizi karışım tasarımına göre on altı deney tasarlanmıştır. Tekli yanıtlar, sinyal-gürültü oranlarına dayalı olarak optimize edilirken, çoklu yanıt optimizasyonu için, temel bileşen analizi ile akuple birleşik istenirlik fonksiyonu uygulanmıştır. Varyans analizi (ANOVA) sonuçları, yüzey pürüzlülüğü profiline, talaş kaldırma oranına ve takım aşınmasına katkıda bulunan en önemli faktörlerin ilerlemenin ardından iş mili hızı, aksel kesme derinliği, kesme genişliği ve kesme ortamının olduğunu ortaya çıkarmıştır. Optimize edilmiş parametreler, bir MQL ortamında 3000 devir / dk kesme hızı, 350 mm / dk ilerleme hızı, 2 mm aksel kesme derinliği ve 6 mm kesme genişliği olarak belirlenmiştir (Qazi ve diğerleri, 2021).



Telles, Smorim ve Souza, biyo implant hammaddesi olarak kullanılan CP-Ti (grade 4) malzemenin tornalamasında kesme parametrelerinin (kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliği) ve yağlama soğutma koşullarının (kuru, en az yağlayıcı (MQL), azaltılmış miktarda yağlayıcı (Rql) ve geleneksel taşma) yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada Box-Behnken deney tasarımı kullanılmıştır. İstatistiksel analiz, ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğünü kontrol etmek için en önemli kesme parametresi olduğunu ve yüzey kalitesini iyileştirmek için düşük bir seviyede tutulması gerektiğini ortaya çıkarmıştır. Sonuçların analizi, her bir yağlayıcı soğutma atmosferinin, iş parçası yüzeyini iyileştirmek için diğerlerinden farklı kesme hızı seviyeleri ve kesme derinliği gerektirdiğini göstermiştir. İstenirlik fonksiyonu aracılığıyla yapılan çok değişkenli optimizasyon, test edilen lubri-soğutma yöntemleri arasında CP-Ti Grade 4'ün torbalanmasında yüzey pürüzlülüğünü en aza indirmek için RQL'in en iyi seçim olduğunu göstermiştir. Yüzey pürüzlülüğü değerlerini en iyilemek için, optimize edilmiş kesme parametreleri seviyeleri ile birlikte RQL işleme gerektiği tespit edilmiştir (Telles, Amorim ve Souza, 2021).

Nayak ve diğerleri, cam elyaf takviyeli polimer kompozitlerin (GFRP) delinmesi işleminin parametrik optimizasyonu üzerine çalışmışlardır. Laminantın giriş ve çıkış taraflarında ve yüzey pürüzlülüğünde GFRP'de delaminasyonu incelemek için deneysel çalışmaların sayısını azaltmak amacıyla Taguchi'nin deneysel tasarımı kullanılarak deneyler yapılmıştır. Kesme hızı, ilerleme hızı ve matkap boyutu, dört farklı seviyede delme işlemi için üç girdi parametresi olarak kabul edilmiştir. Taguchi'nin yaklaşımı, çok yanıtli optimizasyon problemini çözmede başarısız olduğu için istenirlik fonksiyonu yaklaşımı, çoklu yanıt eşdeğer tek yanıtla dönüştürmek için kullanılmıştır. Regresyon analizi, bileşik istenirlik indeksi ile girdi parametreleri arasındaki ilişkiyi geliştirmek için kullanılmış ve geçerli bir matematiksel model ortaya çıkmıştır. Son olarak, optimum parametre ayarını elde etmek için simüle edilmiş algoritma kullanılmıştır (Nayak ve diğerleri, 2021).

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

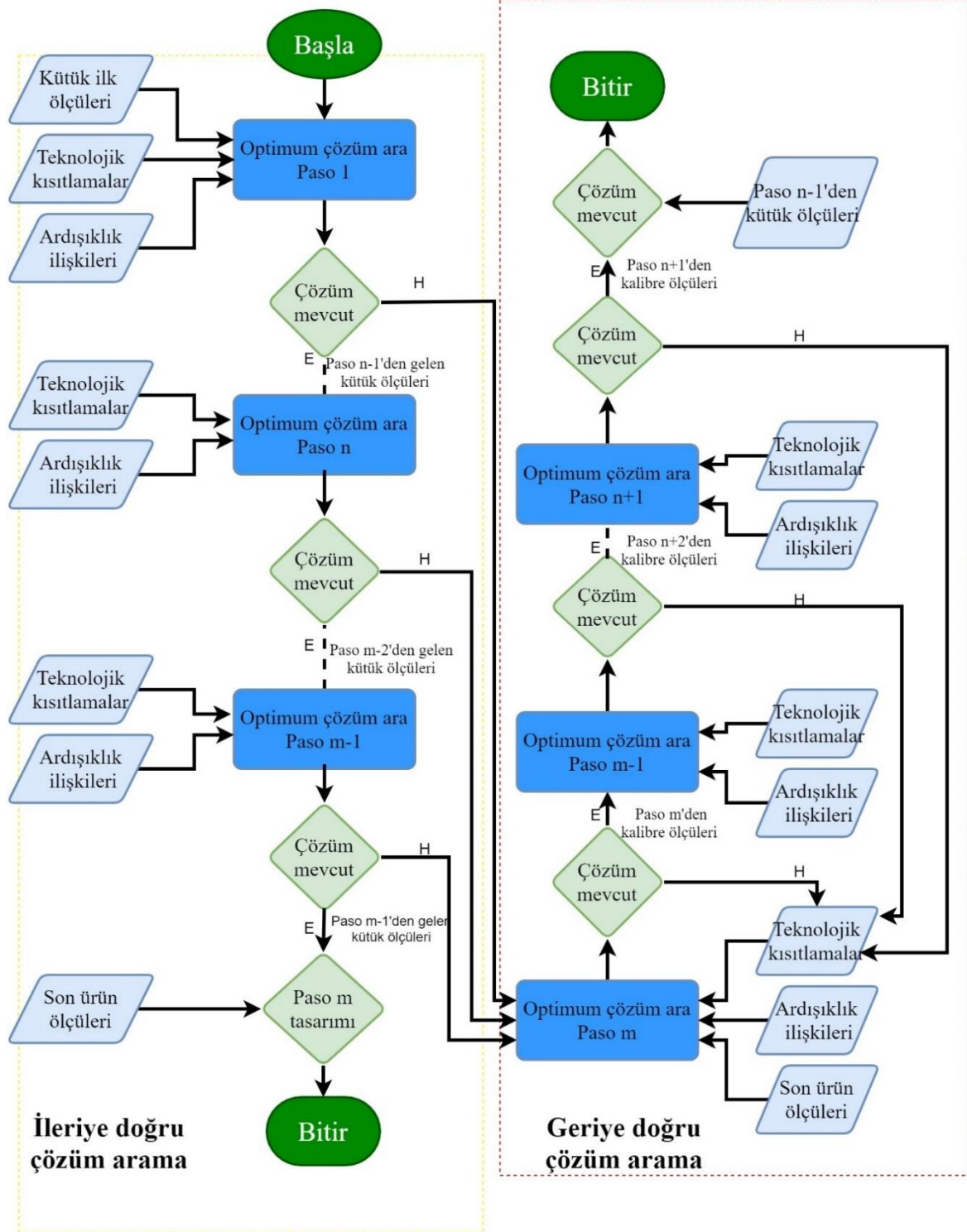
#### 3.1. Geliştirilen İstenirlik Temelli Çözüm Arama Stratejisi

Daha önceki bölümlerde de belirtildiği gibi bu çalışmanın birincil amacı kutu pasoların en ve yükseklik ölçüleri gibi geometrik ölçülerini optimize ederek kaba haddelemede toplam şekillendirme enerjisini minimize etmektir. Diğer yandan üretim maliyeti ile ilgili bazı farklı teknolojik parametreler de bulunmaktadır. Bu faktörlerden ikisi hadde stantlarının tasarımında önemli etkiye sahip olan radyal kuvvetler ve döndürme momentidir. Büyük yükler hadde tezgâhı bileşenlerinin daha büyük olmasını bu da daha fazla güç ihtiyacını dolayısı ile yüksek ilk yatırım ve işletme maliyetini ihtiyacını doğurur. Bu sebeplerden dolayı radyal merdane kuvvetleri ve döndürme momentlerinin ikincil optimizasyon kriteri olarak seçilmiştir.

Kaba haddeleme ardışık bir prosestir yani bir hadde pasosunun çıktısı bir sonraki pasonun girdisidir. Bu, prosesin her aşamasının (pasosunun) diğer aşamalar ve nihai çıktı ile sıkı ilişkili olmasını doğurur. Her pasoya ait optimizasyon kısıtlamaları bir önceki, bir sonraki ve son ürün boyutları tarafından belirlenir. Sonuç olarak genel performans kriterlerini yerine getiren ve her paso için belirlenmiş kısıtlamaların içerisinde kalan paso sırası tasarımlarına ulaşmak için bazı yöntemlere ihtiyaç vardır.

Bu çalışmada kaba haddelemenin ardışık yapısından kaynaklanan zorlukların üstesinden gelmek için Derringer' in istenirlik fonksiyonu temelli bir çözüm arama stratejisi geliştirilmiştir. Geliştirilen strateji paso tasarımları arasında veri geçişlerini ve ampirik bilgilerden çıkarılan kuralları içermektedir. Çözüm arama stratejisinin genel yapısı ve pasolar arası veri akışı Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Geliştirilen çözüm arama stratejisi geniş kapsamlıdır ve değişik paso sayısı ve teknolojik kısıtlama (maksimum kuvvet ve tork değerleri gibi) içeren paso sırası optimizasyonlarının yanında bazı revizyonlar ile ardışık yapıya sahip değişik problemlerin çözümünde de kullanılabilir.

Bu çalışmada haddeleme sırasında paso boşluğunun tam olarak doldurulduğu dolayısı ile de bir pasodan çıkan iş parçası kesitinin kalibre kesitine eşit olduğu varsayılmıştır.



Şekil 3.1. İstenirlik temelli ardışık çözüm arama stratejisi akış diyagramı

Şekil 3.1'de gösterildiği gibi çözüm arama stratejisi ilk kütük ölçüleri ve optimizasyon kriterlerinin ilk paso için istenirlik fonksiyonuna uygulanması ile başlar. Eğer çözüm bulunabiliyorsa en yüksek birleşik istenirlik değerine sahip çözüm, birinci paso için optimum tasarım olarak seçilir. Birinci pasoda işlenen kütük pasonun ölçülerini almış olur.

Bu ilk pasonun çıkış ölçülerini bir sonraki paso için giriş ölçüsü haline getirir. İkinci paso için de kütük giriş ölçüleri, geometrik ve teknolojik kısıtlamalar istenirlik fonksiyonuna uygulanır. Sonrasında bu koşullar altında ikinci paso için çözümün varlığı kontrol edilir. Bu prosedür en az bir çözüm bulunduğu sürece son pasoya kadar (son paso hariç) aynı şekilde sürdürülür. Son pasonun giriş ölçüleri bir önceki paso tarafından belirlenir, çıkış ölçüleri ise son ürün ölçüleri ile aynıdır.

İleri doğru çözüm arama sırasında herhangi bir paso (bu metinde  $n$  ile gösterilecektir) için çözüm bulunamamışsa buradan son pasoya atlanır ve geriye doğru çözüm arama aşamasına geçilir. Son pasonun (bu metinde  $m$  ile ifade edilecektir) çıkış ölçüleri son ürünün ölçüsü olarak önceden belirlenmiştir. Bundan dolayı bu çıkış ölçüleri, teknolojik ve geometrik kısıtlamalar istenirlik fonksiyonuna uygulanarak  $m-1$  pasosundan gelen ölçüler tespit edilir. Bu sefer geriye doğru çözüm arama prosedürü çözüm bulunduğu sürece  $n+1$  ( $n+1$  dahil) pasosuna kadar sürdürülür. Burada  $n$  pasosunun ölçüleri giriş ve çıkış ölçüleri sırası ile  $n-1$  ve  $n+1$  pasoları tarafından belirlenmiştir.

Geriye doğru çözüm aramanın herhangi bir aşamasında kısıtlamaları sağlayan çözüm bulunamaz ise son pasoya (paso  $m$ ) dönülerek teknolojik kısıtlamalar değiştirilir ve çözüm aramaya devam edilir.

### 3.2. Önerilen Paso Optimizasyon Metodu

Bu çalışma kapsamında geliştirilen ardışık çözüm arama stratejisi temelde birleşik istenirlik fonksiyonunu kullanmaktadır. İstenirlik fonksiyonu ile bulunan çözümler aslında cevap yüzeyleri üzerinde tespit edilen özel bazı noktalardır ve bu noktalarının tespit edilebilmesi için bağımlı değişkenlerin çözüm uzayı içerisindeki değişimlerini yeterli doğrulukta temsil eden cevap yüzeylerinin oluşturulması gerekmektedir. Bu nedenle tez çalışmaları kapsamında geliştirilen istenirlik temelli çözüm arama stratejisinin hadde paso düzeni tasarımında uygun bir şekilde kullanımını sağlayan bir metot önerilmiştir. Önerilen metot altı aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamalar:

1. Başlangıçtaki kütük ve son ürün ölçüleri,
2. Paso sayısının ve iş parçasının pasolara giriş yöneliminin belirlenmesi,
3. Bağımsız değişkenler için deney setlerinin belirlenmesi,

4. Deneylerin ve gerekli hesaplamaların yapılarak her deney seti için bağımlı değişkenlerin tespiti,
5. Varyans analizlerinin yapılması ve cevap yüzeylerinin oluşturulması,
6. Geliştirilen çözüm arama stratejisinin uygulanmasıdır.

Önerilen paso optimizasyon metodunun aşamaları ve bilgi akış şeması Şekil 3.2’de sunulmuştur. Şekil 3.2 sondan başa doğru incelendiğinde her aşamanın bir sonraki aşamanın ön gerekliliği olduğu görülecektir. İstenirlik fonksiyonları cevap yüzeyleri üzerinde çalışmakta ve öncesinde bunların oluşturulmuş olması gerekmektedir. Varyans analizi yapmak ve yanıt yüzeylerini oluşturmak için belirlenmiş bağımsız değişken değer setlerine karşılık gelen bağımlı değişken değerlerinin bulunması gerekir. Bunun için de deneyler yürütülmeli ve doğrudan tespit edilemeyen bağımlı değişkenlerin değerleri hesaplamalar ile bulunmalıdır. Bu da uygun deney setlerinin oluşturulmasını gerektirir. Bu setlerin oluşturulabilmesi için öncesinde paso sayısının ve her pasonun yönelimi bilinmelidir. Uygun paso sayısı ve paso yönelimleri ise ancak kütük başlangıç ve son ürün ölçüleri dikkate alınarak belirlenebilir.

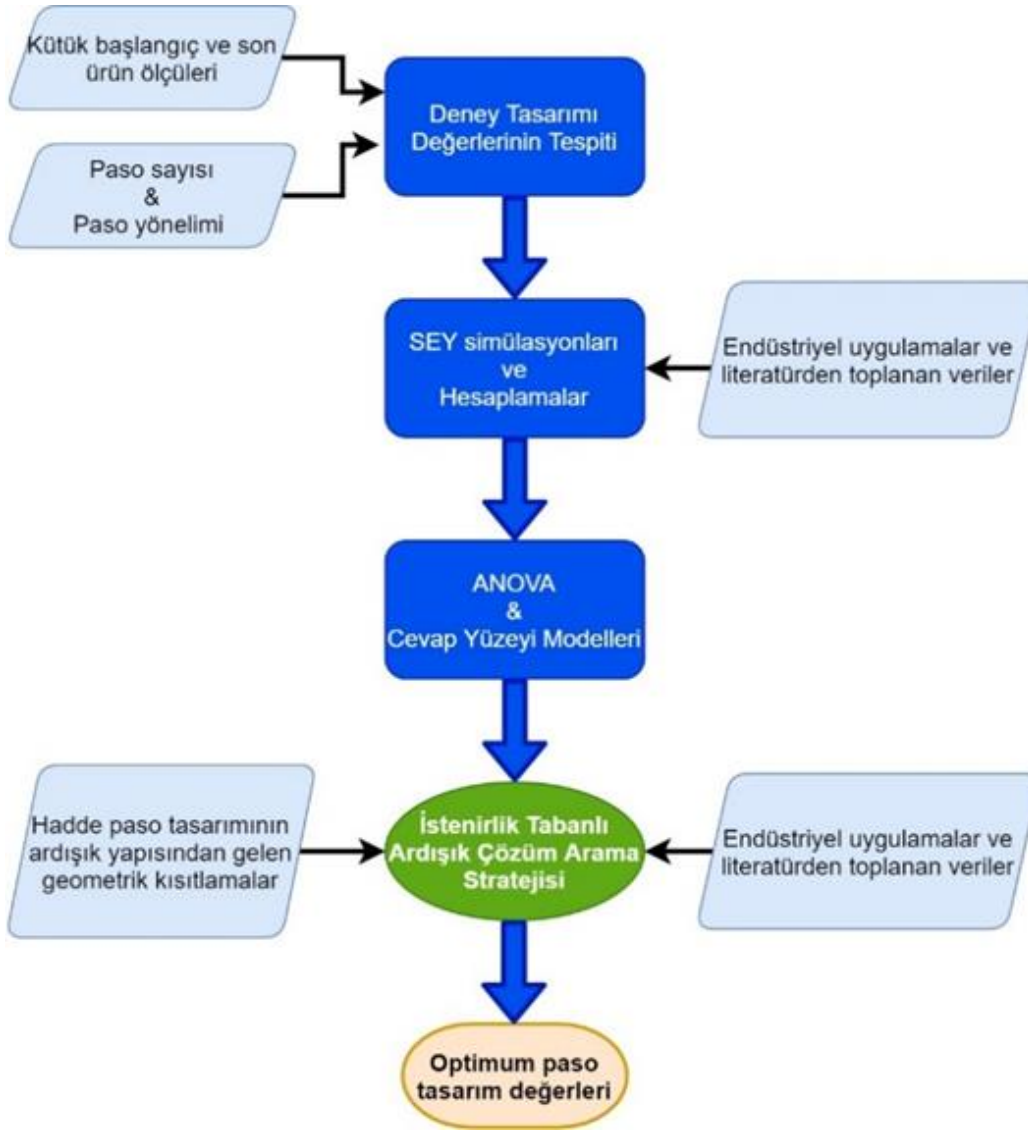
Önerilen optimizasyon metodu ve çözüm arama stratejisinin uygulanması bir durum çalışması ile gösterilmiştir.

### **3.3. Durum Çalışması**

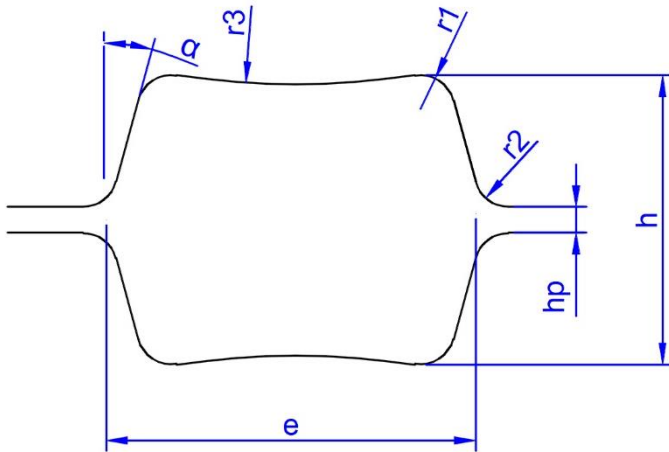
Önerilen optimizasyon metodu ve geliştirilen çözüm arama stratejisi bazı endüstriyel üretim tesislerinin kullandığı kaba haddeme prosesinin optimizasyonuna uygulanmıştır. Uygulanan optimizasyon yöntemi bu kısımda adım adım ayrıntıları ile açıklanmıştır.

#### **3.3.1. Kütük başlangıç ve son ürün ölçülerinin belirlenmesi**

Bu durum çalışmasında üç değişik inşaat demiri üretim tesisine ait kaba haddeme prosesleri referans alınmıştır. Bu tesislerde 150 mm x150 mm kesit ölçülerine sahip kütükler şekli ve parametrik ölçüleri Şekil 3.3’te gösterilen kutu pasolar kullanılarak sırası ile 80 mm x 74 mm, 110 mm x 74 mm ve 75 mm x 76 mm en ve yükseklik ölçülerine haddelenmiştir.



Şekil 3.2. Önerilen paso optimizasyon metodu bilgi akış şeması



Şekil 3.3. Kutu paso geometrisi ve parametrik ölçüleri

Durum çalışmasında ise iş parçası başlangıç ölçüleri yukarıdaki referans ölçülere dayanılarak 150 mm x 150 mm kesit ve 1000 mm uzunlukta tanımlanmıştır. Son ürünün kesit ölçüleri ise minimum 74 x 74 mm ile maksimum 107 mm x 74 mm olarak belirlenmiştir. Bu şekilde mümkün olan en büyük kesit alanı (107 mm x 74 mm) üç referans tasarım içerisinde en büyük kesit alanına (110 mm x 74 mm) yakın olmuştur. Ürünün son uzunluğu ise hacim sabitliği prensibi tarafından belirlenir.

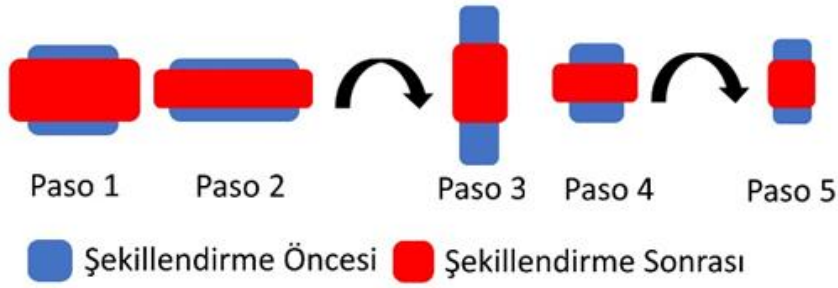
### 3.3.2. Paso sayısı ve yönelimleri

Referans üretim tesislerinde kaba haddeme stantları 5 pasodan oluşmaktadır. Kütük ilk iki pasoda ezilmekte sonra 90° döndürülmekte ve 3. ve 4. pasolarda tekrar art arda ezilmektedir. İş parçası 5. pasodan önce tekrar döndürülmekte ve son pasoda son şeklini almaktadır. İşlem sırası Resim 3.1’de gösterilmiştir. Aynı paso sayısı ve sıralaması durum çalışmasında da kullanılmıştır.

### 3.3.3. Bağımsız değişkenlerin deneysel değerlerinin tespiti

Kutu pasodaki bağımsız parametreler Şekil 3.3.’te görüldüğü gibi paso boşluğundaki  $h$ ,  $e$ ,  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$ , ve  $\alpha$ ’dır. Bu değişkenlerin karşılıkları da bu pasolar tarafından şekillendirilen iş parçasında bulunur. Bu başa çıkılması gereken 13 değişkenli bir çözüm uzayı oluşturur. Problemin karmaşıklığının düşürülmesi için çözüm iki aşamaya ayrılmıştır. Çözümün 1. aşamasında radyüs ve açı ölçüleri sabit tutularak paso girişlerindeki ve çıkışlarındaki en ve yükseklik değerleri bağımsız değişkenler olarak önerilen optimizasyon metodunda ve çözüm arama stratejisinde kullanılmıştır. İkinci aşamada ise birinci aşamada optimize edilen paso tasarımı üzerinde ikincil geometrik parametrelerin optimizasyonu yapılmıştır. Şekillendirme enerjisi ve merdanelere etki eden radyal kuvvetler ve döndürme momentleri bağımlı değişkenler olarak ele alınmıştır.

Optimizasyon işleminin bu aşamasında deney tasarımlarının yapılması gerekmektedir. Hadde işleminin ardışık yapısından dolayı paso tasarımı bazı kuralara uyulmasını gerektirmektedir.



Resim 3.1. Durum çalışmasında kullanılan paso düzeni

O anda ele alınan paso numarası  $n$  ile ifade edilirse kurallar şu şekilde sıralanabilir:

**Kural 1:** Eğer iş parçası ele alınan pasoya girmeden önce döndürülmemiş ise,  $e_n \geq e_{n-1}$

**Kural 2:** Eğer iş parçası ele alınan pasoya girmeden önce döndürülmüş ise,  $e_n \geq h_{n-1}$

**Kural 3:**  $e_{n-1} \times h_{n-1} > e_n \times h_n$

Buradaki kural 1 ve kural 2 haddeleme sırasında iş parçasının ezilmesinden dolayı eninin normalde artması, en azından sabit kalması gerekmesinden çıkarılmıştır. Kural 3 ise kaba haddelemedeki temel amacın iş parçası kesit alanını düşürmek olmasından kaynaklanmıştır.

Cevap yüzey yöntemi sistematik deney tasarımlarını içermektedir. Bu deney tasarımları ile ilgili ayrıntılı bilgiler kısım 3.4.1’de sunulmuştur. Fakat paso tasarımının ardışık yapısından kaynaklanan yukarıda açıklanan kurallardan dolayı bu çalışmada CYY yöntemine ait deney tasarımların herhangi birisi bu çalışmada kullanılamamıştır. Diğer yandan literatürde deney tasarımı yapmaya uygun olmayan durumlarda ya da daha önce yapılmış deneylerden elde edilen sonuçların kullanılması gerektiğinde deney tasarımı haricindeki veriler ile de yeterli cevap yüzeyleri oluşturulabilmektedir (Amirov ve Vakhshouri, 2020; Ekpotu ve diğerleri, 2020; Sharifi ve diğerleri, 2020).

Deneysel bağımsız değişken setlerini oluşturmak için yukarıda açıklanan kurallara uyan varsayımsal paso tasarımları gerçekleştirilmiştir. Bu veri setlerine 5 ayrı endüstriyel üretim tesisinin paso tasarımları da eklenerek toplamda 144 ayrı deneysel paso tasarımı tanımlanmıştır. Bu deney setlerine ait bağımsız değişkenler Ek-1’de sunulmuştur. Ayrıca bağımsız deney setleriyle ilgili özet bilgi de Çizelge 3.1’ de verilmiştir.



Çizelge 3.1. Deney setlerinde kullanılan bağımsız değişkenlerle ilgili özet bilgi

| Faktör | Değişken Adı   | Birimi | Tipi    | Minimum | Maksimum | En düşük kodlanmış | En yüksek kodlanmış | Ortalama | Std, Sapma |
|--------|----------------|--------|---------|---------|----------|--------------------|---------------------|----------|------------|
| A      | e <sub>1</sub> | mm     | Numerik | 40,00   | 180,00   | -1 ↔ 40,00         | +1 ↔ 180,00         | 107,14   | 37,24      |
| B      | e <sub>2</sub> | mm     | Numerik | 60,00   | 208,06   | -1 ↔ 60,00         | +1 ↔ 208,06         | 119,58   | 40,64      |
| C      | h <sub>1</sub> | mm     | Numerik | 66,07   | 208,06   | -1 ↔ 66,07         | +1 ↔ 208,06         | 135,44   | 28,97      |
| D      | h <sub>2</sub> | mm     | Numerik | 40,00   | 161,40   | -1 ↔ 40,00         | +1 ↔ 161,40         | 87,66    | 29,08      |

Endüstriyel tesislerde kullanılan tasarımlar dışındaki deneysel tasarımlarda Çizelge 3.2’de verilen ikincil geometrik parametre değerleri kullanılmıştır.

Çizelge 3.2. Deneysel paso tasarımlarında kullanılan radyüs ve açı ölçüleri

| r <sub>1</sub> | r <sub>2</sub> | r <sub>3</sub> | $\alpha$ |
|----------------|----------------|----------------|----------|
| (mm)           | (mm)           | (mm)           |          |
| 10             | 10             | 1000           | 7°       |

### 3.3.4. Simülasyon deneylerinin gerçekleştirilmesi ve bağımlı değişkenlerin hesaplanması

Sıcak haddeleme işlemlerinde fiziksel deneylerin gerçekleştirilmesi aşırı derece yüksek maliyetli ve yürütülmesi oldukça zordur. Öte yandan sıcak haddeleme işlemlerinin simülasyonunda sonlu elemanlar yöntemi oldukça iyi sonuçlar vermektedir (Çavdar ve Kanca, 2020; Kurt ve Yaşar, 2020; Li ve diğerleri, 2019). Bu tez çalışmasında SEY temelli modellemeler ve simülasyonlar bir deney ortamı gibi kullanılmıştır. Ek-1’de listelenen deney setlerinin simülasyonları gerçekleştirilmeden önce oluşturulan SEY modellemesi ve şekillendirme enerjisi hesaplamaları gerçek endüstriyel kaba haddeleme prosesi ile karşılaştırılarak doğrulaması gerçekleştirilmiştir.

### Kullanılan SEY yazılımı

Bu çalışmada modelleme ve simülasyon çalışmaları sonlu elemanlar metodu temelli ticari bir yazılım olan Simufact.forming kullanılarak yapılmıştır. Bu yazılım metal şekillendirme uygulamalarının simülasyonu için geliştirilmiştir. Bu yazılım ile;

- Kalıp ve iş parçası üzerinde oluşan kuvvet ve torklar,
- Malzeme akışı,
- Sıcaklık dağılımı,
- Geri yaylanma,
- Artık gerimeler
- Tane büyüklüğü ve faz dönüşümleri,
- Sertlik,
- Aşınma dağılımı

gibi parametreleri incelemek mümkündür (Bauer ve diğerleri, 2019; Gontarz ve diğerleri, 2019; Kubit ve Trzepiecinski, 2020; Vogel ve Merklein, 2021).

### Malzeme özellikleri

Bu çalışmada sanayide en çok kullanılan yapısal çelik türlerinden birisi olan S235JR kullanılmıştır. Bu malzeme yüksek dayanım değerlerine sahip olmamakla birlikte gerek üretim kolaylığı gerekse talaşlı- talaşsız şekillendirilebilme kabiliyeti ve kaynak edilebilirliği sayesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. S235JR kalite çeliğin EN 10025-2 standardına göre kimyasal ve mekanik özellikleri sırasıyla Çizelge 3.3. ve Çizelge 3.4'te verilmiştir (Türk Standartları Enstitüsü 2006).

Bahsedilen malzemenin DIN 17100 standardına göre karşılığı St37-2'dir ve Simufact.forming yazılımının malzeme veri tabanında sıcak şekillendirme işlemleri için St37-2\_h kodu altında tanımlanmıştır. Malzemenin modelleme uygulamalarındaki sınırlamaları Çizelge 3.5'te gösterilmiştir. Malzemenin Poisson oranı 0,283, akma gerilimi 335,074 MPa, özkütlesi 7854 kg/m<sup>3</sup> olarak tanımlanmıştır.

Çizelge 3.3. S235JR kalite çeliğin kimyasal özellikleri

| C (maksimum %)      |      | Mn<br>(maks. %) | P<br>(maks. %) | S<br>(maks. %) | N<br>(maks. %) | Cu<br>(maks. %) |
|---------------------|------|-----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| Ürün kalınlığı (mm) |      |                 |                |                |                |                 |
| <16                 | 40≥  |                 |                |                |                |                 |
| 0,19                | 0,23 | 1,50            | 0,045          | 0,045          | 0,014          | 0,60            |

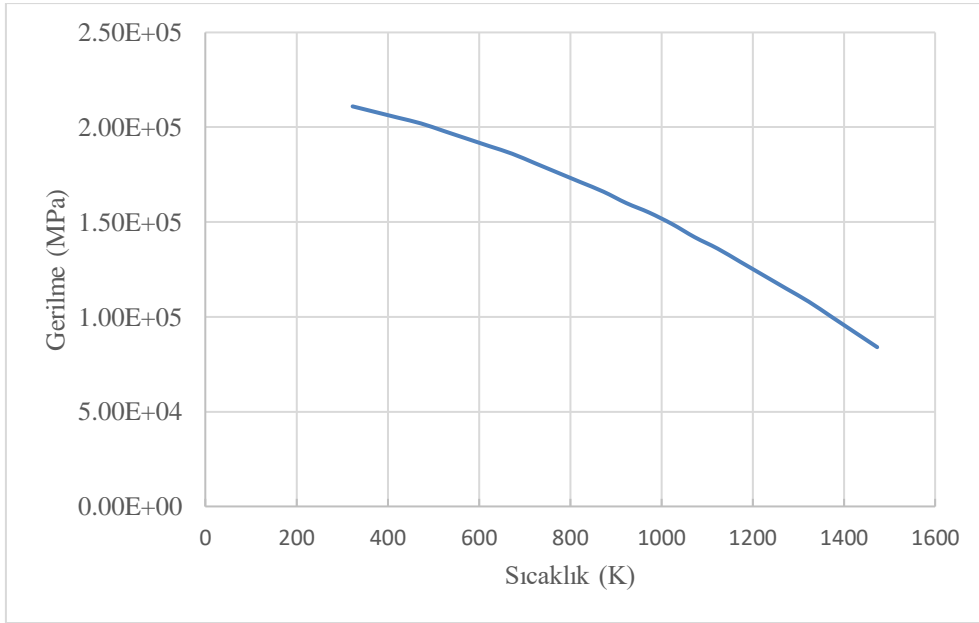
Çizelge 3.4. S235JR kalite çelik mekanik özellikleri

| Üst akma gerilmesi<br>(N/mm) |         |        |         |         |         | Çekme gerilmesi<br>(N/mm) |         |         |
|------------------------------|---------|--------|---------|---------|---------|---------------------------|---------|---------|
| Ürün Kalınlığı (mm)          |         |        |         |         |         | Ürün Kalınlığı (mm)       |         |         |
| <100                         | <100    | 41-100 | 101-150 | 101-150 | 151-200 | <100                      | 101-150 | <100    |
| 360-510                      | 360-510 | 215    | 215     | 195     | 185     | 360-510                   | 360-500 | 360-510 |

Çeliklerin elastik modülleri sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir (Spittel ve Spittel 2009). Resim 3.2’de St37-2\_h koduyla tanımlanmış malzemenin elastik modülünün sıcaklığa bağlı değişimi gösterilmiştir.

Çizelge 3.5. St37-2\_h malzemenin tanımlı olduğu sınır değerler

|  |            |
|--|------------|
| <b>En düşük sıcaklık</b>                     | 1073,15 K  |
| <b>En yüksek sıcaklık</b>                    | 1523,15 K  |
| <b>En düşük efektif plastik deformasyon</b>  | 0,05       |
| <b>En yüksek efektif plastik deformasyon</b> | 1,50       |
| <b>En düşük deformasyon hızı</b>             | 0,01 1/s   |
| <b>En yüksek deformasyon hızı</b>            | 100,01 1/s |



Resim 3.2. St37-2\_h malzemenin elastik modülün sıcaklığa bağlı değişimi (Simufact Engineering GmbH 2012)

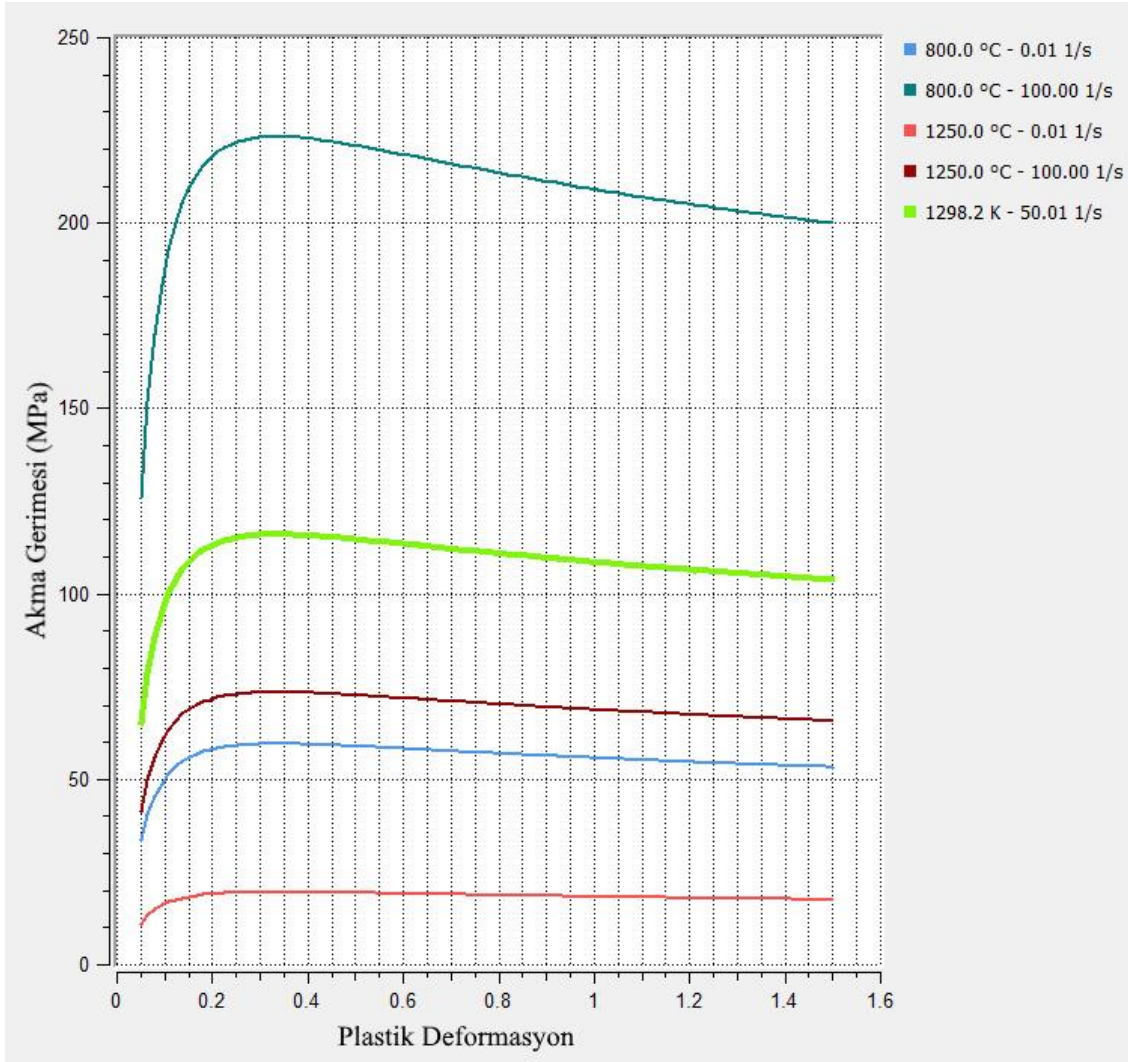
Birçok malzeme için akma gerilmesinin deformasyon, deformasyon hızı ve sıcaklığa bağlı olarak değiştiği tespit edilmiş ve Hansel ve Spittel tarafından bir model geliştirilmiştir. Bu çalışmada kullanılan SEY yazılımında malzemenin akma diyagramları Eş. 3.1 ile ifade edilen Hensel-Spittel modeline göre belirlenmiştir (Chadha, Shahriari, ve Jahazi 2018; Spittel ve Spittel 2009).

$$\sigma_F = A \cdot e^{m_1 \cdot T} \cdot \varphi^{m_2} \cdot e^{\frac{m_4}{\varphi}} \cdot \dot{\varphi}^{m_3} \quad (3.1)$$

Burada  $\sigma_F$ , akma gerilmesi,  $T$ , sıcaklık,  $\varphi$ , deformasyon,  $\dot{\varphi}$  deformasyon hızı,  $A$ ,  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$ ,  $m_4$  malzemeye göre değişen sabitlerdir. St37-2\_h malzemeye ait akma diyagramları Resim 3.3'te sunulmuştur.

St37-2-h malzemenin termal özelliklerinin sabit değerleri Çizelge 3.6'te sunulmuştur. Bunun dışında ısı iletkenlik, öz ısı kapasitesinin, ısı genleşmenin sıcaklığa bağlı değişim grafikleri sırasıyla, Resim 3.4 a, b ve c'de görülmektedir.

Merdanelerde ve yolluklarda merdanelerde meydana gelecek deformasyonların torqları dolayısı ile de harcanan enerjiyi önemli derecede etkileyecek seviyede olmayacağı düşünüldüğünden ve merdanelerde meydana gelecek şekil değiştirmelerin de hesaplanması durumunda simülasyon çözüm süresinin çok fazla artacağı dikkate alındığından dolayı merdaneler ve yolluklar tam katı olarak tanımlanmıştır.



Resim 3.3. St37-2\_h malzeme için elde edilen akma eğrileri

#### Genel modelleme parametrelerinin tanımlanması

Sonlu elemanlar metodunda gerçeğe uygun simülasyon sonuçları elde edebilmek için proses parametrelerinin yazılıma doğru şekilde aktarılması gerekir. Bu kısımda haddeleme koşullarının simülasyon yazılımına tanımlanması anlatılmaktadır.

Başlangıçta simülasyon yazılımına simülasyon tipi (3 boyutu, 2 boyutlu eksenel simetrik ve 2 boyutlu düzlemsel simetrik), çevre sıcaklığı, prosesin sıcaklık aralığı (sıcak veya soğuk işlem) ve kullanılacak kalıp sayısı ile ilgili bilgilerin girilmesi gerekmektedir.

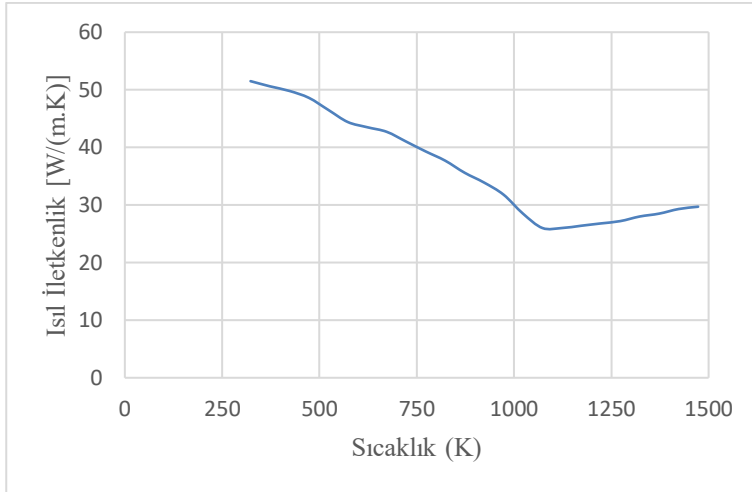
Bu çalışmada analiz edilen haddeleme prosesini 2 boyutlu olarak tanımlamak mümkün olmadığından 3 boyutlu simülasyon tipi seçilmiştir. Çevre sıcaklığı 30° C olarak tanımlanmıştır. Proses sıcak işlem olarak tanımlanmış ve başlangıçtaki kalıp sayısı 3 olarak belirlenmiştir.

### İş parçası ve merdane geometrilerinin modellenmesi

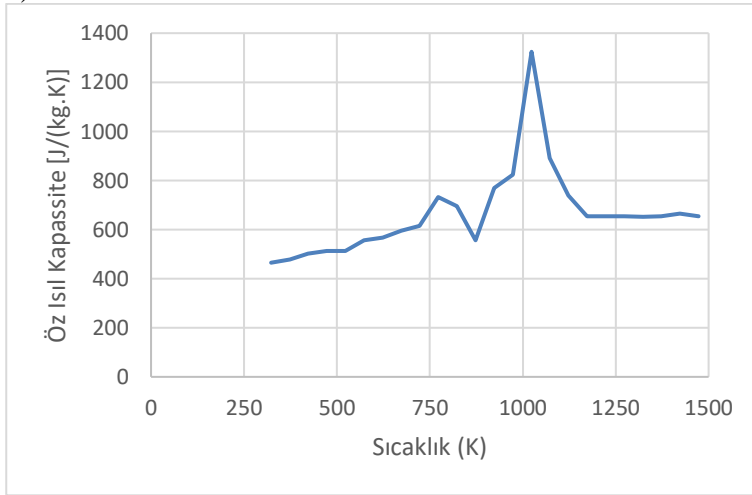
Bu çalışmada iş parçasının proses başlangıcındaki kesit ölçüsü 150x150 mm başlangıçtaki kütük boyu ise 200 mm olarak belirlenmiştir. İş parçasının proses başlangıcındaki ölçüleri Resim 3.5’de görülmektedir. Endüstriyel uygulamaya uygun olarak kütüğün köşeleri 5 mm yarıçapında yuvarlatılmıştır. İş parçası her pasodan geçtikçe hacmi sabit kalacağından kesit daralmasına bağlı olarak boyu uzamaktadır.

Kaba hadde merdane dış çap ölçüleri endüstride hadde tezgahının ölçülerine bağlı olarak değişmektedir. Bu çalışmada teknik destek alınan sanayi kuruluşunun uygulamalarına uygun olması amacıyla merdane dış ölçüsü 550 mm olarak tespit edilmiştir. Endüstriyel uygulamalarda kaba haddeleme merdaneleri üçlü set olarak tasarlanmakta ve kullanılmaktadır (Resim 3.6). Merdanelerinin üzerine haddeleme işlemi sırasında kullanılacak bütün pasolar elde edilecek şekilde kalibreler açılmaktadır. Bu çalışmada ise prosesin modellenmesi ve analizi sırasında kolaylık sağlayacağı için her paso Resim 3.7’de görüldüğü gibi diğerlerinden bağımsız bir çift merdane ile tanımlanmıştır.

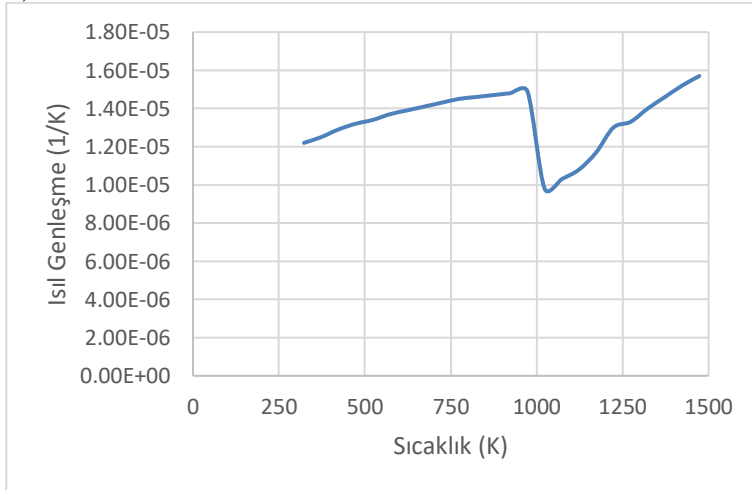
Endüstriyel uygulamalarda merdanelerin iş parçasını kapmama ihtimalini ortadan kaldırmak için kalibrelerin tabanına kaynak kullanılarak çıkıntılar oluşturulmaktadır. Aynı şekilde, merdanelerin modellenmesi sırasında da kalibrelerin içerisine Resim 3.8’de gösterildiği gibi kesiti yarıçapı 5 mm olan yarım daire şeklinde 15 adet çıkıntı eşit aralıklarla oluşturulmuştur.



a)



b)

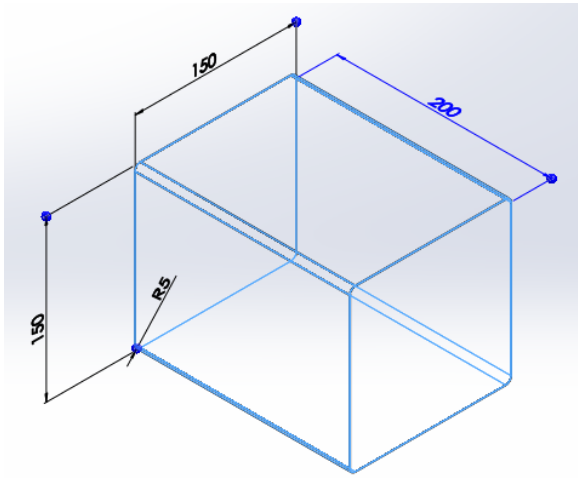


c)

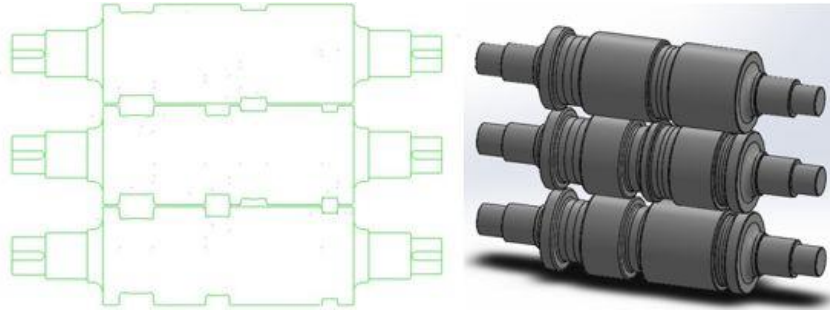
Resim 3.4. St-37-2\_h malzemenin termal özelliklerinin sıcaklık ile değişimi

Çizelge 3.6. St-37-2-h malzemenin termal özelliklerinin sabit değerleri

| Termal özellik      | Değer    | Birim    |
|---------------------|----------|----------|
| Termal Kondüktivite | 51,5     | W/(m·K)  |
| Öz ısı kapasite     | 465,0    | J/(kg·K) |
| Isıl genleşme       | 1,25e-05 | 1/K      |



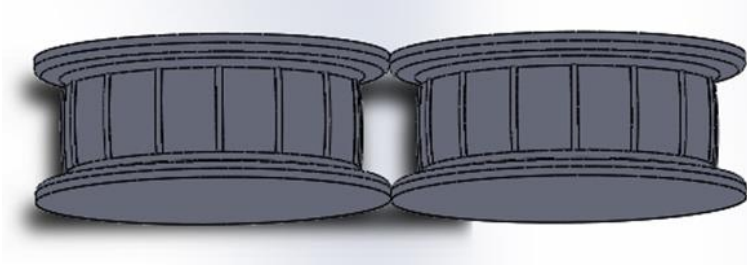
Resim 3.5. İş parçasının başlangıçtaki şekil ve boyutları



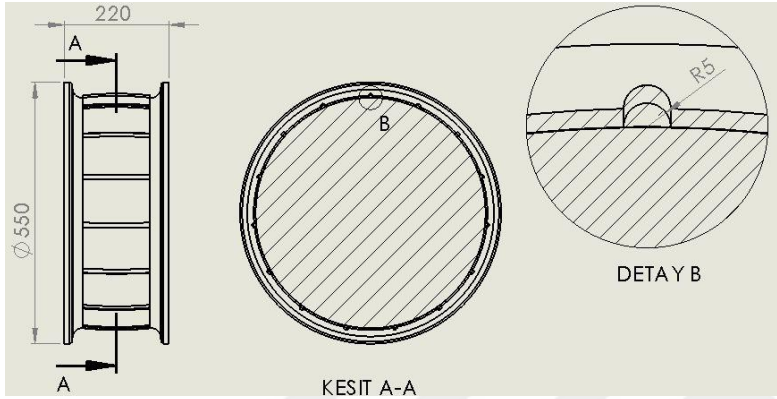
Resim 3.6. Bir üçlü merdane setinin ortografik ön ve izometrik görünümüleri

Karmaşık geometriler Simufact.forming içerisinde oluşturulamamaktadır. Bu sebepten bilgisayar destekli tasarım yazılımında (Solidworks) oluşturulmuş ve STL formatında kaydedilmiş merdane geometrileri SEY yazılımına aktarılmıştır. Merdane ve iş parçasının konumlandırılmaları Resim 3.9’da görüldüğü gibi yapılmıştır.

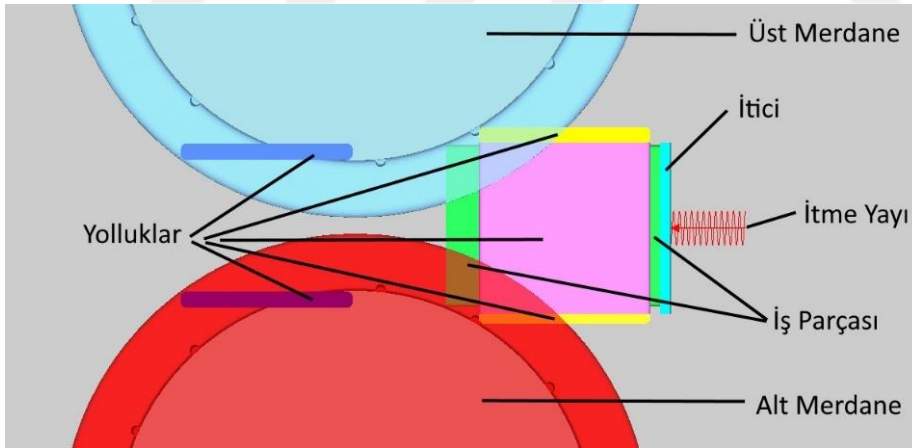




Resim 3.7. Bir pasoyu oluşturan merdane çiftinin 3 boyutlu görüntüsü



Resim 3.8. Merdane modelinin kesit görünümü



Resim 3.9. SEY modelinde kullanılan yardımcı parçalar ve konumlandırılmaları

Prosesin başında merdanelerin iş parçasını kapmasını sağlamak için 160x160x10 mm boyutlarında kare prizma şeklinde bir itici ve bu iticiyi iş parçasına bastırmak için yay tanımlanmıştır. Tanımlanan yayın özellikleri Çizelge 3.7’te verilmiştir.

İş parçasının proses sırasında aşağı yukarı ve sağa sola hareketini engellemek için merdane girişinde dört tarafa, merdane çıkışında alt ve üst tarafa Resim 3.9’da görüldüğü gibi yolluklar yerleştirilmiştir.

Çizelge 3.7. İtme yayının özellikleri

|                           |               |
|---------------------------|---------------|
| <b>Başlangıç durumu</b>   | Sıkıştırılmış |
| <b>Uygulama Yönü</b>      | -Y            |
| <b>Sıkışma miktarı</b>    | 100 mm        |
| <b>Ön gerilme kuvveti</b> | 10 N          |
| <b>Yay sabiti</b>         | 1e-6 N/m      |

#### Sürtünme katsayılarının tanımlanması

Literatür araştırmalarında sürtünme katsayısının sıcak şekillendirme uygulamalarında kullanılan değerinin 0,3 ile 1,0 arasında değiştiği görülmüştür (Nellippallil ve diğerleri, 2017; Oduguwa, Roy ve Farrugia, 2007; Wang ve diğerleri, 2005). Bunun yanında Wusatowski'nin kitabında çeliklerin haddelenmesi sırasında, malzemenin ergime sıcaklığının 0,5 ile 0,8 katı arasındaki sıcaklıklarda sürtünme katsayısının 0,40 ile 0,45 arasında oluştuğunu bildirilmiştir. Bunlar göz önünde bulundurularak kullanılan SEY yazılımında modelleme sırasında merdaneler ile iş parçası arasındaki sürtünme Coulomb modeline göre 0,4 olarak tanımlanmıştır (Wusatowski 1969). Endüstriyel uygulamalarda kaba haddelene işleminde genelde yolluk kullanılmamaktadır. Bu durum göz önünde bulundurularak ve yollukların yüksek bir direnç oluşturmaması için iş parçası ile yolluklar arasındaki sürtünme 0,1 olarak kabul edilmiştir.

#### Termal tanımlamalar

Modellemelerde iş parçasının başlangıç sıcaklığı 1100° C, ısı transfer katsayısı 50 W/(m<sup>2</sup>.K), ısı radyasyon emisyon katsayısı 0,25 olarak tanımlanmıştır.

Merdanelerin başlangıç sıcaklığı endüstriyel uygulamalara uygun olarak 50 °C olarak belirlenmiştir. Yollukların başlangıç sıcaklığı ise simülasyon sırasında sıcaklık düşüşüne sebep olmaması için 1000° C olarak tanımlanmıştır. İş parçasının ilk sıcaklık dışındaki termal özellikleri merdane ve yolluklar için de geçerlidir.

### Kinematik tanımlamalar

Endüstriyel uygulamalarda kaba haddeleme tezgahında üç merdane de tahriklidir. Simülasyon modellemesinde önce her pasoda iki merdanenin de dönme eksenini ve dönüş yönü Simufact.forming yazılımının ilgili ara yüzü kullanılarak tanımlanmıştır. Daha sonra merdanelerin dönüş hızı 136 dev/dk olarak, dönüş süresi ise ilk üç pasoda 0,3 saniye, 4. ve 5. Pasoda 0,5 saniye olarak tanımlanmıştır.

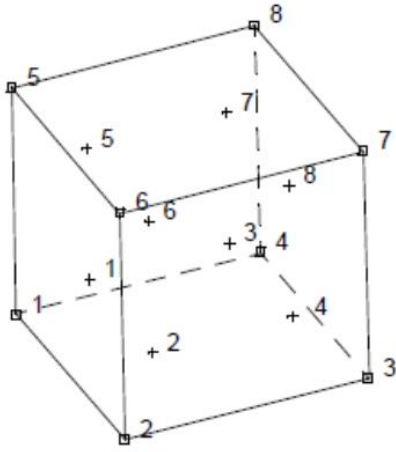
İtici hareketi Resim 3.9'da gösterilen yay ile sağlanmıştır. Yolluklar ise tamamen sabit olarak tanımlanmıştır.

### Eleman tipinin belirlenmesi ve eleman ağının oluşturulması

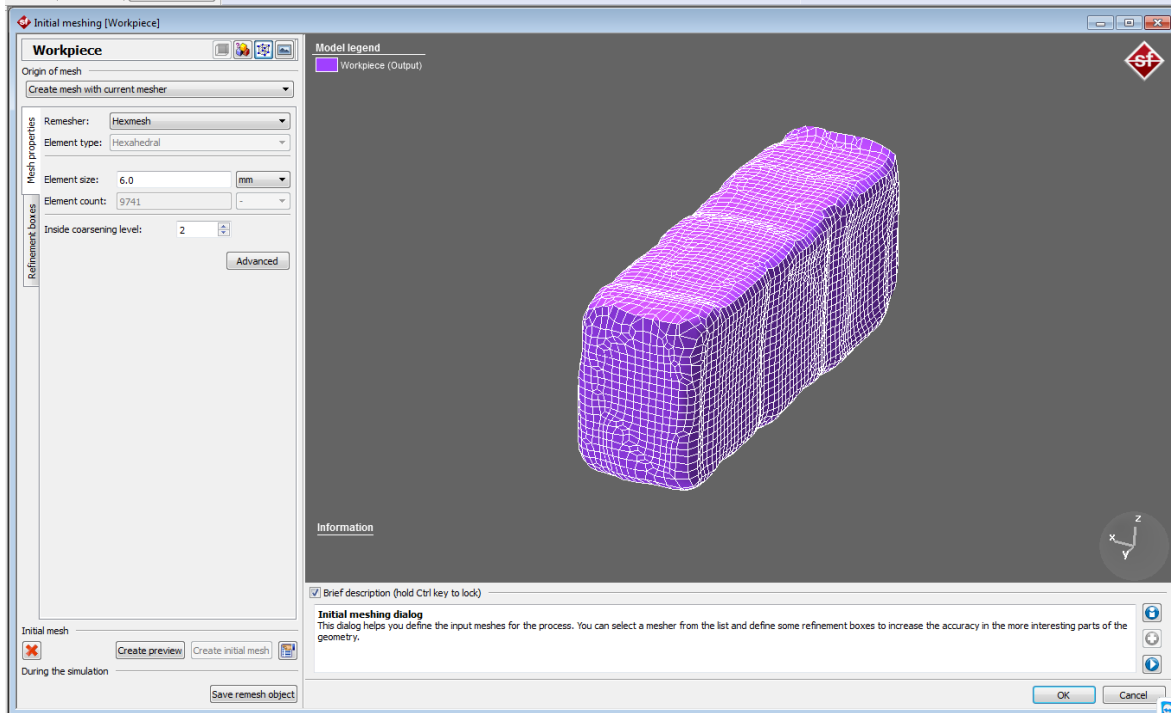
Simufact.forming yazılımında 6 tip eleman kullanılabilir. Bu çalışmada eleman tipi 7 kullanılmıştır. Bu eleman tipi üç boyutlu analiz için tasarlanmış 8 düğümlü, eş parametrik, 6 yüzlü eleman tipidir. Eleman kilitlenmelerinden kaçınmak için Resim 3.10'daki gibi 8 entegrasyon noktası sabit dilatasyon noktasıyla birlikte kullanılır. Her düğümün 3 serbestlik derecesi vardır (Simufact Engineering GmbH 2015).

Eleman kenar uzunluğu 6 mm olarak belirlenmiştir. Resim 3.11'de çalışma sırasında oluşturulmuş bir eleman ağı örneği görülmektedir.

Metal şekillendirme işlemlerinin sonlu eleman analizi sırasında büyük deformasyonlardan dolayı eleman ağı sık sık çarpılır. Çarpık eleman ağı kötü sonuçlara ve analizin yarım kalmasına sebep olur. Bu problemin üstesinden gelmek için analiz sırasında zaman zaman eleman ağı yeniden oluşturulur. Bu işlem remesh olarak adlandırılmakta ve belirlenen kriterlere göre kontrol edilerek önceden belirlenmiş eleman boyutuna göre SEY yazılımı tarafından otomatik olarak tekrarlanmaktadır.



Resim 3.10. Eleman tipi 7 şematik gösterimi ve entegrasyon noktaları (Simufact Engineering GmbH 2015)



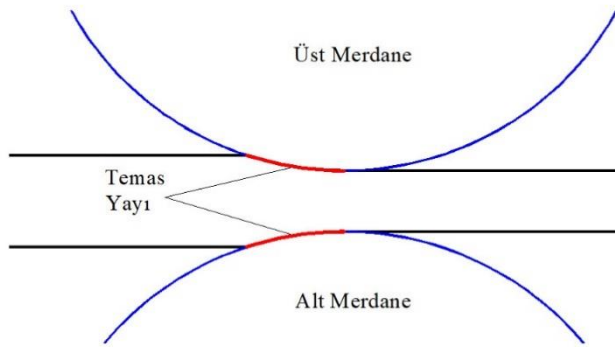
Resim 3.11. Eleman ağı oluşturulmuş bir iş parçasının görünümü

### 3.3.5. Simülasyon sonuçlarından şekillendirme enerjisinin hesaplanması

Kullanılan SEY yazılımı proses sırasında kullanılan şekillendirme enerjisi doğrudan vermemektedir. Fakat yazılım, işlem sırasında merdanelere etki eden kuvvetlerin ve torkların değişimini grafik olarak vermektedir. Bu durumda her bir paso sırasında merdanelere etki eden tork değerleri kullanılarak şekillendirme enerjileri hesaplanmıştır.

Bu çalışmada yer değiştirmenin 0,4'e ulaşması remesh kriteri olarak belirlenmiştir. Eleman ağının tekrar oluşturulması sırasında ilk başta kullanılan eleman tipi ve eleman büyüklükleri tekrar uygulanmıştır.

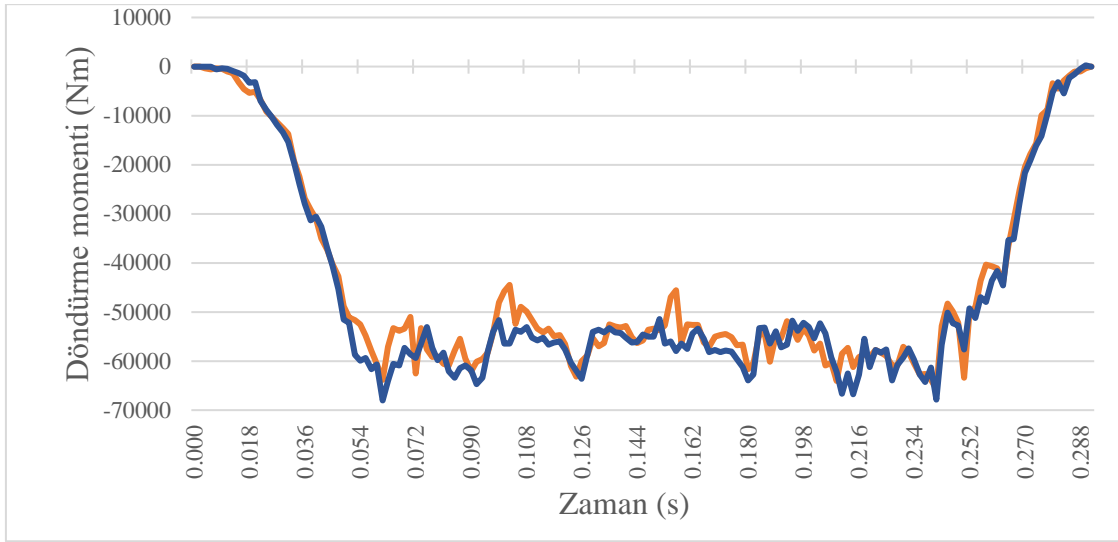
Şekil 3.4'te bir örneği verilen tork zaman grafikleri incelendiğinde grafiğin bütün tork değerlerinin negatif olduğu görülmektedir. Bu durum merdanelerin dönüş yönü ile ilgilidir ve burada önemli olan mutlak değerlerdir. Grafikte torkun mutlak değerinin belirli zaman boyunca hemen hemen sabit bir eğimle yükseliş gösterdiği, bir süre inişli çıkışlı değişim gösterdiği ve son kısımda ise yine sabite yakın bir eğimle düşüş gösterdiği tespit edilmiştir. Baş ve son kısımdaki bu eğimli bölgeler işlemin başında merdanelerin iş parçasını kapması sırasında Resim 3.12'de görülen temas yayının zamanla oluşması ve işlemin sonunda zamanla azalarak kaybolması nedeniyle meydana gelmektedir. Bu çalışmada modelleme sırasında kullanılan başlangıç kütük uzunluğunun 0,2 m gerçek uygulamalardaki uzunluğun ise 4 m ile 12 m arasında olduğu dikkate alınarak grafiğin başındaki ve sonundaki sabit eğimli kısım enerji hesaplamalarında ihmal edilmiştir. Hesaplamalarda geri kalan kısımdaki en büyük ve en küçük tork değerinin ortalaması kullanılmıştır.



Resim 3.12. Haddelme sırasında merdaneler ile iş parçası arasında oluşan temas yayı

Bir cismin potansiyel ve kinetik enerjilerinde meydana gelen değişimlerin toplamı dış etkenler tarafından o cisim üzerinde gerçekleştirilen işe eşittir (R. C. Hibbeler 2010). Merdanelere etki eden kuvvetler herhangi bir yer değiştirmeye sebep olmadığından bu kuvvetlerin yaptığı iş sıfırdır. Fakat, merdanelere etki eden döndürme momentleri (torklar) açısız bir hareket meydana getirdiği için büyüklüğü Eş. 3.2 ile hesaplanabilecek bir iş yapmış olur. Yapılan bu iş merdanelerin potansiyel veya kinetik enerjisini arttırmamaktadır. Bu durumda oluşan enerji şekillendirme için iş parçasına aktarılmaktadır.

$$U_M = M_t(\theta_2 - \theta_1) = M_t * \omega * t \text{ (R. C. Hibbeler 2010)} \quad (3.2)$$



Şekil 3.4. Modelleme ve simülasyon çalışmaları sonucu elde edilmiş örnek bir tork zaman grafiği

Burada  $M_t$  iş merdaneye etki eden döndürme momentinin (torkun) büyüklüğünü,  $(\theta_1 - \theta_2)$  açısal yer değiştirmeyi,  $\omega$  açısal hızı ve  $t$  hareket süresince geçen zamanı ifade etmektedir. İşlem sırasında iş parçasına hem üst hem alt merdane enerji aktardığı şekillendirme enerjisinin bulunması için iki merdane üzerindeki işlerin toplanması gerekir. Buradan

$$E = U_{M_u} + U_{M_a} = (M_u * \omega_u * t_u) + (M_a * \omega_a * t_a) \quad (3.3)$$

elde edilir. Bu eşitlikte  $U_{M_u}$ ,  $U_{M_a}$  sırasıyla üst ve alt merdaneler üzerine döndürme momentlerinin yaptığı işleri;  $M_u$ ,  $M_a$ ,  $\omega_u$ ,  $\omega_a$ ,  $t_u$  ve  $t_a$  ise sırasıyla üst ve alt merdanelere ait döndürme momenti, açısal hız ve zamanı ifade etmektedir. Her iki merdane için açısal hızlar ve işleme zamanları eşit olduğundan Eş. 3.3, Eş. 3.4'a dönüştürülebilir

$$E = (M_u + M_a) * \omega * t \quad (3.4)$$

Haddeleme için gereken zamanın kütük boyunun ( $l$ ) merdanenin temas yüzeyinin çizgisel hızına oranıdır. Merdane temas yüzeyi yarıçapı  $r$  ile ifade edilirse, merdanenin çizgisel hızı,

$$v = \omega * r \quad (3.5)$$

olur. Buradan işleme zamanı,

$$t = \frac{l}{v} = \frac{l}{\omega * r} \quad (3.6)$$

eşitliğiyle bulunur. Eş.ler, 3.6 ve 3.7 Eş. 3.4'te yerine konulursa şekillendirme enerjisi,

$$E = (M_u + M_a) * \omega * t = (M_u + M_a) * \omega * \frac{l}{\omega * r} = \frac{(M_u + M_a) * l}{r} \quad (3.7)$$

eşitliği ile bulunabilir.

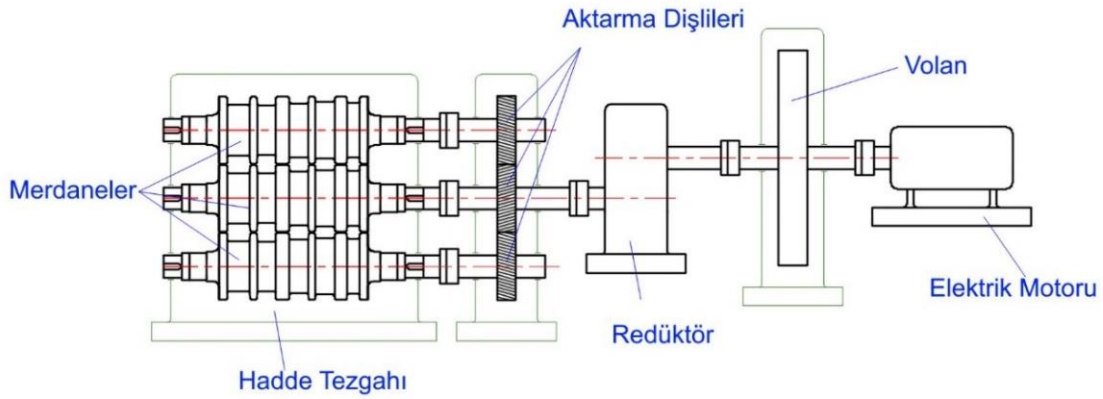
### 3.3.6. Sonlu elemanlar modellemesinin doğrulanması

Modelleme ve simülasyon işlemleri sonucunda iş parçası ile ilgili şekil, gerilme ve deformasyon durumları, sıcaklık dağılımı gibi hususlar; merdaneler ile ilgili, üzerine etki eden kuvvetler, basınç dağılımı, etki eden döndürme momentleri gibi hususlar incelenebilmektedir. Fakat bu çalışmada şekillendirme enerjisinin optimizasyonu birincil hedef olduğu için oluşturulan sonlu eleman modelinin ve yapılan simülasyonların doğrulanmasında simülasyon sonucunda bulunan şekillendirme enerjisi ile gerçek proseste kullanılan şekillendirme enerjisi karşılaştırılmıştır. Bu amaçla endüstriyel bir üretim tesisinin kaba haddeleme işlemleri SEY ile modellenmiş ve simülasyonu yapılmış, aynı zamanda bu işlem için kullanılan enerjinin tespiti için üretim tesisinde de çalışmalar yapılmıştır.

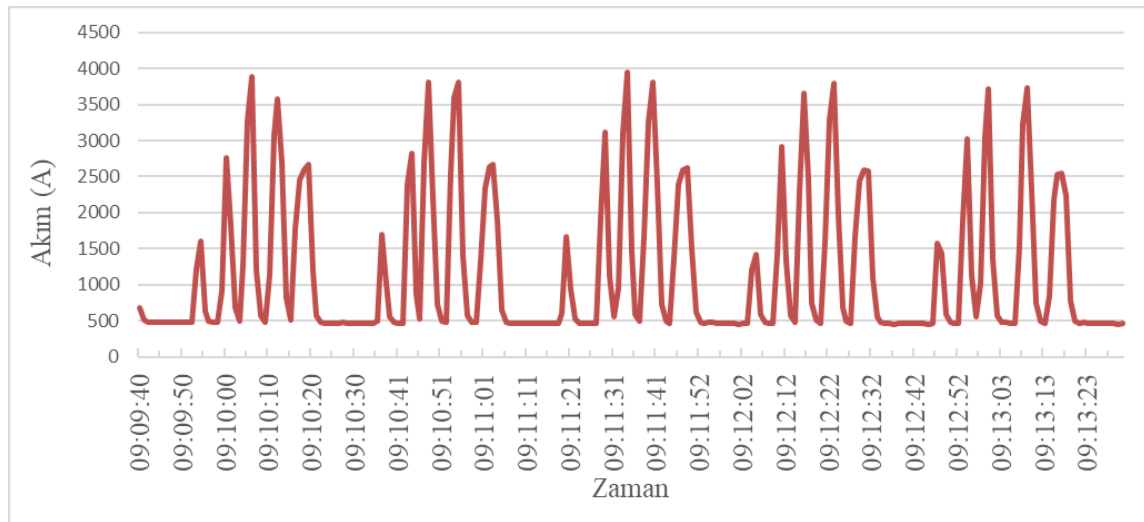
Kaba haddeleme sırasında 3 merdaneden oluşan grup, hareketini tek elektrik motorundan almaktadır. Elektrik motorundan elde edilen mekanik enerjinin merdanelere aktarımı Resim 3.13'te şematik olarak gösterilmiştir. Motorun ürettiği mekanik enerji önce bir volana, volanın hareketi de bir redüksiyona aktarılmaktadır. Redüksiyonda hızı düşürülen hareket üç merdanenin aynı hızda dönmelerini sağlayan aktarma dişlileri aracılığıyla merdanelere iletilmektedir.

Kaba haddeleme sisteminde 380 V ile çalışan 3 fazlı bir AC motor kullanılmaktadır. Şekil 3.5'te de görülebileceği gibi sistem boşta çalıştığı zamanlarda da 460 A akım çekmektedir.

Üretim tesisinde yapılan çalışmalarda haddeleme sırasında volanda meydana gelen açısal hız değişimleri de Resim 3.14'te görüldüğü gibi bir dijital devir ölçer yardımıyla tespit edilmiştir. Kullanılan devir ölçerin özellikleri çizelge 3.8'da verilmiştir



Resim 3.13. Kaba hadde tezgahında hareket aktarma sistemi



Şekil 3.5. Kaba haddelme sırasında motor tarafından çekilen akımın zaman bağılı değişimi

Elektrik motoru tarafından çekilen akımın zamanla değişimi yakından incelendiğinde, Şekil 3.6 a'da görüldüğü gibi, özellikle ikinci ile üçüncü ve üçüncü ile dördüncü pasolar arasında akım değerinin sistemin boşta çektiği akım değerine (460 A) hiç düşmediği görülmektedir. Şekil 3.6 b'de verilen volan açısal hızının zamanla değişimi akım değişimi ile birlikte incelendiğinde önce volanın hızının azaldığı sonra motor tarafından çekilen akımın artmasıyla devir sayısının varsayılan değerine çıktığı görülmektedir. Burada sistemde elektrik motoru tarafından kinetik enerjiye dönüştürülen elektrik enerjisi, volanda depolanmakta, şekillendirilme sırasında kullanılan enerji volan tarafından sağlanmaktadır. Volanın eksilen enerjisi ise elektrik motoru tarafından tamamlanmaktadır. Bir kütük işlenirken pasoları arasındaki süre (3 ile 5 saniye arası) volanın varsayılan açısal hızına (1000 dev/min) ulaşması için yeterli olmadığı için özellikle 2, 3, 4, ve 5. pasolarda kullanılan elektrik enerjisinin hangi pasolar için harcandığının tam olarak ayırt etmenin mümkün



olmadığı görülmüştür. Öte yandan her bir kütüğün işlenmesinden sonra diğer kütüğün hadde tezgâhına girmesi için geçen süre yeterli olduğu için her bir kütüğün işlenmesinde kullanılan enerjiyi hesaplamanın mümkün olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.8 Açısal hız ölçümlerinde kullanılan devir ölçerin teknik özellikleri

|                            |   |                   |
|----------------------------|---|-------------------|
| <b>Marka ve Model</b>      | Mextech 2236C                             |                   |
| <b>Tip</b>                 | Temaslı ve temassız olarak kullanılabilir |                   |
| <b>Doğruluk</b>            | ± % 0,05                                  |                   |
| <b>Örnekleme süresi</b>    | 0,8 s (60 dev/min üzerinde)               |                   |
| <b>Operasyon Sıcaklığı</b> | 0°C - 50°C                                |                   |
| <b>Ölçüm Şekli</b>         | Temaslı                                   | Temassız          |
| <b>Ölçme Aralığı</b>       | 0,5 - 19999 dev/min                       | 5 - 99999 dev/min |
| <b>Çözünürlük</b>          | 0,1 dev/ min (0,05 – 999,9 dev/min arası) | 1 dev/mim         |
|                            | 1 dev/min (1000 dev/min üzeri)            |                   |

AC elektrik motoru tarafından üretilen aktif güç Eş. 3.8 kullanılarak hesaplanmaktadır (Karl A. Seeler 2014).

$$P_a = \sqrt{3}VI \cos \theta \quad (3.8)$$

Bu eşitlikte,  $P_a$  aktif gücü,  $V$  gerilimi,  $\cos \theta$  ise güç faktörünü ifade etmektedir. Kullanılan motor için değeri 0,86'dır. Güç enerjinin zamana bağlı değişimi olduğundan;

$$P = \frac{dE}{dt} \quad (3.9)$$

eşitliği ile ifade edilir (Raymond A. Serway ve John W. Jewett 2010). Eşitliğin iki tarafının integrali alındığında;

$$E = \int P dt \quad (3.10)$$

elde edilir.



Resim 3.14. Volan açısal hızının ölçülmesi

Akımın zamana bağlı değişim grafiği, Eş. 3.8 kullanılarak Resim 3.15'teki gibi motorun ürettiği mekanik gücün zamana bağlı grafiği elde edilebilir. Resim 3.5'teki parametrik değerler Eş. 3.10'a uygulandığında;

$$E = \int_{t_n}^{t_{n+1}} P dt \quad (3.11)$$

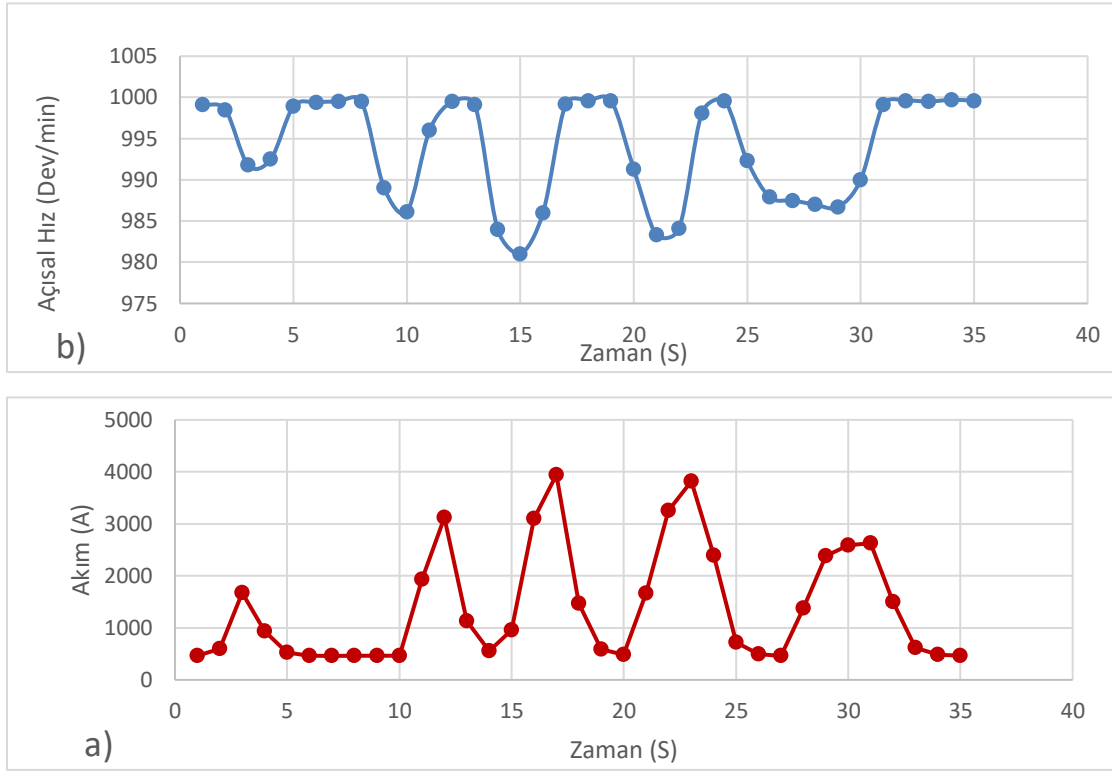
elde edilir. Bu Eş. Resim 3.15'teki güç grafiğinin  $t_n$  ve  $t_{n+1}$  zaman değerleri arasındaki kısmı ile zaman eksenini arasında kalan ve grafikte  $E_i$  olarak tanımlanan dik yamuk şeklindeki taralı alanı ifade etmektedir. Buradan iki akım ölçümü arasında kullanılan enerji eşitliği;

$$E_i = \frac{(P_n + P_{n+1})(t_{n+1} - t_n)}{2} \quad (3.12)$$

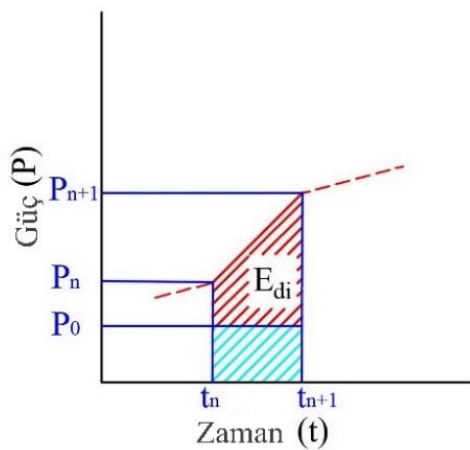
ile ifade edilebilir. Bu çalışmada incelenen tesiste sistemin boşta çalışması için çekilen akımdan (460 A) yukarıda bahsedilmişti. Bu akıma karşılık gelen aktif güç  $P_0$  ve iki akım ölçümü arasında iş parçasının deformasyonu için harcanan elektrik enerjisi  $E_{di}$  ile ifade edilirse;

$$E_{di} = \frac{(P_n + P_{n+1})(t_{n+1} - t_n)}{2} - P_0(t_{n+1} - t_n) = \left( \frac{(P_n + P_{n+1})}{2} - P_0 \right) (t_{n+1} - t_n) \quad (3.13)$$

olur.



Şekil 3.6. Bir kütüğün haddelenmesi sırasında a) motorun çektiği akımın b) volan açısal hızının zamanla değişimi



Resim 3.15. Güç-zaman grafiğinin enerji hesaplamasındaki kullanımı

### 3.3.7. ANOVA ve cevap yüzeylerinin oluşturulması

Ek-1’de verilen bağımsız değişken değer setleri kullanılarak Kısım 3.8.3’te anlatılan SEY modelleri ile simülasyon deneyleri gerçekleştirilmiş ve her deney setine karşılık gelen radyal kuvvet ( $F_r$ ), alt ve üst merdanelere etki eden toplam döndürme momentleri ( $M_t$ ) ve şekillendirme enerjileri ( $E_d$ ) tespit edilmiştir. Elde edilen bağımlı değişken değerleri aynı çizelgede listelenmiştir. Bağımsız ve bağımlı değişkenler ile ilgili özet bilgiler sırası ile Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.9’da sunulmuştur.

Çizelge 3.9. Bağımlı değişkenler (cevaplar) ile ilgili özet bilgiler

| Cevap          | Bağımlı değişken | Birimler | Gözlem sayısı | Analiz  | En düşük | En yüksek | Ortalama | Standart sapma | Oran  | Model             |
|----------------|------------------|----------|---------------|---------|----------|-----------|----------|----------------|-------|-------------------|
| R <sub>1</sub> | $M_t$            | Nm       | 144           | Polinom | 26350    | 363500    | 1,35E+05 | 68049,8        | 13,8  | İndirgenmiş Kübik |
| R <sub>2</sub> | $F_r$            | kN       | 144           | Polinom | 170      | 2650      | 947,69   | 411,2          | 15,59 | İndirgenmiş Kübik |
| R <sub>3</sub> | $E_d$            | J        | 144           | Polinom | 254125   | 1,57E+06  | 9,72E+05 | 3,50E+05       | 6,17  | İndirgenmiş Kübik |

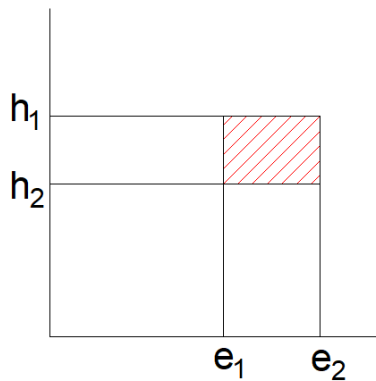
Cevap yüzeylerinin oluşturulması sırasında bağımlı ve bağımsız değişkenler -1 ve +1 arasındaki değerlerle kodlanır. İstatistiksel işlemler bu kodlanmış değerler kullanılarak gerçekleştirilir. Daha sonra hesaplama sonuçları gerçek değerlere dönüştürülür (Box ve Draper 2007). Çizelge 3.1 ve 3.9’deki en yüksek ve en düşük değerler kodlamada sırası ile +1 ve -1 değerlerine denk gelmektedir. Ara değerler ise doğrusal interpolasyon ile bulunmaktadır.

Bu çalışmada CYY ve istenirlik fonksiyonlarının uygulanmasında Design Expert ticari yazılımı kullanılmıştır. Bu aşamada  $F_r$ ,  $M_t$  ve  $E_d$  için üçüncü dereceden indirgenmiş polinomsal cevap yüzeyi oluşturulmuştur. İndirgenmiş modellerde modeli oluşturan terimlerden belirgin olmayanlar modelden çıkarılır. Bu şekilde oluşturulan yeni modelin etkinliği arttırılmış olur. Çalışmada kaçınıcı dereceden modelin seçileceğine deneme yanılma yöntemi ile karar verilmiştir.

### 3.3.8. Geliştirilen çözüm arama stratejisinin uygulanması

Bu aşamada geliştirilen istenirlik fonksiyonu temelli çözüm arama stratejisi optimum paso sırası tasarımının diğer bir ifade ile her paso için  $e_1$ ,  $h_1$ ,  $e_2$  ve  $h_2$  değerlerinin bulunması için uygulanmıştır. Bunun için stratejinin her aşamasında her faktör ( $e_1$ ,  $h_1$ ,  $e_2$  ve  $h_2$ ) ve her cevap ( $F_r$ ,  $M_t$  ve  $E_d$ ) için istenilen hedefler tanımlanmalıdır. Bu hedefler kısım 3.8.3'te bahsedilen geometrik gereklilikler, prosesin ardışık yapısı ve teknolojik kısıtlamalar tarafından belirlenmektedir. Optimizasyonun her aşamasında en yüksek istenirlik değerini veren çözüm en iyi tasarım olarak seçilmiştir.

Birinci paso için  $e_1$  ve  $h_1$  kütük başlangıç kesit ölçülerine eşittir. Diğer pasolarda ise bir önceki paso tarafından belirlenir. İstenirlik fonksiyonunu oluşturmak için  $e_2$  ve  $h_2$ 'nin maksimum ve minimum değerlerinin tanımlanması gerekir. Bütün paso optimizasyonlarında Resim 3.16'da ( $e_1$ ,  $h_1$ ) ve ( $e_2$ ,  $h_2$ ) noktaları arasında kalan taralı alanla temsil edilen bölge çözümün aranacağı bölgedir. Kısım 3.8.3'te belirtilen kural 1 ve kural 2'den dolayı  $e_2$ 'nin en küçük değeri  $e_1$ 'den büyük olmalıdır. Bundan dolayı  $e_2$ 'nin en küçük değeri  $e_1$ 'den sonraki tamsayı olarak belirlenmiştir. Yine bütün pasolar için  $h_2$ 'nin en küçük değeri 5. pasonun çıkışında istenilen iş parçası kesit ölçülerine ulaşmak için gereken en düşük yükseklik ölçüsünü sağlayacak şekilde tanımlanmıştır. Kısım 3.8.3'te belirtilen 3. kurala göre  $e_2$  ve  $h_2$ 'lerin en büyük değerleri her pasoda bir miktar kesit alanının azalmasını sağlayacak şekilde belirlenmiştir. Ayrıca kesit azalmasını en hızlı bir şekilde gerçekleştirebilmek amacıyla  $e_2$  ve  $h_2$  için optimizasyon hedefi bütün pasolarda en küçük olarak tanımlanmıştır. Son ürün kesitinin  $e_2$  ve  $h_2$  ölçülerini belirlediği 5. Paso haricindeki pasolarda bu değerler ampirik bilgiler kullanılarak belirlenmiştir.



Resim 3.16. Çözüm arama sırasında taranacak bölgenin gösterimi

Bütün pasolar için cevap değişkenlerinin, diğer bir ifade ile  $F_r$ ,  $M_t$  ve  $E_d$  değerlerinin optimizasyon hedefleri bunların minimize edilmesidir. Referans alınan endüstriyel paso tasarımlarının simülasyonlarından elde edilen minimum değerler, cevap değişkenlerinin alt limiti olarak tanımlanmıştır.  $F_r$  ve  $E_d$  için üst limit, referans paso tasarımları içinde bu değişkenler için bulunan değerlerin en büyüğüne eşit olarak tanımlanmıştır. Diğer yandan hadde tezgahının güç gereksinimini dolayısıyla da motor büyüklüğünü belirlediği için  $M_t$ , üç referans paso tasarımlarının maksimum  $M_t$  değerlerinin (124763, 144334 ve 206895 Nm) en küçüğü olarak belirlenmiştir. Bağımsız ve bağımlı değişkenlerin her paso için optimizasyon kısıtlamaları ve bunlara karşılık bulunan istenirlik değerleri Çizelge 3.10'da sunulmuştur.

İlk pasonun  $e_1$  ve  $h_1$  değerleri kütük başlangıç ölçülerine eşittir. En düşük  $e_2$ ,  $e_1$ 'den sonraki tamsayı olan 151 mm, en yüksek  $e_2$  ise iş parçasının bir sonraki pasoda da yayılacağı ve toplam yayılmanın aşırı olmasını sınırlandırmak için 161 mm olarak tanımlanmıştır. En düşük  $h_2$  yukarıda açıklandığı gibi son pasodaki en ölçüsü göz önünde bulundurularak 69 mm, en yüksek  $h_2$  ise bütün  $e_2$  alternatifleri için kesit daralmasını belirli bir düzeyde (%8) tutabilmek için 161 mm olarak tanımlanmıştır. İstenirlik fonksiyonuna  $F_r$ ,  $M_t$  ve  $E_d$  için yukarıda belirtildiği şekilde kısıtlamalar girilerek  $e_2$  ve  $h_2$  için optimum çözümler bulunur.

İlk pasoda ezilen iş parçası ikinci pasonun girdisi haline gelmektedir yani 2. pasonun  $e_1$  ve  $h_1$  ölçüleri 1. pasonun sırası ile  $e_2$  ve  $h_2$  ölçüleri ile aynıdır. Paso 2 için en küçük  $e_2$  ve  $h_2$  değerleri birinci paso ile aynı şekilde bulunur. İkinci pasonun en düşük kesit daralması yaklaşık olarak %14 olarak belirlenmiştir. Her pasoda ortaya çıkacak döndürme momenti değerlerinin biri birine yakın değerler çıkması için en düşük kesit daralması miktarları her pasoda bir miktar arttırılmıştır.

Paso 3'e girmeden önce iş parçası Resim 3.1'de gösterildiği gibi 90° döndürülür. Burada 3. pasonun  $e_1$  ve  $h_1$  ölçüleri 2. pasonun sırası ile  $h_2$  ve  $e_2$  ölçülerine eşit olur. Bu pasoda en düşük alan daralma oranı % 16 olarak belirlenmiştir. Diğer optimizasyon kriterleri ilk ve 2. paso ile aynı şekilde belirlenmiştir. Bu kriterler bütün pasolar için Çizelge 3.10'da verilmiştir.

İkinci pasoya uygulanan optimizasyon prosedürünün benzeri 4. pasoya da uygulanmıştır. Burada 2. pasodaki kriterlere ek olarak 4. pasonun  $h_2$  ölçüsü 5. pasonun  $e_1$  ölçüne

dönüşeceğiinden  $h_2$ 'nin 5. pasoya girebilecek kadar küçük olduğuna emin olmak gerekir. Bu pasoda  $h_2$  değeri oldukça düşük olması gerektiğinden en düşük alan daralma katsayısı zorunlu olarak % 21 olarak gerçekleşmiştir.

Çizelge 3.10. Optimizasyon sırasında bağımsız ve bağımlı değişkenler için belirlenen istenirlik hedefleri ve istenirlik fonksiyonu ile bulunan çözümler ve bunlara karşılık gelen istenirlik değerleri.

| Paso Numarası | Değişken | Optimizasyon hedefi | Alt limit | Üst limit | Çözüm   | İstenirlik değeri |
|---------------|----------|---------------------|-----------|-----------|---------|-------------------|
| Paso 1        | $e_1$    | Eşit                | 150       |           | -       | 0,264             |
|               | $e_2$    | En küçük            | 151       | 161       | 159,748 |                   |
|               | $h_1$    | Eşit                | 150       |           | -       |                   |
|               | $h_2$    | En küçük            | 68        | 130       | 126,122 |                   |
|               | $M_t$    | En küçük            | 61200     | 124763    | -       |                   |
|               | $F_r$    | En küçük            | 856       | 1360      | -       |                   |
| Paso 2        | $E_d$    | En küçük            | 335893    | 1,32E+06  | -       | 0,081             |
|               | $e_1$    | Eşit                | 159,748   |           | -       |                   |
|               | $e_2$    | En küçük            | 160       | 166       | 165,283 |                   |
|               | $h_1$    | Eşit                | 126,122   |           | -       |                   |
|               | $h_2$    | En küçük            | 68        | 106       | 105,938 |                   |
|               | $M_t$    | En küçük            | 61200     | 124763    | -       |                   |
| Paso 3        | $F_r$    | En küçük            | 856       | 1360      | -       | 0,138             |
|               | $E_d$    | En küçük            | 335893    | 1,32E+06  | -       |                   |
|               | $e_1$    | Eşit                | 105,938   |           | -       |                   |
|               | $e_2$    | En küçük            | 106       | 118       | 117,906 |                   |
|               | $h_1$    | Eşit                | 165,283   |           | -       |                   |
|               | $h_2$    | En küçük            | 68        | 127       | 122,168 |                   |
| Paso 4        | $M_t$    | En küçük            | 61200     | 124763    | -       | 0,26              |
|               | $F_r$    | En küçük            | 856       | 1360      | -       |                   |
|               | $E_d$    | En küçük            | 335893    | 1,32E+06  | -       |                   |
|               | $e_1$    | Eşit                | 117,906   |           | -       |                   |
|               | $e_2$    | En küçük            | 118       | 130       | 128,512 |                   |
|               | $h_1$    | Eşit                | 122,168   |           | -       |                   |
| Paso 5        | $h_2$    | En küçük            | 68        | 88        | 85,472  | 0,092             |
|               | $M_t$    | En küçük            | 61200     | 124763    | -       |                   |
|               | $F_r$    | En küçük            | 856       | 1360      | -       |                   |
|               | $E_d$    | En küçük            | 335893    | 1,32E+06  | -       |                   |
|               | $e_1$    | Eşit                | 85,472    |           | -       |                   |
|               | $e_2$    | En küçük            | 86        | 99        | 97,677  |                   |
| Paso 5        | $h_1$    | Eşit                | 128,512   |           | -       | 0,092             |
|               | $h_2$    | En küçük            | 74        | 76        | 75,903  |                   |
|               | $M_t$    | En küçük            | 61200     | 124763    | -       |                   |
|               | $F_r$    | En küçük            | 856       | 1360      | -       |                   |
|               | $E_d$    | En küçük            | 335893    | 1,32E+06  | -       |                   |
|               | $e_1$    | Eşit                | 85,472    |           | -       |                   |

İş parçası 5. pasoya girmeden önce tekrar döndürülür ve tekrar ezilir. Dördüncü pasonun en  $e_2$  ve  $h_2$  ölçüleri beşinci pasonun sırası ile  $h_1$  ve  $e_1$  ölçülerine eşit olur. Beşinci pasonun  $e_2$  ve  $h_2$  değerleri için en düşük ve en yüksek değerler bitmiş ürün için belirlenen kesit sınırlamaları ile aynıdır.

Durum çalışmasında birinci pasodan beşinci pasoya kadar tüm pasolarda ileri doğru çözüm arama sırasında uygun çözümler bulunduğu için geriye çözüm arama aşamasını uygulamaya gerek kalmamıştır.

### 3.3.9. Optimum paso tasarımının doğrulanması

İstenirlik temelli çözüm arama stratejisi kullanılarak ulaşılan optimum paso tasarımı Kısım 3.8.4 anlatılan yöntemle modellenerek simülasyonu yapılmıştır. Her pasoda kullanılan şekillendirme enerjisi kısım 3.8.5’te anlatılan yöntemle hesaplanmış ve bulunan sonuçlar referans alınan endüstriyel paso tasarımlarının simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

### 3.3.10. İkincil geometrik parametrelerin optimizasyonu

Daha önceki kısımlarda bahsedildiği gibi durum çalışması iki temel bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde geliştirilen istenirlik temelli ardışık çözüm arama stratejisi önerilen paso optimizasyon metodu ile birlikte kullanılarak kutu pasonun temel geometrik parametreleri olarak kabul edilen en ve yükseklik değerleri optimize edilmiştir. Çalışmanın ikinci kısmında ise kutu pasonun ikincil geometrik parametreleri olarak kabul edilen açı ve radyüs değerleri optimize edilmiştir.

İkincil geometrik parametreler için kullanılan optimizasyon metodu birinci bölümde kullanılan çok yakındır. Tek fark bu bölümde geliştirilen çözüm arama stratejisi yerine istenirlik fonksiyonu tek aşamada doğrudan kullanılmıştır. İkincil geometrik parametreler için kullanılan optimizasyon metodu şu aşamalardan oluşmaktadır:

#### Bağımsız (faktör) ve bağımlı (cevap) değişkenlerin belirlenmesi

Çalışmanın bu bölümünde Şekil 3.3’te gösterilen  $r_1$ ,  $r_2$  ve  $r_3$  radyüsleri ve  $\alpha$  açısı bağımsız değişkenler olarak belirlenmiştir. Bağımlı değişkenler ise önceki bölümde olduğu gibi  $F_r$ ,  $M_t$  ve  $E_d$  değerleridir. Deney tasarımında kullanılan bağımlı değişkenler ilgili özet bilgi Çizelge 3.11’de sunulmuştur. Bağımsız değişkenler için yanıt yüzeyinin alt ve üst sınırları çizelgenin “kodlanmış düşük” ve “kodlanmış yüksek” sütunlarında belirtilmiştir.



Çizelge 3.11. İkincil parametre optimizasyonu için kullanılan bağımsız değişkenler

| Faktör | Ad       | Birim | Tip     | En düşük | En yüksek | Kodlanmış düşük | Kodlanmış yüksek | Ortalama | Std. Sapma |
|--------|----------|-------|---------|----------|-----------|-----------------|------------------|----------|------------|
| A      | $\alpha$ |       | Numerik | 0        | 18        | -1 ↔ 3,00       | +1 ↔ 15,00       | 9,00     | 4,74       |
| B      | $r_3$    | mm    | Numerik | 125      | 2375      | -1 ↔ 500,00     | +1 ↔ 2000        | 1250     | 592,93     |
| C      | $r_1$    | mm    | Numerik | 1,25     | 23,75     | -1 ↔ 5,00       | +1 ↔ 20,00       | 12,50    | 5,93       |
| D      | $r_2$    | mm    | Numerik | 1,25     | 23,75     | -1 ↔ 5,00       | +1 ↔ 20,00       | 12,50    | 5,93       |

#### Deney setlerinin belirlenmesi (deney tasarımı)

Çalışmanın bu aşamasında deney setlerinin belirlenmesi için küçültülmüş merkezi birleşik tasarım (CCD) kullanılmıştır. Bu şekilde 4 faktörle cevap yüzeyini oluşturabilmek için 21 deney seti oluşturulmuştur. CCD deney setlerini oluştururken değişkenler için belirlenen -1 ve +1 olarak kodlanmış değerlerin bir artı ve eksi yönde bir miktar dışına çıkılmaktadır. Deneylerde kullanılan en düşük ve en yüksek değerler Çizelge 3.11’de “en düşük” ve “en yüksek” sütunlarında belirtilmiştir. Oluşturulan deney setleri Çizelge 3.12’te listelenmiştir.

#### Simülasyon deneylerinin gerçekleştirilmesi ve bağımlı değişkenlerin hesaplanması

CCD ile tespit edilen ve Çizelge 3.12’de listelenen açı ve radyüs kombinasyonları durum çalışmasının birinci bölümünde elde edilen optimum paso düzeninin ilk pasosuna teker teker uygulanmıştır. Bu şekilde elde edilen paso tasarımları kısım 3.8.4’te anlatılan yöntem kullanılarak modellenerek simülasyonu yapılmış ve bu şekilde radyal kuvvetler ( $F_r$ ) ve toplam döndürme momentleri ( $M_t$ ) tespit edilmiştir. Daha sonra döndürme moment değerleri kullanılarak şekillendirme enerjileri hesaplanmıştır. Elde edilen bağımlı değişken değerleri Çizelge 3.12’de listelenmiş ayrıca bağımlı değişken değerleri ile ilgili özet bilgiler Çizelge 3.13’te sunulmuştur.

#### Cevap yüzeylerinin oluşturulması

Bu aşamada bağımlı değişkenler  $M_t$  ve  $E_d$  için ikinci dereceden ve  $F_r$  üçüncü dereceden indirgenmiş polinomsal cevap yüzeyleri oluşturulmuştur. Cevap yüzeylerinin kaçınıcı dereceden olacağına daha önceki bölümde olduğu gibi deneme yanılma yöntemiyle karar verilmiştir.

Çizelge 3.12. Cevap yüzeyi oluşturmak için kullanılan deney setleri ve bunlara karşılık gelen bağımlı değişken değerleri

| <b>Deney Numarası</b> | <b><math>\alpha</math></b> | <b><math>r_3</math><br/>(mm)</b> | <b><math>r_1</math><br/>(mm)</b> | <b><math>r_2</math><br/>(mm)</b> | <b><math>F_r</math><br/>(kN)</b> | <b><math>M_t</math><br/>(Nm)</b> | <b><math>E_d</math><br/>(J)</b> |
|-----------------------|----------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| 1                     | 9                          | 125                              | 12,50                            | 12,50                            | 1581                             | 221053                           | 1,04E+06                        |
| 2                     | 18                         | 1250                             | 12,50                            | 12,50                            | 1077                             | 177391                           | 8,33E+05                        |
| 3                     | 3                          | 500                              | 5,00                             | 5,00                             | 1003                             | 88877                            | 4,17E+05                        |
| 4                     | 9                          | 1250                             | 12,50                            | 12,50                            | 942                              | 121556                           | 5,71E+05                        |
| 5                     | 9                          | 1250                             | 12,50                            | 12,50                            | 941                              | 121911                           | 5,73E+05                        |
| 6                     | 3                          | 500                              | 20,00                            | 5,00                             | 1026                             | 130061                           | 6,11E+05                        |
| 7                     | 9                          | 1250                             | 23,75                            | 12,50                            | 982                              | 112569                           | 5,29E+05                        |
| 8                     | 3                          | 2000                             | 20,00                            | 20,00                            | 906                              | 73949                            | 3,47E+05                        |
| 9                     | 9                          | 1250                             | 12,50                            | 23,75                            | 954                              | 114336                           | 5,37E+05                        |
| 10                    | 9                          | 1250                             | 12,50                            | 12,50                            | 948                              | 105056                           | 4,93E+05                        |
| 11                    | 15                         | 500                              | 5,00                             | 20,00                            | 1089                             | 167326                           | 7,86E+05                        |
| 12                    | 9                          | 1250                             | 12,50                            | 12,50                            | 946                              | 72306                            | 3,40E+05                        |
| 13                    | 0                          | 1250                             | 12,50                            | 12,50                            | 907                              | 116001                           | 5,45E+05                        |
| 14                    | 9                          | 1250                             | 1,25                             | 12,50                            | 950                              | 159565                           | 7,49E+05                        |
| 15                    | 15                         | 2000                             | 5,00                             | 5,00                             | 991                              | 159565                           | 7,49E+05                        |
| 16                    | 3                          | 2000                             | 5,00                             | 20,00                            | 981                              | 543605                           | 2,55E+06                        |
| 17                    | 15                         | 500                              | 20,00                            | 20,00                            | 1123                             | 166285                           | 7,81E+05                        |
| 18                    | 9                          | 2375                             | 12,50                            | 12,50                            | 918                              | 105796                           | 4,97E+05                        |
| 19                    | 9                          | 1250                             | 12,50                            | 1,25                             | 956                              | 110634                           | 5,20E+05                        |
| 20                    | 9                          | 1250                             | 12,50                            | 12,50                            | 941                              | 119706                           | 5,62E+05                        |
| 21                    | 15                         | 2000                             | 20,00                            | 5,00                             | 1044                             | 159922                           | 7,51E+05                        |

### İstenirlik fonksiyonu kullanılarak optimizasyonun gerçekleştirilmesi

İstenirlik fonksiyonu ile optimum tasarım değerleri bulunurken bağımlı ve bağımsız değerler için optimizasyon hedefleri ve değer aralıkları tanımlanması gerekmektedir. Radyüsler için optimizasyon hedefleri değerlerin oluşturulan cevap yüzeyinin alt ve üst sınırları aralığında (Çizelge 3.11’de “kodlanmış düşük” ve “kodlanmış yüksek” sütunu) olmasıdır. Açı için aralığın üst sınırı radyüslerle aynı şekilde belirlenmiştir. Alt sınır ise cevap yüzeyinde 3° iken çalışma sırasında aşınan kalibrelerin düzeltilmesinde zorluk çıkmaması için 5° olarak belirlenmiştir.

Çizelge 3.13. Deneyler sonucu elde edilen cevap değerleri ile ilgili özet bilgiler

| Cevap          | Değişken       | Birim | Gözlem sayısı | Analiz tipi | En Düşük | En yüksek | Ortalama | Std. Sapma | Oran | Model             |
|----------------|----------------|-------|---------------|-------------|----------|-----------|----------|------------|------|-------------------|
| R <sub>1</sub> | E <sub>d</sub> | Joule | 21            | Polinom     | 339560   | 2,55E+06  | 7,04E+05 | 4,57E+05   | 7,52 | Karesel           |
| R <sub>2</sub> | M <sub>t</sub> | Nm    | 21            | Polinom     | 72305,5  | 543605    | 1,50E+05 | 97311,92   | 7,52 | Karesel           |
| R <sub>3</sub> | F <sub>r</sub> | kN    | 21            | Polinom     | 906      | 1581      | 1009,81  | 143,98     | 1,75 | İndirgenmiş kübik |

Bağımlı değişkenler için optimizasyon hedefi ise bunların en düşük olması olarak tanımlanmıştır. Bunlar için alt sınır deney setlerinde elde edilen en küçük değerler, üst sınır ise optimizasyon yapılmadan önceki değerler olarak tanımlanmıştır. Tüm değişkenler için optimizasyon hedefleri Çizelge 3.14’ te sunulmuştur.

Çizelge 3.14. İkinci geometrik parametre optimizasyonunda tanımlanan hedefler

| Değişken       | Optimizasyon hedefi | Alt sınır | Üst sınır |
|----------------|---------------------|-----------|-----------|
| $\alpha$       | Aralıkta            | 5         | 15        |
| r <sub>3</sub> | Aralıkta            | 500       | 2000      |
| r <sub>1</sub> | Aralıkta            | 5         | 20        |
| r <sub>2</sub> | Aralıkta            | 5         | 20        |
| E <sub>d</sub> | En düşük            | 339560    | 433000    |
| M <sub>t</sub> | En düşük            | 72305,5   | 92206     |
| F <sub>r</sub> | En düşük            | 906       | 958       |

### İkincil geometrik parametre optimizasyonun doğrulanması

Radyüs ve açı optimizasyonu sonucunda tespit edilen tasarım değerleri durum çalışmasının birinci bölümünde elde edilen optimum paso düzenindeki 5 pasoya uygulanarak yeni tasarımlar oluşturulmuştur. Elde edilen bu yeni paso tasarımlarının SEY modellemesi ve simülasyonları gerçekleştirilerek yeni pasolar için  $F_r$ ,  $M_t$  ve  $E_d$  değerleri tespit edilmiştir. Bu değerler radyüs ve açı optimizasyonu yapılmamış pasolarinkiler ile karşılaştırılarak bu aşamada yapılan çalışmanın etkinliği doğrulanmıştır.



## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde gerçekleştirilen kaba haddeleme paso düzeni optimizasyonu sırasında elde edilen bulgular sunulacaktır. Çalışmanın birinci kısmında istenirlik temelli çözüm arama stratejisi ve önerilen paso optimizasyon metodu için durum çalışması olarak paso tasarımında birincil geometrik parametreleri olarak kabul edilen  $e_1$ ,  $h_1$ ,  $e_2$  ve  $h_2$  değerlerinin optimizasyonu yapılmıştır. İkinci kısımda ise ikincil geometrik parametreler olarak kabul edilen radyüs ve açı değerlerinin optimizasyonu istenirlik fonksiyonları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

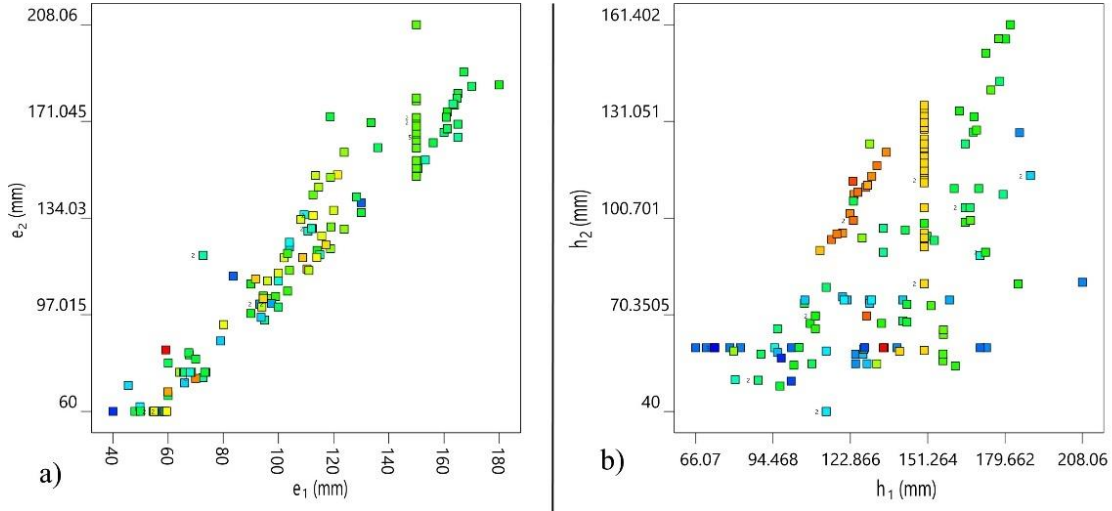
### 4.1. Durum Çalışmasından Elde Edilen Bulgular

#### 4.1.1. Deneyleerde kullanılan bağımsız değişken değerleri

Optimum çözümlerin bulunmasında kullanılacak olan cevap yüzeylerini oluşturmak için bağımlı değişkenlerin uygun kombinasyonlarının belirlenmesi ve bu değişken setlerine karşılık gelen cevapların bulunması gerekmektedir. Cevap yüzey yönteminde çoğu zaman değişik deney tasarımları kullanılmaktadır. Kısım 3.8.3'te izah edildiği gibi bu çalışmada deney tasarım yöntemleri uygulanamadığı için varsayımsal paso seti tasarımları ve endüstriyel uygulamalardan elde edilen veriler kullanılarak Ek-1'de listelenen 144 adet paso tasarımı oluşturulmuştur. Sonrasında bu değişken değerleri kullanılarak simülasyon deneyleri gerçekleştirilerek bağımlı değişkenlerin değerleri tespit edilmiştir.

Resim 4.1. a ve b'de sırası ile deneyleerde kullanılan  $e_1$ ,  $e_2$  ve  $h_1$ ,  $h_2$  değerlerinin dağılımı gösterilmiştir. Resim 4.1. a) incelendiğinde  $e_1$  değerlerinin 80 mm ve 135 mm etrafındaki bölgeler haricinde oldukça homojen bir şekilde dağıldığı görülebilir. Yine  $e_2$  değerlerinin dağılımı incelendiğinde 90 mm etrafındaki bölge haricinde homojen bir dağılım gerçekleşmiştir. Homojenliğin zayıf olduğu bölgeler de oransal olarak seyrek olsa da yeterince temsil edilmektedir. Paso sırası tasarımlarının genelinde kütük başlangıç ölçüleri 150 mm x 150 mm olduğundan  $e_1$  değerleri nispeten bu değerde yoğunlaşmıştır. Benzer şekilde varsayımsal paso tasarımlarında son ürün ölçüleri 60 mm x 60 mm olduğu için  $e_2$  değerleri bu bölgede nispeten yoğunlaşmıştır.

Resim 4.1. b incelendiğinde  $h_1$  değerlerinin oldukça homojen bir şekilde dağıldığı,  $h_2$  'değerleri ise 85 mm bölgesi haricinde homojen bir yapı göstermektedir. Hariç tutulan  $h_2$ 'nin 85 mm civarında olduğu bölgede ise nispeten seyrek olsa da temsil eden noktalar yeterlidir. Varsayımsal paso sırası tasarımlarındaki iş parçasının başlangıç ölçüsüne denk geldiği  $h_1$  değerleri için 150 mm hizasında yoğunlaşmıştır. Benzer şekilde varsayımsal paso tasarımlarında iş parçasının son ölçüsü olduğu için  $h_2$  değerleri 60 mm'de yoğunlaşmıştır.



Resim 4.1. Simülasyon deneylerinde kullanılan a)  $e_1$ ,  $e_2$  değerlerinin ve b)  $h_1$ ,  $h_2$  değerlerinin dağılımları

#### 4.1.2. Simülasyon deneylerinde kullanılan sonlu elemanlar yönteminin ve şekillendirme enerjisi hesaplamalarının doğrulanması

Çizelge 3.1'de listelenen deney setleri Kısım 3.8.4'de anlatıldığı şekilde modellenerek SEY simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonlar sonucunda elde edilen radyal kuvvetler ve döndürme momentleri Ek-1'de listelenmiştir. Şekillendirme enerjisi değerleri ise döndürme moment değerleri kullanılarak Kısım 3.8.5'te anlatıldığı gibi hesaplanarak yine aynı tabloda listelenmiştir.

Referans olarak kullanılan endüstriyel üretim tesislerinin birisinin kaba haddelme standında çalışmalar gerçekleştirilmiş ve kütüklerin haddelenmesi sırasında kullanılan elektrik enerjisi Kısım 3.8.6'da anlatıldığı gibi hesaplanmıştır. Çizelge 4.1'de herhangi bir kütüğün işlenmesi sırasında kullanılan elektrik enerjisi kullanımı ile ilgili değerler sunulmuştur.

Çizelge 4.1. Bir kütüğün işlenmesi sırasında ortaya çıkan akım ve bunlara karşılık gelen güç ve enerji değerleri

| Zaman<br>(s)         | Akım<br>I<br>(A) | Güç<br>P<br>(W) | Zaman<br>aralığı<br>(s) | Elektrik<br>enerjisi<br>E<br>(J) | Şekillendirme<br>enerjisi<br>E <sub>d</sub><br>(J) |
|----------------------|------------------|-----------------|-------------------------|----------------------------------|--|
| 0                    | 458              | 2,59E+05        | -                       | -                                | -  |
| 1                    | 455              | 2,58E+05        | 0-1                     | 2,58E+05                         | 3,68E+03   |
| 2                    | 458              | 2,59E+05        | 1-2                     | 2,58E+05                         | 3,68E+03   |
| 3                    | 1604             | 9,08E+05        | 2-3                     | 5,84E+05                         | 3,29E+05   |
| 4                    | 2395             | 1,36E+06        | 3-4                     | 1,13E+06                         | 8,77E+05   |
| 5                    | 873              | 4,94E+05        | 4-5                     | 9,25E+05                         | 6,70E+05   |
| 6                    | 514              | 2,91E+05        | 5-6                     | 3,93E+05                         | 1,38E+05   |
| 7                    | 471              | 2,67E+05        | 6-7                     | 2,79E+05                         | 2,41E+04   |
| 8                    | 461              | 2,61E+05        | 7-8                     | 2,64E+05                         | 9,06E+03   |
| 9                    | 1888             | 1,07E+06        | 8-9                     | 6,65E+05                         | 4,10E+05   |
| 10                   | 3074             | 1,74E+06        | 9-10                    | 1,40E+06                         | 1,15E+06   |
| 12                   | 1293             | 7,32E+05        | 10-11                   | 1,24E+06                         | 9,81E+05   |
| 13                   | 563              | 3,19E+05        | 11-12                   | 5,25E+05                         | 2,71E+05   |
| 14                   | 1204             | 6,81E+05        | 12-13                   | 5,00E+05                         | 2,45E+05   |
| 15                   | 3264             | 1,85E+06        | 13-14                   | 1,26E+06                         | 1,01E+06   |
| 16                   | 4066             | 2,30E+06        | 14-15                   | 2,07E+06                         | 1,82E+06   |
| 17                   | 1840             | 1,04E+06        | 15-16                   | 1,67E+06                         | 1,42E+06   |
| 17                   | 661              | 3,74E+05        | 16-17                   | 7,08E+05                         | 4,53E+05   |
| 19                   | 474              | 2,68E+05        | 17-18                   | 3,21E+05                         | 6,65E+04   |
| 20                   | 2061             | 1,17E+06        | 18-19                   | 7,17E+05                         | 4,63E+05   |
| 21                   | 3442             | 1,95E+06        | 19-20                   | 1,56E+06                         | 1,30E+06   |
| 22                   | 3831             | 2,17E+06        | 20-21                   | 2,06E+06                         | 1,80E+06   |
| 23                   | 2809             | 1,59E+06        | 21-22                   | 1,88E+06                         | 1,62E+06   |
| 24                   | 880              | 4,98E+05        | 22-23                   | 1,04E+06                         | 7,89E+05   |
| 25                   | 510              | 2,89E+05        | 23-24                   | 3,93E+05                         | 1,39E+05   |
| 26                   | 455              | 2,58E+05        | 24-25                   | 2,73E+05                         | 1,84E+04   |
| 27                   | 464              | 2,63E+05        | 25-26                   | 2,60E+05                         | 5,38E+03   |
| 28                   | 1647             | 9,32E+05        | 26-27                   | 5,97E+05                         | 3,43E+05   |
| 29                   | 2206             | 1,25E+06        | 27-28                   | 1,09E+06                         | 8,36E+05   |
| 30                   | 2364             | 1,34E+06        | 28-29                   | 1,29E+06                         | 1,04E+06   |
| 31                   | 2429             | 1,37E+06        | 29-30                   | 1,36E+06                         | 1,10E+06   |
| 32                   | 1417             | 8,02E+05        | 30-21                   | 1,09E+06                         | 8,34E+05   |
| 33                   | 605              | 3,42E+05        | 31-32                   | 5,72E+05                         | 3,18E+05   |
| <b>Toplam Enerji</b> |                  |                 | <b>0-32</b>             | <b>2,89E+07</b>                  | <b>2,05E+07</b>                                    |

Bu çizelgede ilk sütun işlemin başladığı andan itibaren geçen zamanı saniye olarak göstermektedir. İkinci sütunda ilgili zamanda ölçülen akım değeri, üçüncü sütunda bu akım değerine karşılık gelen elektriksel güç değerleri verilmiştir. Dördüncü sütunda 1 saniye olarak belirlenmiş zaman aralıkları ve sonraki sütunlarda bu zaman aralıklarında meydana gelen sırası ile toplam elektrik enerji sarfiyatı ve şekillendirme için kullanılan elektrik

enerjisi Joule cinsinden listelenmiştir. “Elektrik enerjisi” başlıklı 5. sütunda ilgili zaman aralığı için elektrik motorunun çektiği elektrik enerjisi miktarı verilmiştir. “Şekillendirme enerjisi” başlıklı 6. sütunda enerji miktarı hesaplanırken anlık akım değerinden elektrik motorunun boşta çektiği akım düşülerek hesaplanmıştır.

Bu çizelgedeki toplam enerji değeri başlangıç uzunluğu 4 m olan bir kütüğün şekillendirilmesi için harcanan enerjiyi göstermektedir. Çizelge 4.2’de bu kaba haddelme işleminde ilenen 1 m başlangıç uzunluğuna sahip kütüğün kullandığı şekillendirme enerjisi değerleri sunulmuştur.

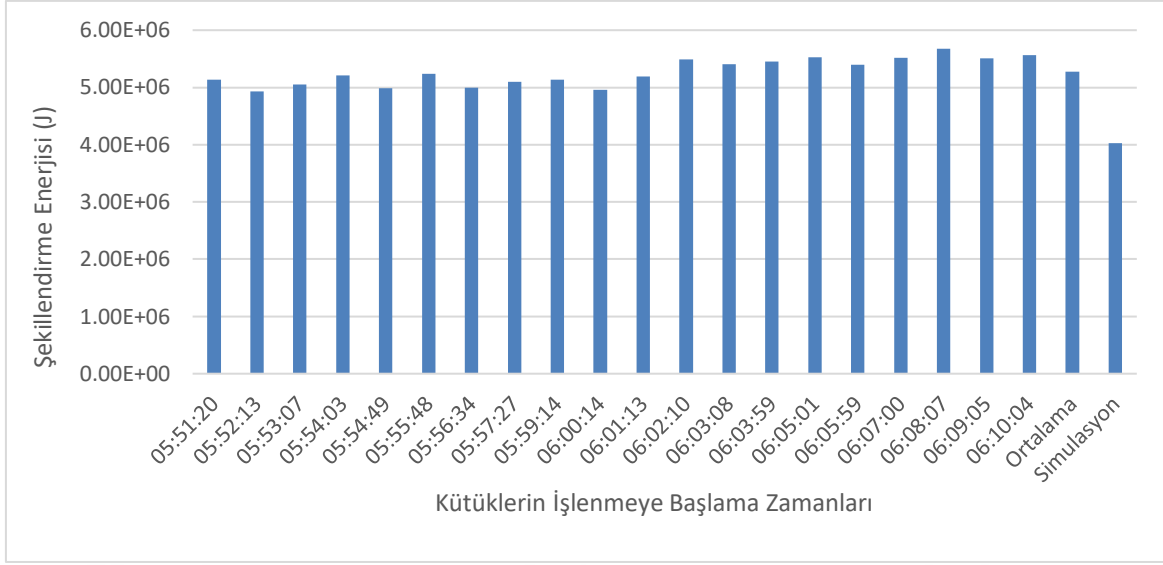
Çizelge 4.2. Doğrulama için kullanılan paso tasarımının simülasyonundan elde edilen şekillendirme enerjisi değerleri

| Paso                 | e <sub>1</sub> | e <sub>2</sub> | h <sub>1</sub> | h <sub>2</sub> | Şekillendirme enerjisi (j) |
|----------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------------------|
| P1                   | 150            | 165            | 150            | 124            | 3,36E+05                   |
| P2                   | 165            | 170            | 124            | 100            | 6,24E+05                   |
| P3                   | 100            | 113            | 170            | 110            | 9,31E+05                   |
| P4                   | 113            | 130            | 110            | 70             | 9,46E+05                   |
| P5                   | 70             | 80             | 130            | 74             | 1,19E+06                   |
| <b>Toplam Enerji</b> |                |                |                |                | <b>4,03E+06</b>            |

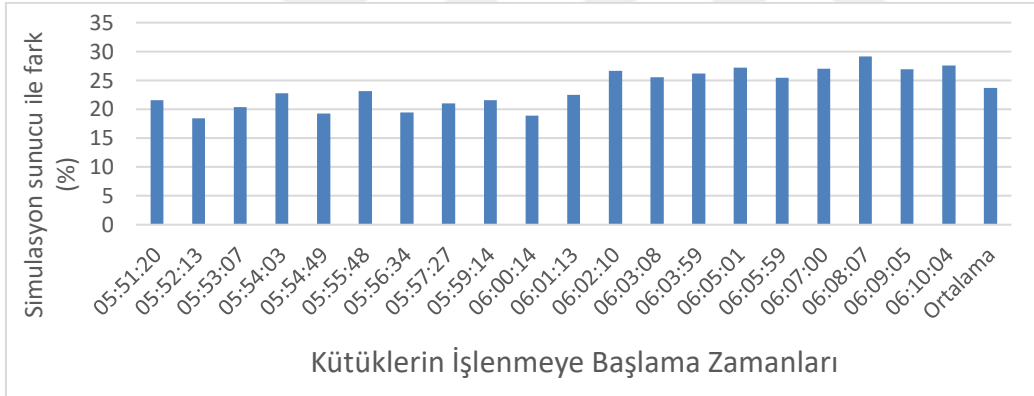
Simülasyon sonuçları ile karşılaştırmak amacı ile art arda 20 kütüğün 1 m uzunluğunun işlenmesi için kullanılan elektrik enerjileri hesaplanmış ve simülasyondan elde edilen sonuçla birlikte Şekil 4.1’de grafik olarak sunulmuştur. Listelenen kütükler için en düşük ve en yüksek enerji kullanımları sırası ile 4,93E+06 J ve 5,56E+06 J olarak tespit edilmiştir. Bunların ortalama değeri ise 5,27E+06 J olarak hesaplanmıştır.

Her bir kütük için elektriksel değerlerden ve simülasyondan elde edilen enerji değerleri arasındaki oransal farklar Şekil 4.2’de sunulmuştur. Bu oransal farkların en küçüğü % 18,40; en büyüğü % 29,10 ve ortalaması % 23,67 olarak tespit edilmiştir. Simülasyonlardan elde edilen sonuçlar tamamen ideal şartlardaki durumu temsil etmektedir. Endüstriyel verilerden elde edilen sonuçlarda ise sıcaklığın istenmeyen derecelere düşmesi veya bölgesel soğumalar, malzeme sıkışmaları, işçilik hataları gibi ideal şartlardan sapmaların etkisinin olumsuz yönde yani ölçülen enerji değerini arttıracak şekilde olması beklenir. Bu sebepten dolayı karşılaştırmada ölçülen enerji değerlerinden en düşük olanın dikkate alınması gerekir.





Şekil 4.1. Kütükler için endüstriyel verilerden hesaplanan ve simülasyon sonuçlarından elde edilen 1 m başlangıç uzunluğundaki malzemenin şekillendirilmesi için gereken enerji değerleri



Şekil 4.2. Simülasyondan elde edilen şekillendirme enerjisi ile her bir kütük için harcanan elektrik enerjisi arasındaki oransal fark

Çalışmada ölçülen elektriksel enerji malzemenin şekillendirilmesi dışında elektriksel kayıplar, kaplinlerden, redüksiyondan, aktarma dişlilerinden ve yataklardan kaynaklanan kayıpları içermektedir. Bu çalışmada endüstriyel ölçümlerden elde edilen ve simülasyon sonucunda bulunan enerji değerleri arasındaki farkların en düşük ve ortalama değerleri düşünüldüğünde bunların makul seviyede olduğu değerlendirilmiştir.

Bu değerlendirmeler ışığında simülasyondan elde edilen enerji değerinin gerçek prosesi yeterli derecede temsil ettiği sonucuna varılmıştır.

### 4.1.3. ANOVA ve cevap yüzeyleri

Cevap yüzeylerinin oluşturulması öncesinde her bağımlı değişken için deneme yanılma işlemleri gerçekleştirilerek oluşturulacak cevap yüzeyinin kaçınıcı dereceden olacağı belirlenmiştir. Bu çalışmada üçüncü dereceden polinomsal regresyon modelleri kullanılmıştır. İlk model oluşturulduktan sonra etkisi belirgin olmayan terimler modelden çıkartılarak indirgenmiş modeller oluşturulmuştur.

#### Radyal kuvvetler ( $F_r$ ) için cevap yüzeyi

Radyal kuvvetler için oluşturulmuş üçüncü dereceden indirgenmiş ANOVA sonuçları Çizelge 4.3'te sunulmuştur. Serbestlik derecesi genel anlamda herhangi bir unsurun taşıdığı biri birinden bağımsız olarak değişebilen bilgi sayısını ifade eder. Çizelgede modelin serbestlik derecesinin 21 olması modelde birbirinden bağımsız 21 terim olduğunu ifade etmektedir. F değerinin anlamlı olup olmadığı güvenilirlik aralıklarına bağlı olarak tablolarda yayınlanmıştır (Dinov, 2020). P değeri yeterince küçük ise (model için  $p < 0,05$ ) ilgili birim anlamlıdır. Burada F değerinin 77, p değerinin 0,0001'den küçük olması modelin anlamlı olduğunu gösterir (Halim ve diğerleri, 2020; Myers ve diğerleri, 2016; Sharifi ve diğerleri, 2020).

Çizelge 4.3'te  $e_1, e_2, e_2h_1$  terimlerinin p değerleri 0,1'ten büyük olması nedeniyle bu terimler modelde "anlamlı" değildir. Fakat hiyerarşinin korunması için diğer bir ifade ile bu terimler istatistiksel olarak anlamlı terimler tarafından içerildiği için bu terimler de modele dahil edilmiştir. Uyum eksikliği model tahminlerinin gözlem değerlerinden sapma miktarı ile ilgilidir. Uyum eksikliğin p değeri 0,6543 olarak bulunduğu için modelde anlamlı bir uyum eksikliği bulunmadığı anlaşılmaktadır.

Çizelge 4.4'te regresyon katsayısı ( $R^2$ ) ilgili değerler verilmektedir.  $R^2, x_1, x_2, \dots, x_k$  gibi regresörlerin kullanımıyla cevap değişkenliği farklılıklarındaki azalmanın bir ölçüsüdür. Buradaki 0,9298 olan  $R^2$  değeri regresyon modelinin  $F_r$ 'deki değişiminin yaklaşık %92,98'ini açıkladığını gösterir. Bu değer yeterli bir güvenilirlik seviyesi sağlamaktadır (Amirov ve Vakhshouri, 2020; Moghaddas, 2021).

Çizelge 4.3. F<sub>r</sub> için ANOVA sonuçları tablosu

| Kaynak  | Kareler Toplamı | Serbestlik derecesi | Ortalama Kareler | F-değeri | p-değeri |               |
|---|-----------------|---------------------|------------------|----------|----------|---------------|
| <b>Model</b>  | 2,25E+07        | 21                  | 1,07E+06         | 77       | < 0,0001 | Anlamlı       |
| <b>e<sub>1</sub></b>                                      | 710,2           | 1                   | 710,2            | 0,0511   | 0,8216   | Anlamlı değil |
| <b>e<sub>2</sub></b>                                      | 33231,44        | 1                   | 33231,44         | 2,39     | 0,1247   | Anlamlı değil |
| <b>h<sub>1</sub></b>                                      | 1,85E+05        | 1                   | 1,85E+05         | 13,34    | 0,0004   |               |
| <b>h<sub>2</sub></b>                                      | 3,12E+05        | 1                   | 3,12E+05         | 22,43    | < 0,0001 |               |
| <b>e<sub>1</sub>e<sub>2</sub></b>                         | 87821,69        | 1                   | 87821,69         | 6,32     | 0,0133   |               |
| <b>e<sub>1</sub>h<sub>1</sub></b>                         | 3,18E+05        | 1                   | 3,18E+05         | 22,84    | < 0,0001 |               |
| <b>e<sub>1</sub>h<sub>2</sub></b>                         | 3,69E+05        | 1                   | 3,69E+05         | 26,51    | < 0,0001 |               |
| <b>e<sub>2</sub>h<sub>1</sub></b>                         | 1392,79         | 1                   | 1392,79          | 0,1002   | 0,7522   | Anlamlı değil |
| <b>e<sub>2</sub>h<sub>2</sub></b>                         | 1,04E+05        | 1                   | 1,04E+05         | 7,47     | 0,0072   |               |
| <b>h<sub>1</sub>h<sub>2</sub></b>                         | 82204,98        | 1                   | 82204,98         | 5,91     | 0,0165   |               |
| <b>e<sub>1</sub><sup>2</sup></b>                          | 1,24E+05        | 1                   | 1,24E+05         | 8,91     | 0,0034   |               |
| <b>e<sub>2</sub><sup>2</sup></b>                          | 74709,48        | 1                   | 74709,48         | 5,37     | 0,0221   |               |
| <b>h<sub>2</sub><sup>2</sup></b>                          | 77126,86        | 1                   | 77126,86         | 5,55     | 0,0201   |               |
| <b>e<sub>1</sub>e<sub>2</sub>h<sub>1</sub></b>            | 75106,12        | 1                   | 75106,12         | 5,4      | 0,0218   |               |
| <b>e<sub>1</sub>e<sub>2</sub>h<sub>2</sub></b>            | 61380,67        | 1                   | 61380,67         | 4,41     | 0,0377   |               |
| <b>e<sub>1</sub>h<sub>1</sub>h<sub>2</sub></b>            | 1,04E+05        | 1                   | 1,04E+05         | 7,44     | 0,0073   |               |
| <b>e<sub>1</sub><sup>2</sup>h<sub>1</sub></b>             | 54796,58        | 1                   | 54796,58         | 3,94     | 0,0494   |               |
| <b>e<sub>1</sub><sup>2</sup>h<sub>2</sub></b>             | 69868,63        | 1                   | 69868,63         | 5,03     | 0,0268   |               |
| <b>e<sub>1</sub><sup>2</sup>h<sub>2</sub><sup>2</sup></b> | 2,89E+05        | 1                   | 2,89E+05         | 20,75    | < 0,0001 |               |
| <b>e<sub>2</sub><sup>2</sup>h<sub>2</sub></b>             | 52694,52        | 1                   | 52694,52         | 3,79     | 0,0539   |               |
| <b>e<sub>2</sub><sup>3</sup></b>                          | 69519,94        | 1                   | 69519,94         | 5        | 0,0272   |               |
| <b>Uyum eksikliği</b>                                     | 1,57E+06        | 114                 | 13782,59         | 0,8814   | 0,6543   | Anlamlı değil |

Çizelge 4.4. Fr regresyon modeli için uyum istatistikleri

| Std, sapma    | Ortalama | C,V, % | R <sup>2</sup> | Düzeltilmiş R <sup>2</sup> | Tahmini R <sup>2</sup> | Yeterlilik hassasiyeti |
|---------------|----------|--------|----------------|----------------------------|------------------------|------------------------|
| <b>117,92</b> | 947,69   | 12,44  | 0,9298         | 0,9178                     | 0,8934                 | 49,3524                |

Diğer yandan R<sup>2</sup> değerinin yüksek olması her zaman regresyon modelinin iyi olduğu anlamına gelmez. Değişkenin istatistiksel olarak anlamlı olmasına bakılmaksızın modele yeni değişken eklenmesi daima R<sup>2</sup> değerini artırır. Bu sebeple yüksek R<sup>2</sup> değerine sahip modellerin yeni deneylerin veya ortalamanın tahmininde zayıf kalması mümkündür bu nedenle çoğu istatistik uygulamalarında R<sup>2</sup> ile birlikte veya yerine düzeltilmiş R<sup>2</sup> (R<sup>2</sup><sub>adj</sub>) kullanılır. Modelin doğruluğunu artırmak için gerekli bir terim eklendiğinde R<sup>2</sup><sub>adj</sub> değeri yükselir, gereksiz bir terim eklendiğinde ise bu terim düşer. İyi bir modelde R<sup>2</sup> ve R<sup>2</sup><sub>adj</sub>

değerlerinin birbirine yakın olması beklenir. Çizelge 4.4'te  $R^2_{adj}$  değeri 0.9178 olarak belirlenmiştir (Amirov ve Vakhshouri 2020; Myers ve diğerleri 2016).

Bunların yanında bir de regresyon modelinin tahmin yeteneğinin bir göstergesi olarak tahmini  $R^2$  ( $R^2_{pred}$ ) istatistiği oluşturulmuştur. Bu istatistik sayesinde modelin aşırı uydurulmuş (overfitted) olup olmadığı kontrol edilebilmektedir. Aşırı uydurulmuş olma durumu modelin sadece örnek veriye uyacak şekilde oluşturulmasıdır. Bu durum regresyon modelinin örnek veriler dışında cevapları tahmin edememesi sonucunu doğurur. Çizelge 4.4'te  $R^2_{pred}$  değeri 0.8934 olarak listelenmiştir.  $R^2_{pred}$  ve  $R^2_{adj}$  değerleri birbirlerinin %80'i içerisinde kaldığı için uyum kabul edilebilir seviyededir.

Çizelge 4.4'te bulunan yeterli hassasiyet (adequate precision) değeri sinyal/gürültü oranının bir göstergesidir ve 4'ten büyük olması model hassasiyeti için yeterli görülmektedir. Durum çalışmasında  $F_r$  modeli için yeterli hassasiyet değeri 49,35 olarak bulunmuştur. Bu değer modelin yeterince hassas olduğunu gösterir (Mohammed, Zhang ve Kovacevic, 2020; Waseem ve diğerleri, 2020; Widyaningsih ve diğerleri, 2018).

Çizelge 4.5'te kodlanmış ve gerçek faktörler için denklem katsayıları listelenmiştir. Kodlanmış faktörler cinsinden katsayıların mutlak değeri o terimin matematiksel model içindeki bağıl ağırlığını göstermektedir. Çizelge incelendiğinde  $F_r$ 'yi en fazla etkileyen dört terim sırası ile  $e_1e_2h_2$ ,  $e_1e_2$ ,  $e_1^2h_2$  ve  $e_1^2$  olarak görülmektedir. Çizelgede “gerçek faktörler için katsayı” sütunu modelin terimleri ile birlikte  $F_r$  için matematik modeli oluşturmaktadır. Buradan,

$$F_r = -29.44e_1 + 83.31e_2 + 33.33h_1 - 6.59h_2 + 0.17e_1e_2 - 0.18e_1h_1 - 0.07e_1h_2 - 0.45h_1h_2 + 0.10e_1^2 - 0.50h_2^2 + 0.003e_1e_2h_1 - 0.01e_1e_2h_2 - 0.003e_1h_1h_2 - 0.002e_1^2h_1 + 0.008e_1^2h_2 - 0.004e_1h_2^2 + 0.006e_2^2h_2 + 0.0005e_2^3 - 2915.01 \quad (4.1)$$

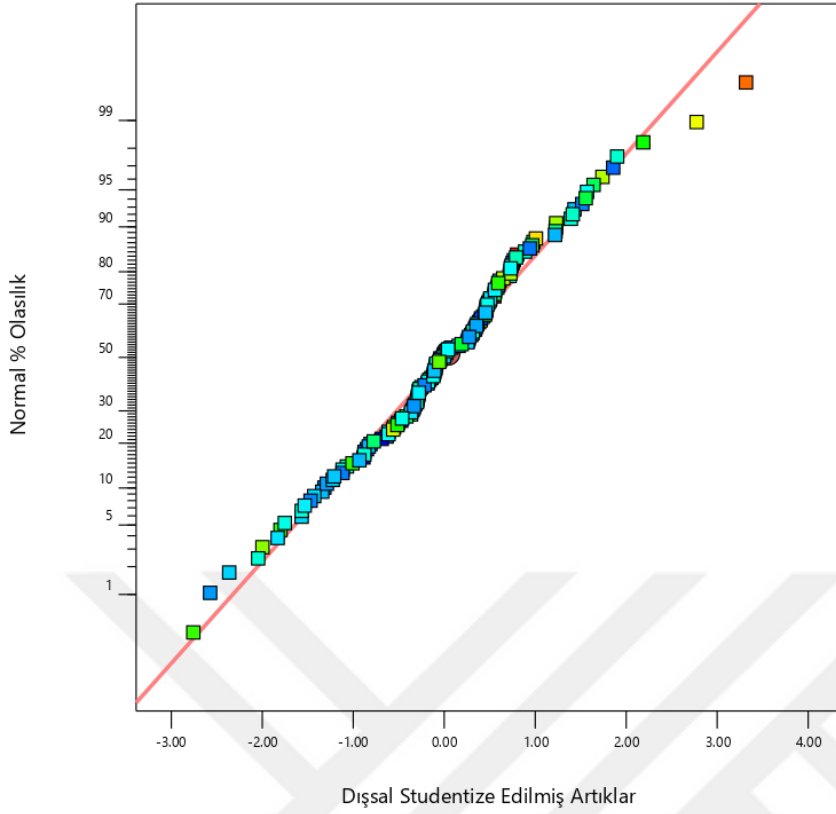
Modelin yeterlilik kontrolünün sonraki aşaması artık dağılım grafikleridir. Burada “artık” ifadesi bir cevap değişkeninin deneyle gözlenen ve regresyon modeli ile tahmin edilen değerleri arasındaki farktır (Halim ve diğerleri 2020). Fakat burada artıkların modele doğrudan bağlı olması problemi ortaya çıkmaktadır. Diğer bir ifade ile model değişirse artıklar da değişmektedir. Bu problemlerin üzerinden gelinmesi için artıkların standardize edilme şekilleri geliştirilmiştir. Bu standardizasyon şekillerinden en fazla önerileni

literatürde dışsal studentize etmek olarak (external studentization) olarak ifade edilen işlemdir (Myers ve diğerleri 2016; Vining 2010; Yandell 2017).

Çizelge 4.5.  $F_r$  cevap modeli için kodlanmış ve gerçek değerler cinsinden denklem katsayıları

| <b>Faktör</b>                                    | <b>Kodlanmış Faktörler İçin Katsayı</b> | <b>Gerçek Faktörler İçin Katsayı</b> |
|--|---|--------------------------------------|
| <b>Sabit</b>                                     | 853.64                                  | -2915.00666                          |
| <b>e<sub>1</sub></b>                             | 61.70                                   | -29.44102                            |
| <b>e<sub>2</sub></b>                             | 360.87                                  | 83.30774                             |
| <b>h<sub>1</sub></b>                             | 379.54                                  | 33.32827                             |
| <b>h<sub>2</sub></b>                             | -447.97                                 | -6.58642                             |
| <b>e<sub>1</sub> e<sub>2</sub></b>               | -3669.32                                | 0.16665                              |
| <b>e<sub>1</sub> h<sub>1</sub></b>               | 1567.17                                 | 0.17518                              |
| <b>e<sub>1</sub> h<sub>2</sub></b>               | -2178.64                                | -0.07481                             |
| <b>e<sub>2</sub> h<sub>1</sub></b>               | -106.88                                 | -0.40129                             |
| <b>e<sub>2</sub> h<sub>2</sub></b>               | 924.39                                  | -0.03550                             |
| <b>h<sub>1</sub> h<sub>2</sub></b>               | -364.80                                 | -0.44576                             |
| <b>e<sub>1</sub><sup>2</sup></b>                 | 2319.93                                 | 0.09538                              |
| <b>e<sub>2</sub><sup>2</sup></b>                 | 1770.60                                 | -0.53445                             |
| <b>h<sub>2</sub><sup>2</sup></b>                 | 219.21                                  | 0.50122                              |
| <b>e<sub>1</sub> e<sub>2</sub> h<sub>1</sub></b> | 1274.11                                 | 0.00346                              |
| <b>e<sub>1</sub> e<sub>2</sub> h<sub>2</sub></b> | -4215.13                                | -0.01340                             |
| <b>e<sub>1</sub> h<sub>1</sub> h<sub>2</sub></b> | 990.28                                  | 0.00328                              |
| <b>e<sub>1</sub><sup>2</sup> h<sub>1</sub></b>   | -1035.04                                | -0.00298                             |
| <b>e<sub>1</sub><sup>2</sup> h<sub>2</sub></b>   | 2321.23                                 | 0.00780                              |
| <b>e<sub>1</sub> h<sub>2</sub><sup>2</sup></b>   | -1035.74                                | -0.00402                             |
| <b>e<sub>2</sub><sup>2</sup> h<sub>2</sub></b>   | 2128.63                                 | 0.00640                              |
| <b>e<sub>2</sub><sup>3</sup></b>                 | 215.10                                  | 0.00053                              |

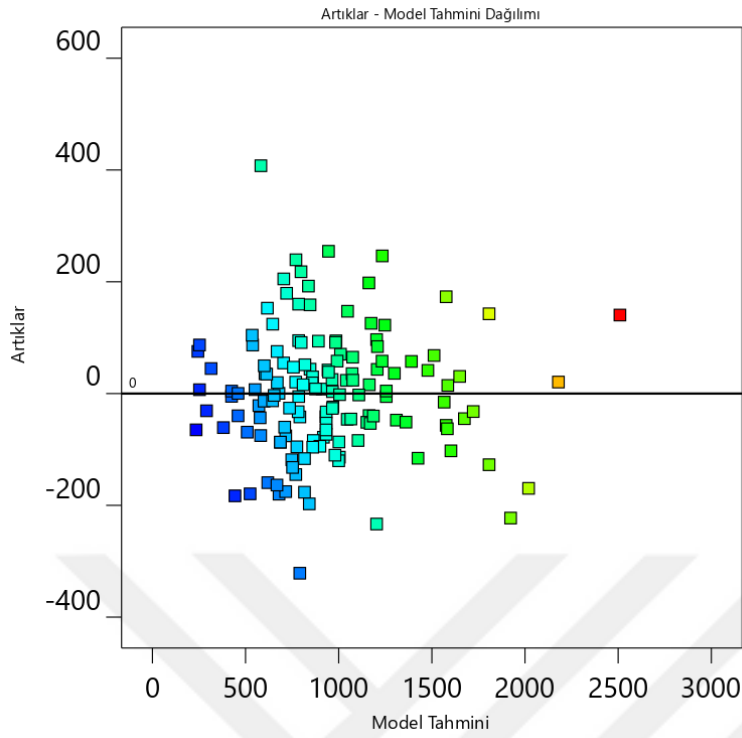
Resim 4.2’de  $F_r$  için dışsal studentize edilmiş artıklara karşılık normal olasılık dağılımı gösterilmiştir. Grafikte noktaların genelini doğrusal bir dağılım göstermesi modelin yeterli olduğunun bir göstergesidir. Dağılımdaki az miktarda sapma olağan bir durumdur. Noktaların belirgin bir dağılım deseni (S gibi) göstermesi modelde bazı değişikliklerin yapılmasının gerekebileceğini ifade eder. Resim 4.2’de iki nokta dışında çizgisel bir dağılım oluştuğu için model yeterli görülmüştür (Mohammed ve diğerleri 2020; Waseem ve diğerleri 2020; Yandell 2017).



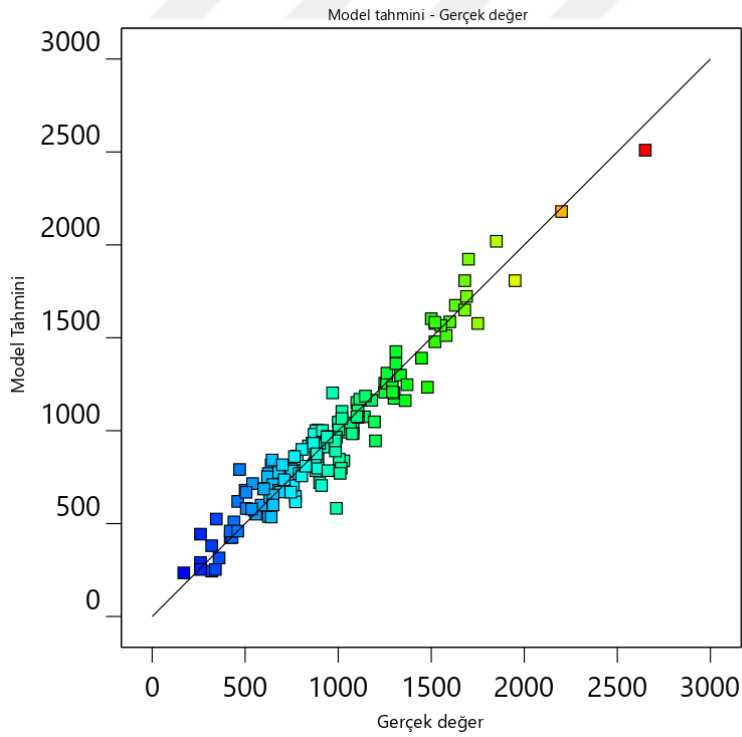
Resim 4.2.  $F_r$  için artıkların normal % olasılık dağılımı

Artan model tahminlerine karşılık dışsal studentize edilmiş artıkların dağılımı grafiği değişimin sabit olduğunu test eder. Dağılımın merkez çizgisinin iki tarafında rastgele ve herhangi bir belirgin desen oluşturmaması gerekir. Bu grafikte genişleyen değişim (megafon şekli) dönüşüm gerekliliğini gösterir (Halim ve diğerleri 2020; Waseem ve diğerleri 2020; Yandell 2017). Resim 4.3'te noktalar merkez çizgisinin iki tarafında rastgele dağılım gösterdiği için regresyon modelinde transformasyona gerek görülmemiştir.

Oluşturulan cevap yüzey modelinin yeterliliğinin en açık bir şekilde görülebileceği grafik gerçek değere karşılık tahmin edilen değerlerin dağılım grafiğidir. Resim 4.4'te  $F_r$  için model tahmini-gerçek değer dağılımı grafiği verilmiştir. Bu grafikte noktaların yatayla  $45^\circ$  açı yapan doğruya ( $y=x$  doğrusu) yakın bir dağılım göstermesi modelin gerçek durumu iyi bir şekilde temsil ettiğini gösterir. Resim 4.4 incelendiğinde noktaların  $y=x$  doğrusu etrafında bir dağılım gösterdiği dolayısı ile cevap yüzeyinin yeterli olduğu görülmektedir.



Resim 4.3.  $F_r$  için model tahminlerine karşılık artık değerleri dağımı



Resim 4.4.  $F_r$  için gerçek değer – model tahmini dağılımı

Döndürme momentleri (Mt) için cevap yüzeyleri

Çalışmada merdanelere gelen toplam döndürme momentlerinin cevap yüzeyi için üçüncü dereceden indirgenmiş polinomsal regresyon modeli oluşturulmuştur. Gerçekleştirilen ANOVA sonuçları Çizelge 4.6’da sunulmuştur. Modelin serbestlik derecesi 23 olarak gösterilmiştir. Bu modelde birbirinden bağımsız 23 terimin olduğunu belirtir. Çizelgede modelin F değerinin 76.22 ve p değerinin 0,0001’den küçük olması modelin anlamlı olduğu anlamına gelmektedir (Amirov ve Vakhshouri, 2020; Myers ve diğerleri, 2016; Sharifi ve diğerleri, 2020).

Çizelge 4.6.  $M_t$  için ANOVA sonuçları

| Kaynak   | Kareler Toplamı | Serbestlik derecesi | Ortalama Kareler | F-değeri | p-değeri |               |
|--|-----------------|---------------------|------------------|----------|----------|---------------|
| <b>Model</b>                                   | 6,20E+11        | 23                  | 2,70E+10         | 76,22    | < 0,0001 | Anlamlı       |
| <b>e<sub>1</sub></b>                           | 2,96E+09        | 1                   | 2,96E+09         | 8,38     | 0,0045   |               |
| <b>e<sub>2</sub></b>                           | 6,82E+09        | 1                   | 6,82E+09         | 19,28    | < 0,0001 |               |
| <b>h<sub>1</sub></b>                           | 1,40E+10        | 1                   | 1,40E+10         | 39,69    | < 0,0001 |               |
| <b>h<sub>2</sub></b>                           | 3,22E+10        | 1                   | 3,22E+10         | 91,07    | < 0,0001 |               |
| <b>e<sub>1</sub>e<sub>2</sub></b>              | 3,63E+10        | 1                   | 3,63E+10         | 102,78   | < 0,0001 |               |
| <b>e<sub>1</sub>h<sub>1</sub></b>              | 1,07E+10        | 1                   | 1,07E+10         | 30,12    | < 0,0001 |               |
| <b>e<sub>1</sub>h<sub>2</sub></b>              | 9,87E+09        | 1                   | 9,87E+09         | 27,91    | < 0,0001 |               |
| <b>e<sub>2</sub>h<sub>1</sub></b>              | 5,37E+09        | 1                   | 5,37E+09         | 15,18    | 0,0002   |               |
| <b>e<sub>2</sub>h<sub>2</sub></b>              | 7,90E+09        | 1                   | 7,90E+09         | 22,34    | < 0,0001 |               |
| <b>h<sub>1</sub>h<sub>2</sub></b>              | 1,63E+08        | 1                   | 1,63E+08         | 0,46     | 0,4987   |               |
| <b>e<sub>1</sub><sup>2</sup></b>               | 3,06E+10        | 1                   | 3,06E+10         | 86,42    | < 0,0001 |               |
| <b>e<sub>2</sub><sup>2</sup></b>               | 3,73E+10        | 1                   | 3,73E+10         | 105,44   | < 0,0001 |               |
| <b>h<sub>1</sub><sup>2</sup></b>               | 5,62E+07        | 1                   | 5,62E+07         | 0,16     | 0,6909   |               |
| <b>h<sub>2</sub><sup>2</sup></b>               | 6,62E+09        | 1                   | 6,62E+09         | 18,71    | < 0,0001 |               |
| <b>e<sub>1</sub>e<sub>2</sub>h<sub>2</sub></b> | 2,50E+10        | 1                   | 2,50E+10         | 70,81    | < 0,0001 |               |
| <b>e<sub>1</sub>h<sub>1</sub>h<sub>2</sub></b> | 1,88E+09        | 1                   | 1,88E+09         | 5,33     | 0,0227   |               |
| <b>e<sub>2</sub>h<sub>1</sub>h<sub>2</sub></b> | 1,34E+09        | 1                   | 1,34E+09         | 3,79     | 0,0541   |               |
| <b>e<sub>1</sub><sup>2</sup>h<sub>2</sub></b>  | 2,24E+10        | 1                   | 2,24E+10         | 63,29    | < 0,0001 |               |
| <b>e<sub>1</sub>e<sub>2</sub><sup>2</sup></b>  | 5,85E+09        | 1                   | 5,85E+09         | 16,56    | < 0,0001 |               |
| <b>e<sub>1</sub>h<sub>2</sub><sup>2</sup></b>  | 2,08E+09        | 1                   | 2,08E+09         | 5,87     | 0,0169   |               |
| <b>e<sub>2</sub><sup>2</sup>h<sub>2</sub></b>  | 2,31E+10        | 1                   | 2,31E+10         | 65,39    | < 0,0001 |               |
| <b>e<sub>2</sub>h<sub>1</sub><sup>2</sup></b>  | 1,10E+09        | 1                   | 1,10E+09         | 3,11     | 0,0802   |               |
| <b>h<sub>1</sub><sup>2</sup></b>               | 2,28E+09        | 1                   | 2,28E+09         | 6,44     | 0,0124   |               |
| <b>Uyum eksikliği</b>                          | 4,02E+10        | 112                 | 3,59E+08         | 1,31     | 0,3645   | Anlamlı değil |



Çizelgedeki  $h_1h_2$  ve  $h_1^2$  terimlerine ait p değerleri 0,1'den büyük olduğu için bu terimler modelde “anlamli” değildir. Buna rağmen bu terimler diğer anlamlı terimler tarafından içerildiği için hiyerarşinin korunması için modele eklenmiştir. Uyum eksikliğinin p değeri 0,3645 olarak bulunmuştur. Bu modeldeki uyum eksikliğinin istatistiksel olarak anlamlı olmadığını ifade eder.

Çizelge 4.7’de regresyon katsayısının ( $R^2$ ) değerinin 0,9359 olduğu görülmektedir. Bu değer modelin  $M_t$ ’deki değişimin yaklaşık %93,59’unu açıkladığını ifade etmektedir. Bu değer yeterli bir güvenilirlik seviyesini sağlamaktadır (Amirov ve Vakhshouri 2020; Moghaddas 2021).

Çizelge 4.7.  $M_t$  regresyon modeli için uyum istatistikleri

| Std. sapma | Ortalama | C.V. % | $R^2$  | Düzeltilmiş $R^2$ | Tahmini $R^2$ | Yeterlilik hassasiyeti |
|------------|----------|--------|--------|-------------------|---------------|------------------------|
| 18802,56   | 1,35E+05 | 13,93  | 0,9359 | 0,9237            | 0,9065        | 42,5621                |

Aynı çizelgede düzeltilmiş  $R^2$  değeri 0,9237 olarak listelenmiştir. Bu değer  $R^2$  ile oldukça uyumlu olması modelde gereksiz terimlerin bulunmadığını göstermektedir. Ayrıca  $R^2_{adj}$  değerinin 1 yakın olması regresyon modelinin güvenilirlik seviyesinin yeterli olduğunu gösterir.

Modelin tahmini  $R^2$  değeri 0,9065 olarak hesaplanmıştır. Bu değer düzeltilmiş  $R^2$  ile farkının 0,2’den daha düşük olması modelin tahmin kapasitesinin yeterli seviyede olduğunu göstermektedir. Yani bu model oluşturulurken kullanılmayan ara değerlerin de yeterli doğrulukta tahmin edilebileceği söylenebilir.

Oluşturulan regresyon modelinin yeterli hassasiyet değeri 42,56 olarak hesaplanmıştır. Bu değer 4’ten büyük olması modelin hassasiyetinin yeterli seviyede olduğunu göstermektedir ve bu değer ne kadar büyükse hassasiyetin o kadar attığı ifade edilmektedir (Myers ve diğerleri 2016).

Kodlanmış ve gerçek değerler cinsinden terimlere ait eşitlik katsayıları Çizelge 4.8’de sunulmuştur. Kodlanmış değerler cinsinden terimlerin eşitsizlik katsayıları ilgili terimin matematik model içerisinde bağıl ağırlığını göstermektedir. Buradan  $M_t$ ’yi en fazla etkileyen

dört terimin sırası ile  $e_1 e_2 h_2$ ,  $e_1 e_2$ ,  $e_2^2 h_2$  ve  $e_2^2 h_2$  olduğu görülmektedir. Çizelgede gerçek değerler cinsinden eşitlik katsayıları kullanılarak elde edilen  $M_t$  regresyon eşitliği Eş. 4.2'de verilmiştir.

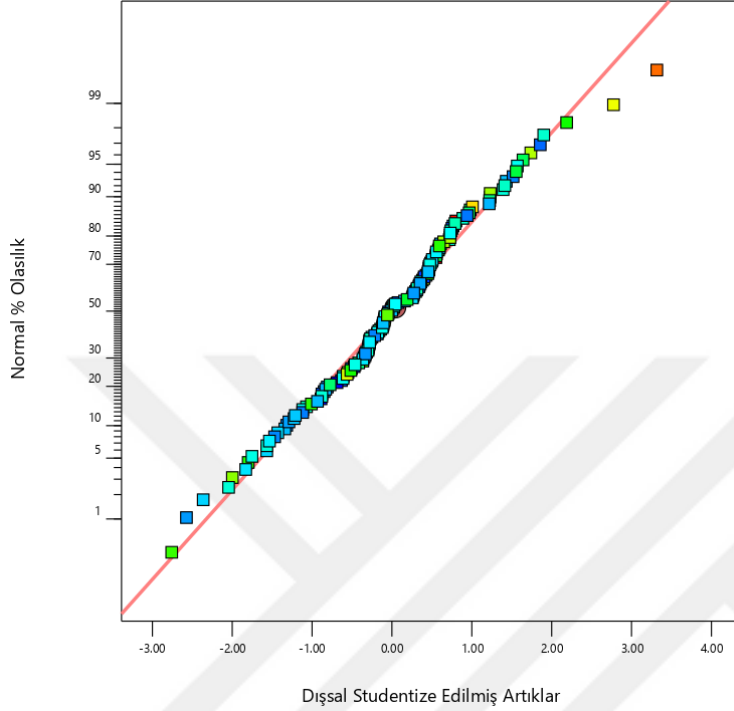
Çizelge 4.8.  $M_t$  cevap modeli için kodlanmış ve gerçek değerler cinsinden denklem katsayıları

| Faktör        | Kodlanmış Faktörler İçin Katsayı | Gerçek Faktörler İçin Katsayı |
|---------------|----------------------------------|-------------------------------|
| Sabit         | 1,08E+05                         | -112268,00                    |
| $e_1$         | -1,61E+05                        | -2150,81                      |
| $e_2$         | 2,01E+05                         | 12342,54                      |
| $h_1$         | 1,52E+05                         | -3449,15                      |
| $h_2$         | -1,66E+05                        | -1752,81                      |
| $e_1 e_2$     | -2,42E+06                        | 373,88                        |
| $e_1 h_1$     | 5,21E+05                         | -2,03                         |
| $e_1 h_2$     | -4,16E+05                        | 4,09                          |
| $e_2 h_1$     | -3,31E+05                        | -29,35                        |
| $e_2 h_2$     | 3,00E+05                         | -7,28                         |
| $h_1 h_2$     | 27155,57                         | -8,19                         |
| $e_1^2$       | 1,23E+06                         | -216,39                       |
| $e_2^2$       | 1,23E+06                         | -233,45                       |
| $h_1^2$       | 11432,53                         | 43,07                         |
| $h_2^2$       | -68365,84                        | 21,79                         |
| $e_1 e_2 h_2$ | -2,80E+06                        | -8,92                         |
| $e_1 h_1 h_2$ | 3,20E+05                         | 1,06                          |
| $e_2 h_1 h_2$ | -2,43E+05                        | -0,76                         |
| $e_1^2 h_2$   | 1,38E+06                         | 4,64                          |
| $e_1 e_2^2$   | 80338,51                         | 0,21                          |
| $e_1 h_2^2$   | -94595,37                        | -0,37                         |
| $e_2^2 h_2$   | 1,44E+06                         | 4,32                          |
| $e_2 h_1^2$   | 58798,58                         | 0,16                          |
| $h_1^2$       | -53890,95                        | -0,15                         |

$$\begin{aligned}
 M_t = & -2150.80e_1 + 12342e_2 - 3449.15h_1 - 1752.81h_2 + 373.87e_1e_2 - 2.03e_1h_1 + \\
 & 4.09e_1h_2 - 29.35e_2h_1 - 7.28e_2h_2 - 8.19h_1h_2 - 216.39e_1^2 - 233.45e_2^2 + 43.07h_1^2 + \\
 & 21.79h_2^2 - 8.92e_1e_2h_2 + 1.06e_1h_1h_2 - 0.76e_2h_1h_2 + 4.64e_1^2h_2 + 0.21e_1e_2^2 - \\
 & 0.37e_1h_2^2 + 4.32e_2^2h_1 + 0.16e_2h_1^2 - 0.15h_1^3 - 1.12 * 10^5
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

Bir sonraki aşamada dışsal studentize artıkların dağılım grafikleri incelenerek model kontrol edilmiştir. Resim 4.5.'te  $M_t$  için artıkların normal olasılık dağılımı grafiği sunulmuştur.

Grafikte noktaların genel olarak doğrusal bir dağılım gerçekleştirdiği görülmektedir. Dağılım herhangi bir desen oluşturmamaktadır. Bu da modelin yeterli olduğunu ve herhangi bir transformasyona gerek olmadığını gösterir.



Resim 4.5.  $M_t$  için dışsal studentize artıkların normal % olasılık dağılımı

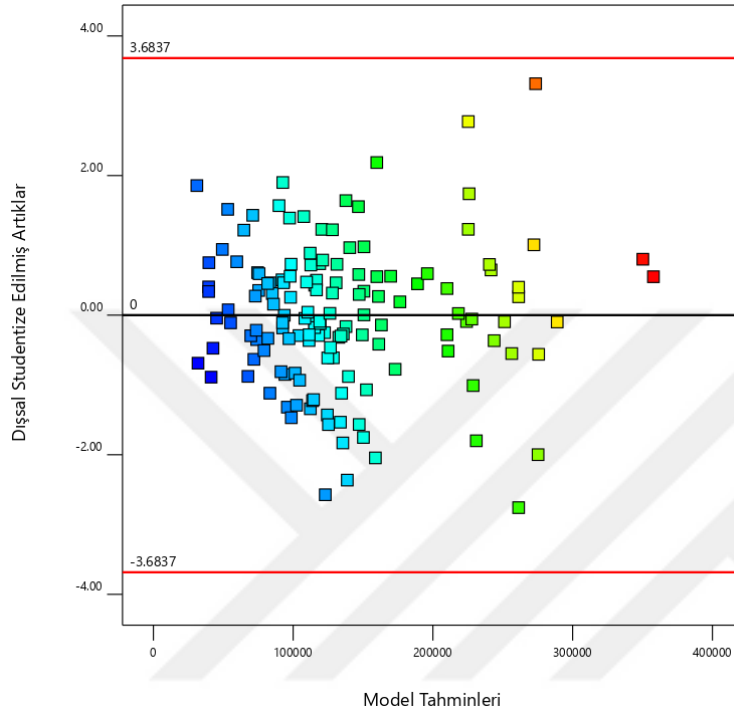
Modelin yapısının uygun olup olmadığı ve transformasyonun gerekliliğini kontrol etmek için model tahminlerine karşılık dışsal studentize artıkların dağılımı grafiği Resim 4.6'da sunulmuştur. Noktaların merkez çizgisi etrafında dağınık bir yapı göstermesi ve belirgin bir desen oluşturmaması modelin yapısının uygun olduğunu belirlemektedir.

Gerçek değerlere karşılık model tahminleri grafiği Resim 4.7'de verilmiştir. Bu grafikte noktalar  $y=x$  çizgisine oldukça yakın bir dağılım göstermektedir. Bu durum regresyon modelinin gerçek değerleri iyi bir şekilde temsil ettiğini göstermektedir.

#### Şekillendirme enerjisi ( $E_d$ ) için cevap yüzeyleri

Malzemenin haddelenmesi sırasında şekillendirme için kullanılan enerji miktarları ( $E_d$ ) için cevap yüzeyi için de üçüncü dereceden polinomsal model oluşturulmuştur. Cevap yüzeyinin derecesi diğer cevaplar için olduğu gibi deneme yanılma ile tespit edilmiştir. Varyans analizi sonuçları Çizelge 4.9'da sunulmuştur. Oluşturulan modelin serbestlik derecesi 23'tür.

Modelin F değeri 49,19; p değeri 0,001'den küçük olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlar modelin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu gösterir.



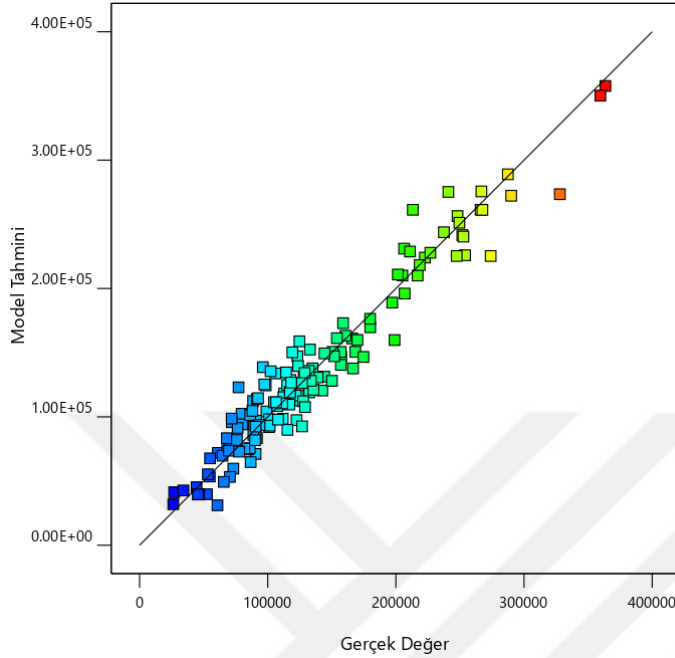
Resim 4.6.  $M_t$  için model tahminine karşılık dışsal studentize artıkların dağılımı grafiği

Modeldeki  $d_2^2$  teriminin p değeri 0,10'den büyük olduğu ve modele katkısı anlamlı olmadığı halde hiyerarşinin bozulmaması için modele eklenmiştir. Regresyon modelinin uyum eksikliğinin p değeri 0,1319 olduğu için modelde istatistiksel olarak anlamlı bir uyumsuzluk bulunmamaktadır.

Çizelge 4.10'da şekillendirme enerjisi için oluşturulan matematik modelinin uyum istatistikleri listelenmiştir. Bu çizelgede regresyon katsayısı ( $R^2$ ) değeri 0,9041 olarak listelenmiştir. Bu durum oluşturulan regresyon modelinin şekillendirme enerjisi değişimlerini %90,41 oranında açıkladığını gösterir.

Modelin düzeltilmiş  $R^2$  değeri 0,8857 olarak hesaplanmıştır. Bu değer  $R_2$  ile yeterince yakın olması modelde gerekli olanların bulunduğu ve gereksiz terimlerin eklenmemiş olduğu anlamına gelir. Literatürden alınan veriler de göz önünde bulundurularak  $R^2$  ve

düzeltilmiş  $R^2$  yeterli seviyede güvenilirliği sağladığı ifade edilebilir (Waseem ve diğerleri 2020; Widyaningsih ve diğerleri 2018).



Resim 4.7.  $M_t$  için gerçek değerlere karşılık model tahmin değerleri grafiği

Diğer yandan modelin tahmini  $R^2$  değeri 0,8616 olarak bulunmuştur. Bu değer düzeltilmiş  $R^2$  ile arasındaki farkın oldukça küçük olması modelin tahmin kapasitesinin yeterli seviyede olduğunu gösterir.

Modelin yeterli hassasiyet değeri 29,295 olarak belirlenmiştir. Bu değer modelin hassasiyetinin yeterli seviyede olduğu anlamına gelmektedir.

Şekillendirme enerjisi için kodlanmış ve gerçek değerler cinsinden denklem katsayıları Çizelge 4.11’de listelenmiştir. Çizelgedeki “kodlanmış faktörler için katsayı” sütunu incelendiğinde şekillendirme enerjisi için en etkin terimler sırası ile  $e_1e_2h_2$ ,  $e_1e_2$ ,  $e_2^2h_2$  ve  $e_2^2h_2$  olduğu görülmektedir. Bu çizelgedeki gerçek faktörler cinsinden katsayı değerleri kullanılarak oluşturulan matematik model Eşitlik 4.32’te sunulmuştur.

$$E_d = 32300,37e_1 + 10165,83e_2 + 6607,65h_1 - 33022,80h_2 + 1941,98e_1e_2 - \\ -179,60e_1h_1 - 832,59e_1h_2 + 237,55e_2h_1 + 131,96e_2h_2 + 101,11h_1h_2 - \\ 1082,11e_1^2 - 1081,68e_2^2 - 63,10h_1^2 + 542,52h_2^2 - 45,86e_1e_2h_2 + 10,78e_1h_1h_2 -$$

$$5,86e_2h_1h_2 + 1,00e_1^2e_2 - 1,72e_1^2h_1 + 24,86e_1^2h_2 - 2,45e_1h_2^2 + 22,69e_2^2h_2 - 2,27h_1h_2^2 - 6,37 * 10^5 \quad (4.3)$$

Çizelge 4.9. E<sub>d</sub> için ANOVA sonuçları

| Kaynak                | Kareler Toplamı | Serbestlik derecesi | Ortalama Kareler | F-değeri | p-değeri |               |
|-----------------------|-----------------|---------------------|------------------|----------|----------|---------------|
| <b>Model</b>          | 1.58E+13        | 23                  | 6.88E+11         | 49.17    | < 0.0001 | Anlamli       |
| <b>A-e1</b>           | 2.06E+11        | 1                   | 2.06E+11         | 14.69    | 0.0002   |               |
| <b>B-e2</b>           | 1.94E+11        | 1                   | 1.94E+11         | 13.87    | 0.0003   |               |
| <b>C-h1</b>           | 2.08E+11        | 1                   | 2.08E+11         | 14.87    | 0.0002   |               |
| <b>D-h2</b>           | 4.62E+11        | 1                   | 4.62E+11         | 33.03    | < 0.0001 |               |
| <b>AB</b>             | 9.66E+11        | 1                   | 9.66E+11         | 69.05    | < 0.0001 |               |
| <b>AC</b>             | 2.66E+11        | 1                   | 2.66E+11         | 18.98    | < 0.0001 |               |
| <b>AD</b>             | 2.26E+11        | 1                   | 2.26E+11         | 16.16    | 0.0001   |               |
| <b>BC</b>             | 1.70E+11        | 1                   | 1.70E+11         | 12.18    | 0.0007   |               |
| <b>BD</b>             | 2.23E+11        | 1                   | 2.23E+11         | 15.9     | 0.0001   |               |
| <b>CD</b>             | 4.89E+09        | 1                   | 4.89E+09         | 0.3491   | 0.5557   |               |
| <b>A<sup>2</sup></b>  | 7.98E+11        | 1                   | 7.98E+11         | 57.04    | < 0.0001 |               |
| <b>B<sup>2</sup></b>  | 1.04E+12        | 1                   | 1.04E+12         | 74.07    | < 0.0001 |               |
| <b>C<sup>2</sup></b>  | 1.61E+11        | 1                   | 1.61E+11         | 11.52    | 0.0009   |               |
| <b>D<sup>2</sup></b>  | 1.19E+10        | 1                   | 1.19E+10         | 0.8503   | 0.3583   |               |
| <b>ABD</b>            | 6.65E+11        | 1                   | 6.65E+11         | 47.5     | < 0.0001 |               |
| <b>ACD</b>            | 1.41E+11        | 1                   | 1.41E+11         | 10.09    | 0.0019   |               |
| <b>BCD</b>            | 7.45E+10        | 1                   | 7.45E+10         | 5.32     | 0.0228   |               |
| <b>A<sup>2</sup>B</b> | 1.07E+11        | 1                   | 1.07E+11         | 7.65     | 0.0066   |               |
| <b>A<sup>2</sup>C</b> | 1.06E+11        | 1                   | 1.06E+11         | 7.56     | 0.0069   |               |
| <b>A<sup>2</sup>D</b> | 6.21E+11        | 1                   | 6.21E+11         | 44.41    | < 0.0001 |               |
| <b>AD<sup>2</sup></b> | 7.28E+10        | 1                   | 7.28E+10         | 5.21     | 0.0243   |               |
| <b>B<sup>2</sup>D</b> | 6.49E+11        | 1                   | 6.49E+11         | 46.37    | < 0.0001 |               |
| <b>CD<sup>2</sup></b> | 9.19E+10        | 1                   | 9.19E+10         | 6.56     | 0.0116   |               |
| <b>Uyum eksikliği</b> | 1.62E+12        | 112                 | 1.45E+10         | 2.08     | 0.1319   | Anlamli değil |

Çizelge 4.10. E<sub>d</sub> regresyon modeli için uyum istatistikleri

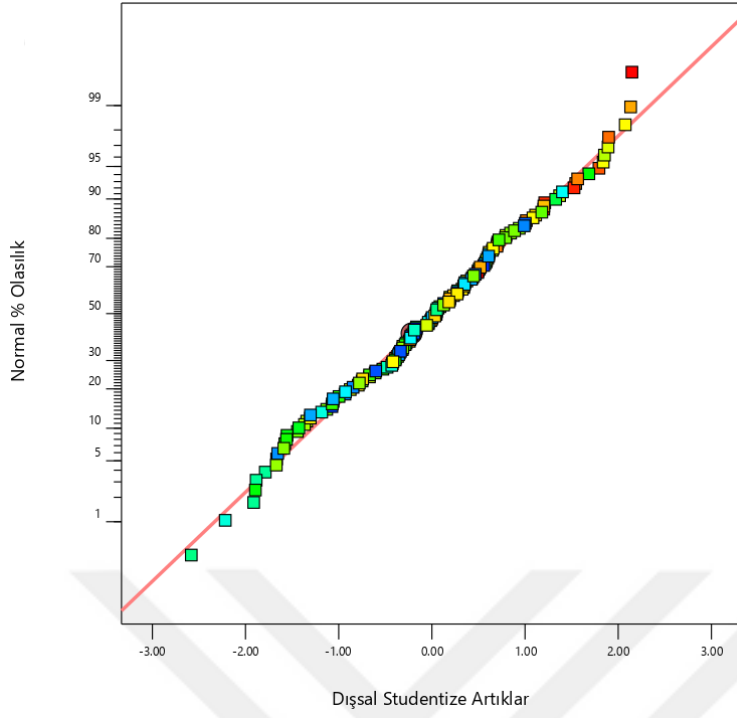
| Std. sapma | Ortalama | C.V. % | R <sup>2</sup> | Düzeltilmiş R <sup>2</sup> | Tahmini R <sup>2</sup> | Yeterlilik hassasiyeti |
|------------|----------|--------|----------------|----------------------------|------------------------|------------------------|
| 1,18E+05   | 9,72E+05 | 12,17  | 0,9041         | 0,8857                     | 0,8616                 | 26,295                 |

Çizelge 4.11.  $E_d$  cevap modeli için kodlanmış ve gerçek değerler cinsinden denklem katsayıları

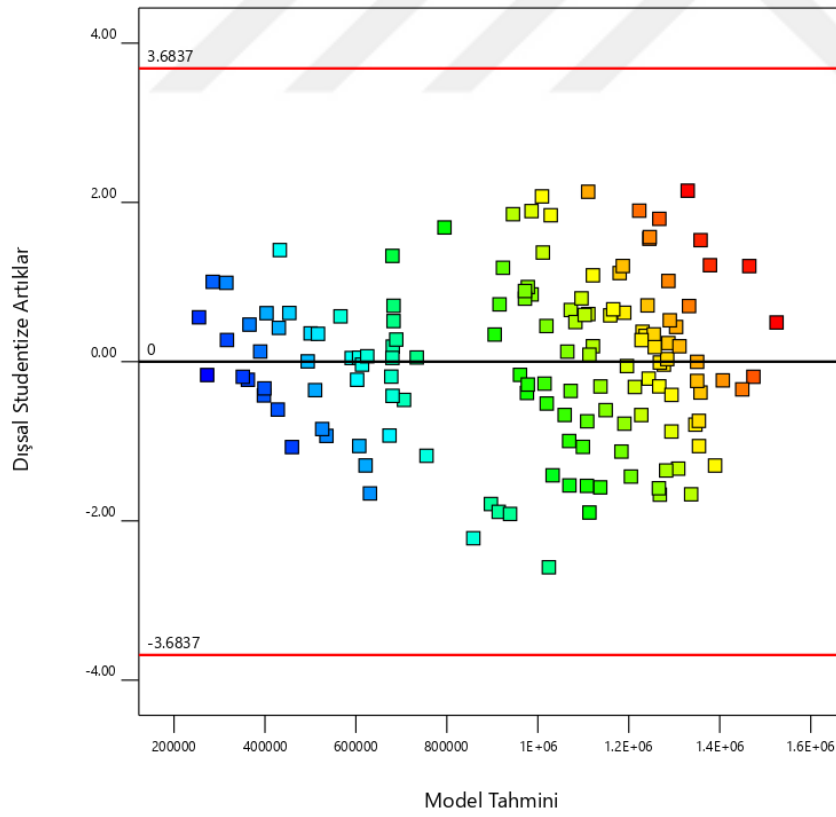
| Faktör            | Kodlanmış Faktörler İçin Katsayı | Gerçek Faktörler İçin Katsayı |
|-------------------|----------------------------------|-------------------------------|
| Sabit             | 7,99E+05                         | 6,37E+05                      |
| $e_1$             | -1,45E+06                        | 3,23E+04                      |
| $e_2$             | 1,13E+06                         | 1,02E+04                      |
| $h_1$             | 5,65E+05                         | 6,61E+03                      |
| $h_2$             | -8,38E+05                        | -3,30E+04                     |
| $e_1 * e_2$       | -1,27E+07                        | 1,94E+03                      |
| $e_1 * h_1$       | 2,62E+06                         | -1,80E+02                     |
| $e_1 * h_2$       | -2,24E+06                        | -8,33E+02                     |
| $e_2 * h_1$       | -1,86E+06                        | 2,38E+02                      |
| $e_2 * h_2$       | 1,64E+06                         | 1,32E+02                      |
| $h_1 * h_2$       | 1,83E+05                         | 1,01E+02                      |
| $e_1^2$           | 6,46E+06                         | -1,08E+03                     |
| $e_2^2$           | 6,59E+06                         | -1,08E+03                     |
| $h_1^2$           | -3,18E+05                        | -6,31E+01                     |
| $h_2^2$           | -1,41E+05                        | 5,43E+02                      |
| $e_1 * e_2 * h_2$ | -1,44E+07                        | -4,59E+01                     |
| $e_1 * h_1 * h_2$ | 3,25E+06                         | 1,08E+01                      |
| $e_2 * h_1 * h_2$ | -1,87E+06                        | -5,86E+00                     |
| $e_1^2 * e_2$     | 3,61E+05                         | 9,95E-01                      |
| $e_1^2 * h_1$     | -5,97E+05                        | -1,72E+00                     |
| $e_1^2 * h_2$     | 7,39E+06                         | 2,49E+01                      |
| $e_1 * h_2^2$     | -6,31E+05                        | -2,45E+00                     |
| $e_2^2 * h_2$     | 7,55E+06                         | 2,27E+01                      |
| $h_1 * h_2^2$     | -5,95E+05                        | -2,27E+00                     |

Modelin yeterliliğini daha fazla incelemek için normal dağılım grafikleri ele alınmıştır. Resim 4.8'de  $E_d$  için dışsal studentize edilmiş artıkların % olasılık dağılım grafiği verilmiştir. Grafikte noktaların iki istisna dışında doğru üzerinde dağıldıkları görülmektedir. Bu durum modelin yeterli olduğunun ve transformasyon gereği olmadığını göstergesidir.

Resim 4.9'da  $E_d$  için model tahminlerine karşılık dışsal studentize edilmiş artıkların dağılımı görülmektedir. Grafikte noktalar rastgele bir dağılım göstermektedir ve bir desen belirlenmemiştir. Bu durum modeldeki değişimin sabit olduğunu ve transformasyona gerek olmadığını gösterir.



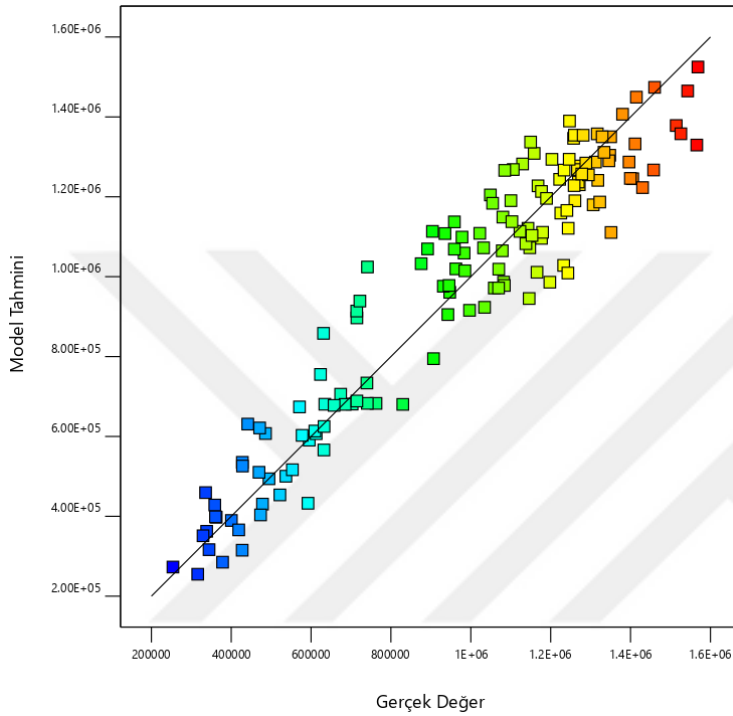
Resim 4.8.  $E_d$  için dışsal studentize artıkların normal % olasılık dağılımı



Resim 4.9.  $E_d$  için model tahminine karşılık dışsal studentize artıkların dağılımı grafiği



Regresyon modelinin gerçek değerleri ne kadar iyi temsil ettiğinin en önemli göstergelerinden birisi olan gerçek değerlere karşılık model tahminleri grafiği  $E_d$  için Resim 4.10'da verilmiştir. Grafik incelendiğinde noktaların  $y=x$  doğrusu etrafında oldukça homojen bir dağılım gösterdiği ve doğruya kabul edilebilir bir seviyede yakın bir dağılım gösterdiği görülmektedir.



Resim 4.10.  $E_d$  için gerçek değerlere karşılık model tahmin değerleri grafiği

#### 4.1.4. İstenirlik temelli çözüm arama stratejisi uygulama sonuçları

Önerilen paso tasarım metodu uygulamasında  $F_r$ ,  $M_t$  ve  $E_d$ 'den oluşan bağımlı değişkenler için cevap yüzeyleri oluşturulduktan sonraki adım çözüm arama stratejisi kullanılarak paso tasarım değerlerinin tespit edilmesidir. Bu kısımda her pasoda çözüm arama stratejisi uygulamasında elde edilen bulgular değerlendirilecektir.

##### Birinci paso

Birinci paso için çözüm arama probleminin girdileri şunlardır.

$e_1$ : İş parçasının pasoya giriş en ölçüsü 150 mm'dir. Bu değer kütük başlangıç en ölçüsüne eşittir.

$h_1$ : İş parçasının pasoya giriş yükseklik ölçüsü 150 mm'dir. Bu değer de  $e_1$  gibi kütük başlangıç ölçüsünden gelmektedir.

$e_2$  için alt ve üst sınırlar: Merdanelere açılacak oyuğun en ölçüsü 3. Bölümde belirtilen malzemenin paso boşluğunu tamamen dolduğu varsayımından dolayı iş parçasının pasodan çıkıştaki en ölçüsüne eşittir. Malzeme paso içerisinde yayılacağı için bu değer  $e_1$ 'den büyük olmak durumundadır ve bu sebepten alt sınır 151 mm olarak tanımlanmıştır. İş parçasının genişliği ikinci pasoda da bir miktar daha artacağı için ve 3. Pasoda yükseklik en oranının aşırı fazla olmasından dolayı bu pasoda aşırı bir ezme gerektirmesinin önüne geçmek için  $e_2$  üst değeri 161 mm olarak sınırlandırılmıştır.

$h_2$  için alt ve üst sınırlar: Merdanelere açılan oyukların toplam yüksekliği iş parçasının merdaneden çıkış yükseklik ölçüsüne eşittir. Resim 4.11, 4.12 ve 4.13'te görüleceği gibi  $h_2$  değerinin küçük değerleri  $F_r$ ,  $M_t$  ve  $E_d$  değerlerinin büyük olmasını gerektirdiği ve bunlarla ilgili optimizasyon hedefleri ile çeliştiği için  $e_2$  ölçüsünün alt limitinin fonksiyonel olarak bir önemi yoktur. Bu sebepten dolayı  $h_2$ 'nin alt sınırı son pasoda merdane boşluğuna rahat girebileceğini garantileyecek şekilde 68 mm olarak tanımlanmıştır. Diğer yandan  $h_2$ 'nin en büyük değeri oldukça önemlidir. Kaba haddelemenin amacı iş parçası kesitini hızlı bir şekilde azaltmak olduğu için iş parçasının her pasodan çıkıştaki kesit alanı girişteki kesit alanından küçük olmak zorundadır. Bu durum göz önünde bulundurularak  $h_2$ 'nin üst sınırı değer  $e_2$ 'nin en büyük değeri için bile belirli bir alan daralmasını sağlayacak şekilde 130 mm olarak tanımlanmıştır.

$F_r$  için alt ve üst sınırlar: Radyal kuvvet için alt ve üst sınırlar sırası ile 856 kN ve 1360 kN'dur. Alt sınır referans alınan endüstriyel uygulamaların SEY simülasyonları sonucunda bulunan en düşük  $F_r$  değerine eşittir. Üst sınır da benzer şekilde bu simülasyonlar sonucunda bulunan en büyük  $F_r$  değeridir.

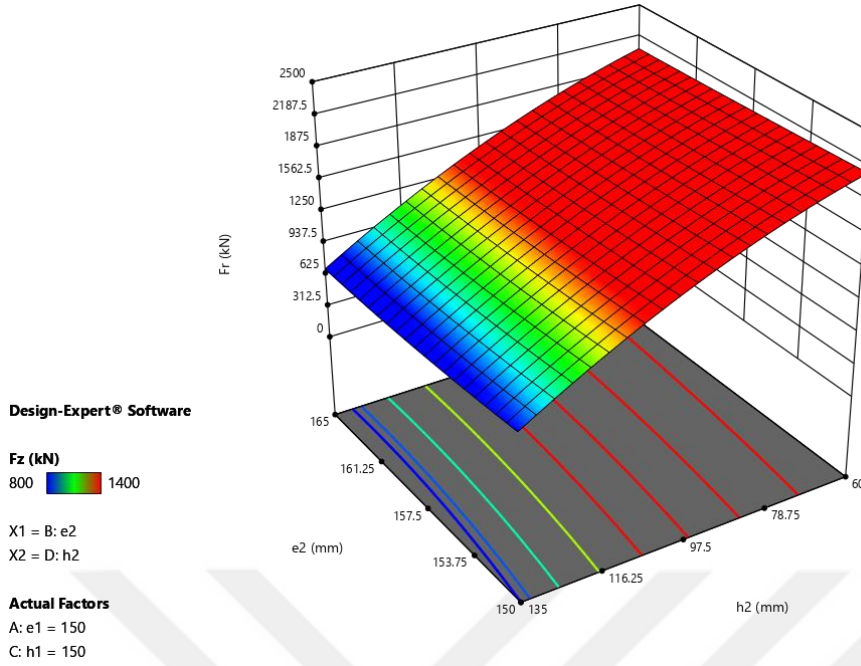
$M_t$  için alt ve üst sınırlar: Toplam döndürme momentleri için alt ve üst sınırlar sırası ile 61200 Nm ve 124763 Nm olarak tanımlanmıştır. Alt sınır radyal kuvvette olduğu gibi endüstriyel uygulamaların SEY simülasyonları sonucunda bulunan en küçük  $M_t$  değeridir. Bu değer 5 pasodan oluşan kaba haddeleme tezgahının güç ihtiyacını, dolayısı ile burada kullanılacak elektrik motoru büyüklüğünü hatta dolaylı olarak şekillendirme enerji sarfiyatını da belirleyeceği için toplam moment değerlerinin üst sınırı belirlenirken daha katı

davranılmıştır.  $M_t$ ' nin üst sınırı belirlenirken 5 pasodan oluşan prosesin pasolarına ait en büyük  $M_t$  değerleri referans alınan üç endüstriyel uygulama için ayrı ayrı tespit edilmiştir. Sonra tespit edilen bu üç maksimum  $M_t$  değerinin en düşük olanı optimizasyon için üst sınır olarak tanımlanmıştır.

$E_d$  için alt ve üst sınırlar: Her bir pasonun işleme sırasında kullandığı şekillendirme enerjisi için alt ve üst sınırlar 335893 J ve 1,32E+06 J olarak tanımlanmıştır. Alt sınır diğer iki cevap değişkeninde olduğu gibi referans endüstriyel paso tasarılarının SEY simülasyonları sonucunda bulunan en küçük  $E_d$  değeridir. Üst sınır ise  $F_r$ 'de olduğu gibi endüstriyel paso tasarımlarının Simülasyonlarından elde edilen en büyük değer olarak tanımlanmıştır. Enerji optimizasyonunun üst sınırı belirlenirken  $M_t$ 'deki gibi katı davranılmamasının nedeni çözüm aralığını aşırı daraltarak gereksiz çözüm sisteminin tıkanması riskini düşürmektir. Diğer yandan şekillendirme enerjisi iş parçası boyu ile birlikte güce ve dolaylı olarak toplam döndürme momentine bağlı olduğu için  $M_t$  tarafından da bir miktar sınırlandırılmış olmaktadır.

Her bir cevap değişkeni için cevap yüzeyi 4 bağımsız değişken boyutu ve bir de cevap değeri olmak üzere 5 boyutlu bir uzayda tanımlanmıştır. Bu durum cevap yüzeylerinin doğrudan görselleştirilmesini imkânsız kılmaktadır. Fakat bağımsız değişkenlerden ikisi sabit tutularak cevap yüzeyi 3 boyutlu bir uzaya indirgenebilir. Zaten çözüm arama stratejisinin ileriye doğru çözüm arama aşamasında  $e_1$  ve  $h_1$ , geriye doğru çözüm arama aşamasında  $e_2$  ve  $h_2$  sabit olduğu için indirgenme kolaylıkla uygulanabilir. Boyut indirgenmesinden sonra bağımsız değişkenlere karşılık cevap değişkenler 3 boyutlu yüzey veya cevap değişkenlerinin değerlerinin konturlar ve renk skalası ile gösterildiği grafiklerle görselleştirilebilmektedir.

Durum çalışmasında 1. paso için  $e_1$  ve  $h_1$  değerleri 150 mm sabit değerleri için üç boyutlu yüzey grafikleri oluşturulmuştur. Resim 4.11'de birinci paso için  $F_r$  grafiği sunulmuştur. Grafik incelendiğinde radyal kuvvetlerin  $h_2$  değeri 65 mm ile 135 mm arasında arttıkça neredeyse sabit bir şekilde arttığı görülmektedir. Yine  $e_2$  değeri 150 mm ile 165 mm arasında arttıkça radyal kuvvetin çok düşük bir eğimle arttığı görülmüştür. Grafikte  $F_r$ 'nin en düşük değerinin  $h_1$ 'in 130 mm olduğu  $e_2$ 'nin 155 ile 165 mm arasında olduğu bölge civarında olduğu görülmektedir.

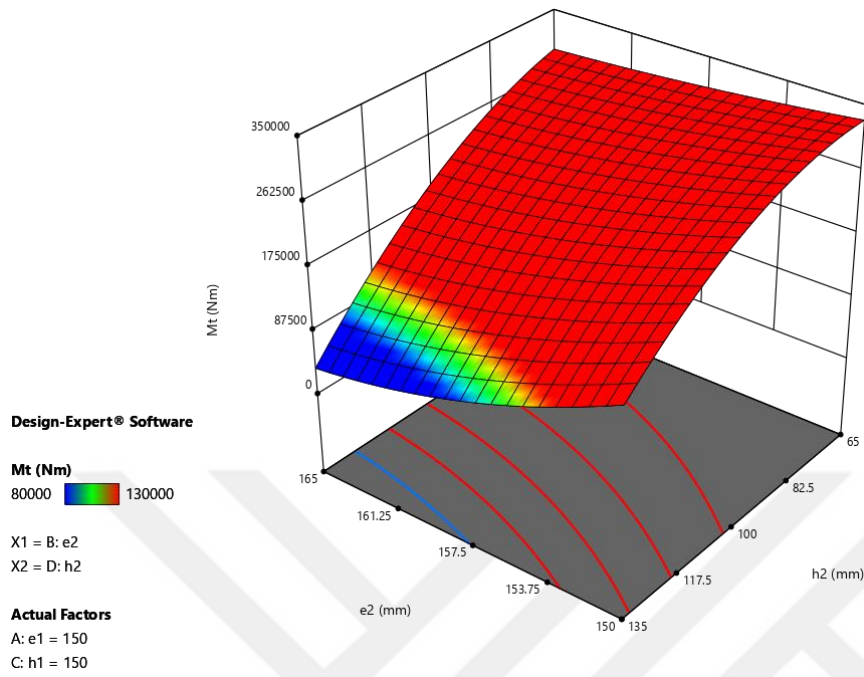


Resim 4.11.  $F_r$ 'nin  $e_1=150$  mm ve  $h_1=150$  mm sabit değerleri için 3 boyutlu yüzey grafiği

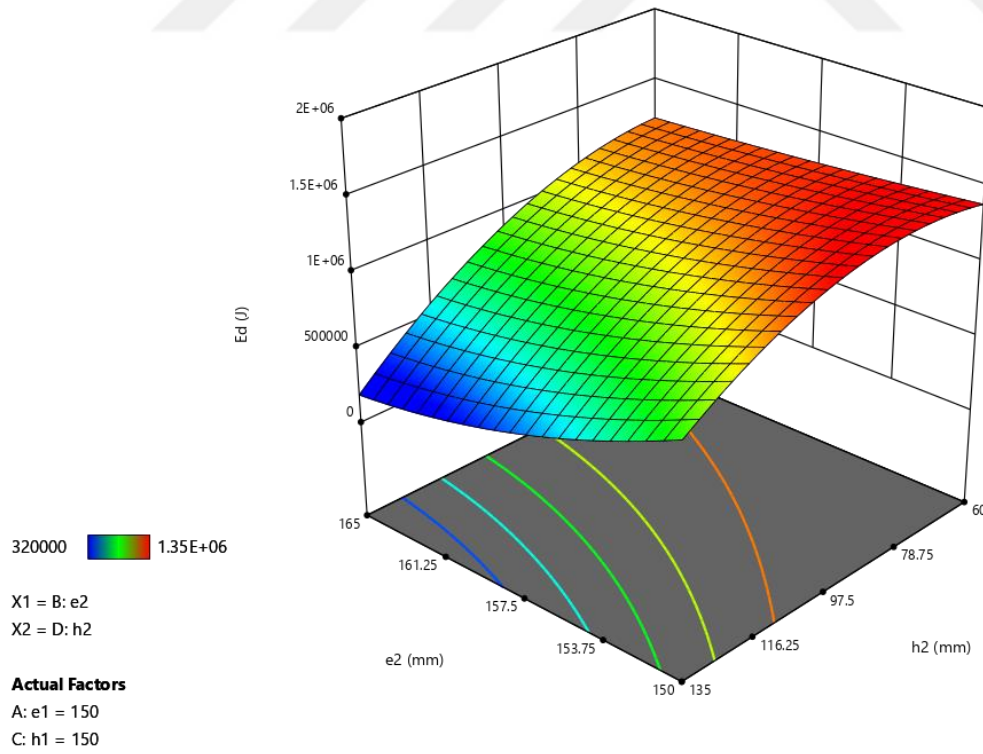
Birinci paso için toplam döndürme momenti grafiği Resim 4.12'de sunulmuştur. Grafik  $e_1$  ve  $e_2$ 'nin 150 mm sabit değerleri için oluşturulmuştur. Grafikte  $F_r$ ,  $h_2$  değerleri 135 mm'den 65 mm'ye doğru azaldıkça yaklaşık olarak ters parabolik olarak artmaktadır. Diğer yandan  $F_r$  değerleri,  $e_2$  değerlerinin 150 mm civarından başlayarak 160 mm'ye kadar arttığı bölgede parabolik olarak azalmaktadır.  $M_t$ 'nin en düşük olduğu bölge  $h_2$ 'nin 120 mm ile 135 mm,  $e_2$ 'nin 150 ile 165 mm arası olduğu görülmektedir.

Şekillendirme enerjisi grafiği  $e_1$  ve  $e_2$ 'nin 150 mm sabit değerleri için Resim 4.13'te sunulmuştur. Grafikte  $E_d$  değerleri,  $h_2$  135 mm'den 60 mm'ye doğru azaldıkça yaklaşık olarak ters parabolik olarak artmaktadır. Diğer yandan  $E_d$  değerleri,  $e_2$  150 mm civarından başlayarak 160 mm'ye kadar arttığı bölgede parabolik olarak azalmaktadır.  $E_d$ 'nin en düşük olduğu bölge  $h_2$ 'nin 120 mm ile 135 mm,  $e_2$ 'nin 155 ile 165 mm arası olduğu görülmektedir.

Yukarıda bahsedilen Çizelge 3.10'da listelenen kısıtlamalar istenirlik fonksiyonuna girildiğinde  $e_2$  ve  $h_2$  için çözüm değerleri ve bunlara karşılık gelen birleşik istenirlik değeri sırası ile 159.748 mm, 126.122 mm ve 0,264 olarak tespit edilmiştir. İstenirlik temelli çözüm arama stratejisi ile bulunan çözüm Resim 4.11, 4.12 ve 4.13'teki  $F_r$ ,  $M_t$  ve  $E_d$  yüzey grafikleri ile tam olarak uyumludur.



Resim 4.12.  $M_t$  'nin  $e_1=150$  mm ve  $h_1=150$  mm sabit değerleri için 3 boyutlu yüzey grafiği



Resim 4.13.  $E_d$  'nin  $e_1=150$  mm ve  $h_1=150$  mm sabit değerleri için 3 boyutlu yüzey grafiği

## İkinci Paso

İkinci paso için çözüm arama stratejisinin girdileri şunlardır:

$e_1$ : İkinci paso için  $e_1$  değeri 159,748 mm'dir. Bu değer birinci pasodan gelen iş parçasının en ölçüsüne yani birinci paso için  $e_2$  ölçüsüne eşittir.

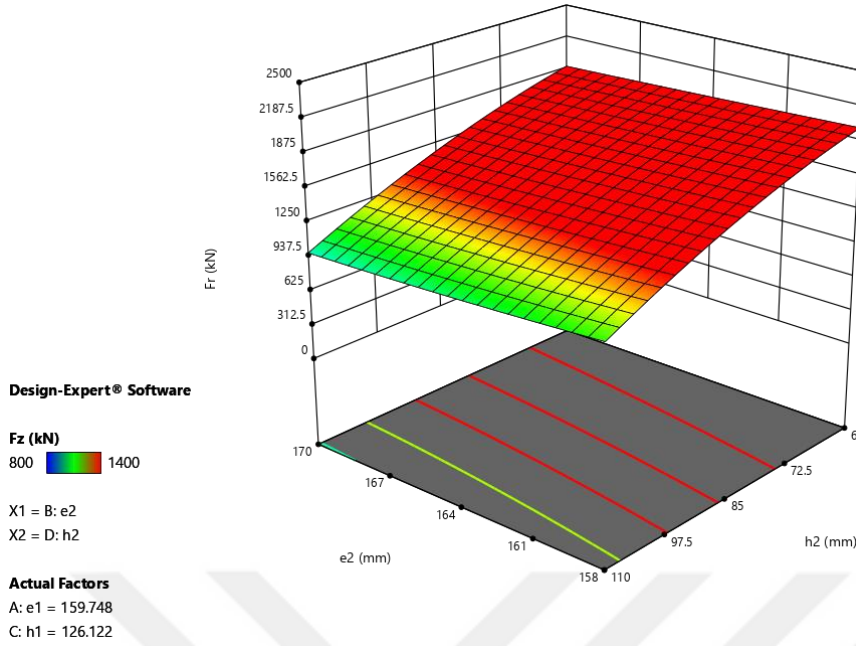
$h_1$ : İkinci paso için  $h_1$  değeri 126,122 mm'dir. Bu değer birinci pasodan gelen iş parçasının yükseklik ölçüsüne diğer bir ifade ile birinci paso için  $h_2$  ölçüsüne eşittir.

$e_2$  için alt ve üst sınırlar: Birinci pasodan çıkan iş parçası doğrudan ikinci pasoya girmektedir ve bu aşamada da tekrar ezilmektedir. Bu nedenle  $e_2$  değerinin alt sınırı  $e_1$ 'den büyük ilk tamsayı olan 160 mm olarak belirlenmiştir. Birinci pasoda olduğu gibi  $e_2$ 'nin üst sınırı  $h_2$ 'nin üst sınırı ile birlikte belirli bir alan daralmasını garantileyecek şekilde belirlenmiş ve 166 mm olarak tanımlanmıştır.

$h_2$  için alt ve üst sınırlar: Birinci pasoda olduğu gibi  $h_2$ 'nin alt sınırı 68 mm olarak tanımlanmıştır. Diğer yandan  $h_2$ 'nin üst sınırı  $e_2$ 'nin üst sınırı ile birlikte belirli bir kesit daralmasını garantileyecek şekilde 106 mm olarak tanımlanmıştır.

$F_r$ ,  $M_t$  ve  $E_d$  için alt ve üst sınırlar: Cevap değişkenleri olan  $F_r$ ,  $M_t$  ve  $E_d$  için alt ve üst sınırlar birinci pasoda olduğu gibi aynı değerler kullanılarak tanımlanmıştır.

Durum çalışmasında 2. paso için de  $e_1= 159,748$  mm ve  $h_1= 126,122$  mm sabit değerleri için 3 boyutlu yüzey grafikleri oluşturulmuştur. Birinci paso için  $F_r$  grafiği Resim 4.14'te görülmektedir. Grafikte  $e_2$  değeri 158 mm'den 170 mm'ye artarken  $F_r$  küçük bir eğimle azalmaktadır. Yine  $h_2$  değerleri 60 mm'den 110 mm'ye artarken  $F_r$  değeri nispeten yüksek bir eğimle azalmaktadır.  $F_r$ 'nin en küçük değerleri grafikte  $h_2$ 'nin 100 ile 110 mm,  $e_2$  nin 164 ile 170 mm arasında olduğu bölgede görülmektedir.



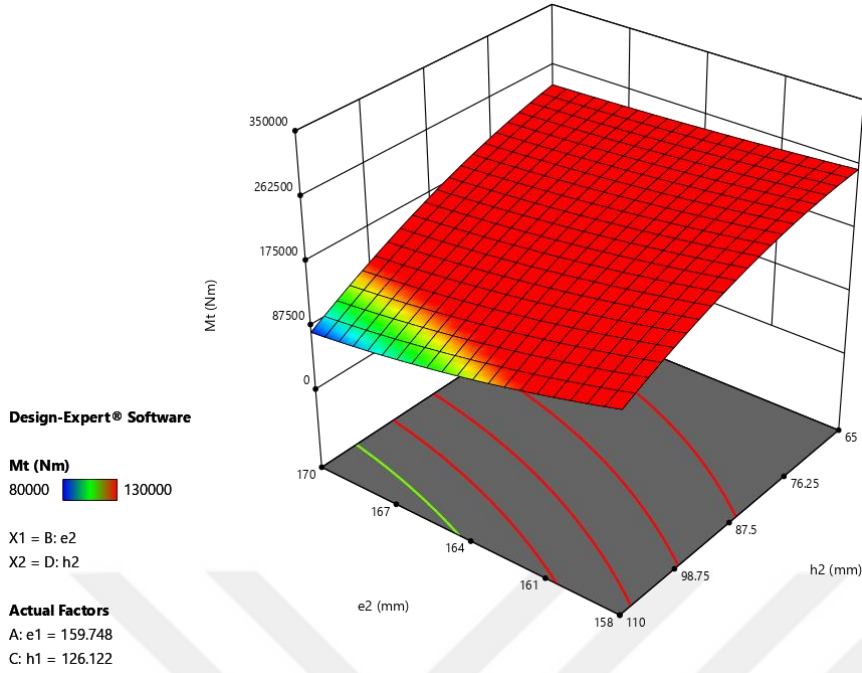
Resim 4.14.  $F_r$ 'nin  $e_1=159,748$  mm ve  $h_1=126,122$  mm sabit değerleri için 3 boyutlu yüzey grafiği

Resim 4.15'de ikinci paso için toplam döndürme momenti grafiği verilmiştir. Grafikte  $e_1$ , 159,748 mm'de,  $h_1$  126,122 mm'de sabit tutularak  $M_t$ 'nin  $e_2$  ve  $h_2$ 'ye göre değişimi üç boyutlu yüzey olarak gösterilmektedir.  $M_t$  değeri  $e_2$ 'nin 158 mm ile 170 mm arasında 1'e çok yakın dereceli bir parabol oluşturacak şekilde değişmektedir.  $M_t$   $h_2$ 'nin 60 ile 110 mm arasında  $h_2$  ile ters orantılı olarak azalmaktadır.  $M_t$ 'nin en düşük değeri  $e_2$ 'nin 167 mm civarı ile  $h_2$ 'nin 100 mm ile 110 mm arasındaki bölgede görülmektedir.

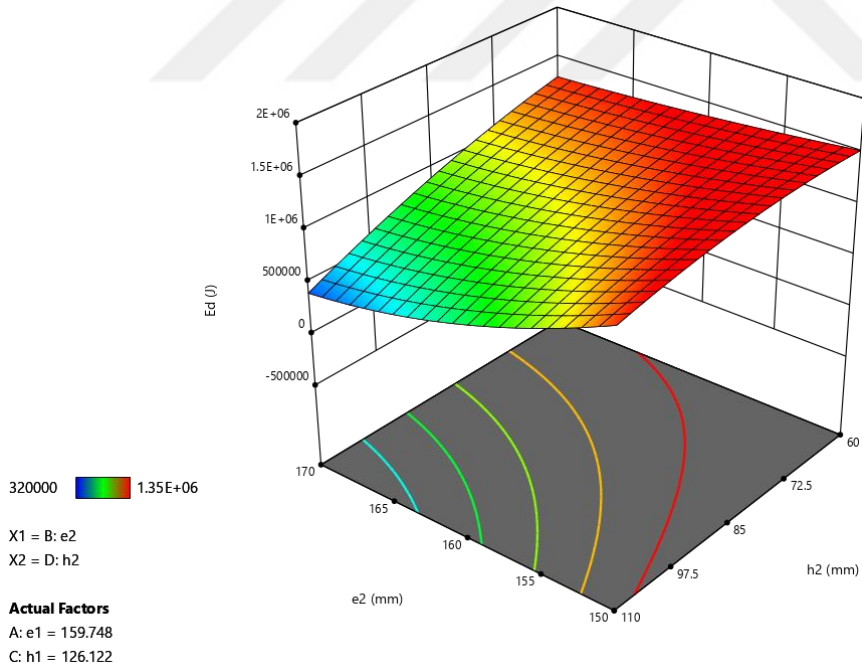
Resim 4.16'da  $e_1=159,748$  mm ve  $h_1=126,122$  mm sabit değerleri için şekillendirme enerjisinin 3 boyutlu yüzey grafiği sunulmuştur. Grafikte  $e_2$  değerleri 170 mm'den 150 mm'ye kadar azalırken  $E_d$  parabolik olarak artmaktadır. Yine  $h_2$  değeri 110 mm'den 60 mm'ye kadar azalırken doğrusal bir şekilde artmaktadır.  $E_d$ 'nin en küçük değeri  $e_2$ 'nin 165 ile 170 mm arası ve  $h_2$  için 100 ile 110 mm arasında kalan bölgede bulunmaktadır.

Çizelge 3.9'da ikinci paso için listelenen ve yukarıda belirtilen kısıtlamalar istenirlik fonksiyonuna girildiğinde  $e_2$  ve  $h_2$  için çözüm değerleri sırası ile 165,283 ve 105,938 olarak tespit edilmiştir. Bunlara karşılık gelen istenirlik seviyesi 0,081'dir. Çözümler Resim 4.14, Resim 4.15 ve Resim 4.16'teki grafikler ile tam olarak uyumludur.





Resim 4.15.  $M_t$ 'nin  $e_1=159,748$  mm ve  $h_1=126,122$  mm sabit değerleri için 3 boyutlu yüzey grafiği



Resim 4.16.  $E_d$ 'nin  $e_1=159,748$  mm ve  $h_1=126,122$  mm sabit değerleri için 3 boyutlu yüzey grafiği

### Üçüncü Paso

Üçüncü paso için çözüm arama stratejisi girdileri şunlardır:



$e_1$ : İkinci pasodan çıkan iş parçası üçüncü pasoya girmeden önce  $90^\circ$  döndürülmektedir. Bu nedenle ikinci paso için  $h_2$  değeri üçüncü paso için  $e_1$  değerine eşittir. Üçüncü paso için  $e_1$  değeri 105,938 mm'dir.

$h_1$ : İkinci pasonun  $e_2$  değeri üçüncü paso için  $h_1$  değerine eşittir. Bu nedenle  $h_1$  değeri 165,283 mm'dir.

$e_2$  için alt ve üst sınırlar: Malzemenin paso içinde yayılması gerektiği göz önünde bulundurularak  $e_2$  değeri  $e_1$ 'den büyük ilk tamsayı olan 106 mm olarak tanımlanmıştır. Diğer yandan  $e_2$  değerinin üst sınırı  $h_2$ 'nin üst sınırı ile birlikte belirli bir kesit daralmasını sağlayacak şekilde belirlenmiştir. Bu pasoda  $e_2$ 'nin üst sınırı 118 mm olarak tanımlanmıştır.

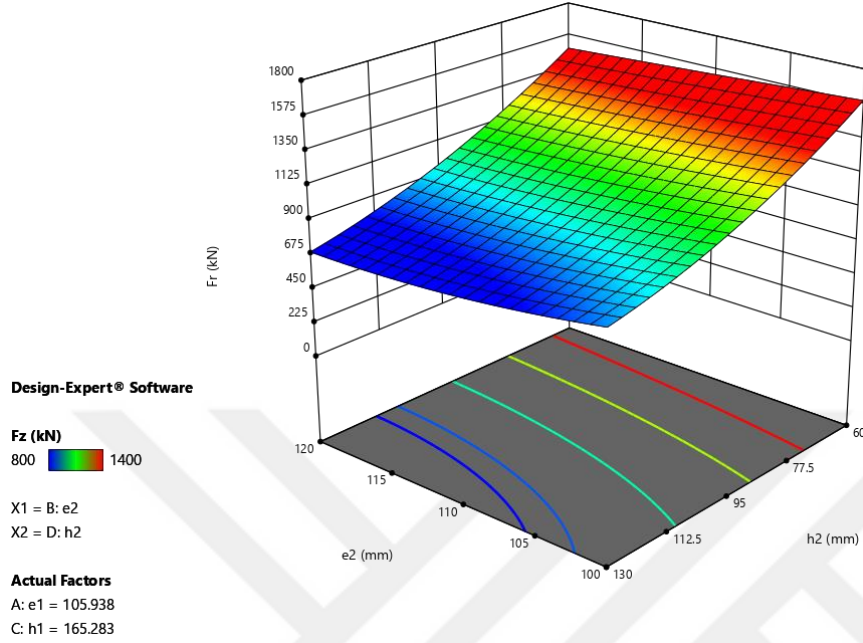
$h_2$  için alt ve üst sınırlar: Birinci ve ikinci pasoda olduğu gibi bu pasoda da  $h_2$ 'nin alt sınırı 68 mm olarak tanımlanmıştır. Kesit alanındaki azalmanın belirli bir değerden az olmamasını da sağlayacak şekilde  $h_2$  değerinin üst sınırı  $e_2$  değerinin üst sınırı da dikkate alınarak belirlenmiştir. bu şekilde  $h_2$  değerinin üst sınırı 127 mm olarak tanımlanmıştır.

$F_r$ ,  $M_t$  ve  $E_d$  için alt ve üst limitler: Bu değişkenler ile ilgili alt ve üst limitler paso 1 ve paso 2'deki gibi tanımlanmıştır.

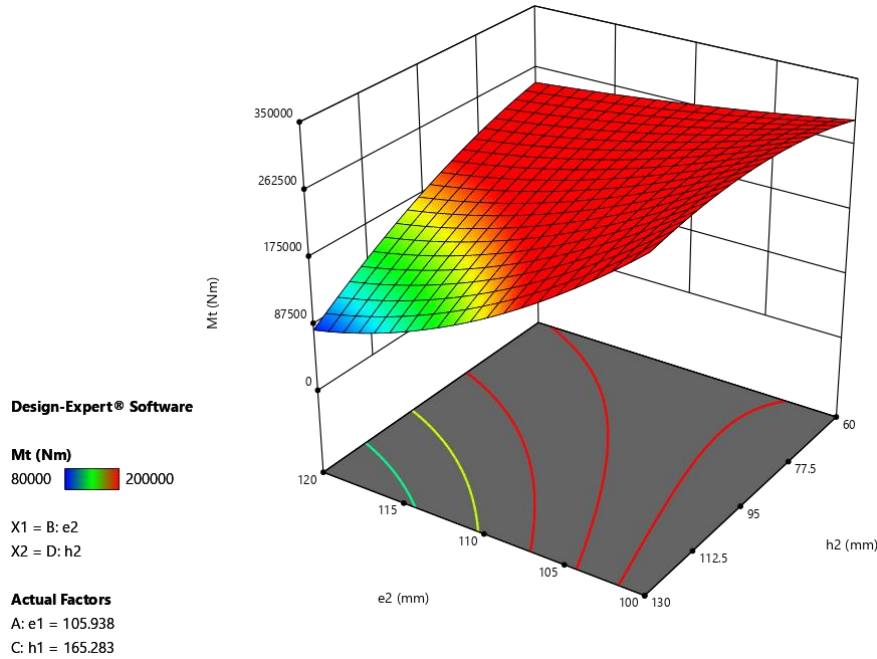
Üçüncü pasoda  $F_r$  için 3 boyutlu yüzey grafiğini çizmek için  $e_1$  değeri 105.938 mm ve  $h_2$  değeri 165.283 mm olarak sabit tutulmuştur. Oluşturulan 3 boyutlu yüzey grafiği Resim 4.17'de sunulmuştur. Grafikte  $e_2$  değeri 100 mm'den 120 mm'ye artarken  $F_r$  parabolik olarak azalmaktadır. Yine  $h_2$  değerleri 60 mm'den 130 mm'ye artarken  $F_r$  değeri parabolik olarak azalmaktadır.  $F_r$ 'nin en küçük değerleri grafikte  $h_2$ 'nin 100 ile 130 mm,  $e_2$ 'nin 110 ile 120 mm arasında olduğu bölgede görülmektedir.

Resim 4.18'de ikinci paso için toplam döndürme momenti grafiği verilmiştir. Grafikte  $e_1$ , 105.938 mm'de,  $h_1$  165.283 mm'de sabit tutularak  $M_t$ 'nin  $e_2$  ve  $h_2$ 'ye göre değişimi üç boyutlu yüzey olarak gösterilmektedir.  $M_t$  değeri  $e_2$ 'nin 105 mm ile 120 mm arasında bir parabol oluşturacak şekilde azalmaktadır.  $M_t$   $e_2$ 'nin 120 mm değerine yakın bölgede  $h_2$  60'tan 130 mm'ye çıkarken  $h_2$  ile ters orantılı olarak azalmaktadır. Fakat  $e_2$ 'nin 100 mm olduğu bölgede  $M_t$  1'e çok yakın dereceli ters parabol şeklinde bir değişim göstermektedir.

$M_t$ 'nin en düşük değeri  $e_2$ 'nin 120 mm civarı ile  $h_2$ 'nin 115 mm ile 130 mm arasındaki bölgede görülmektedir.



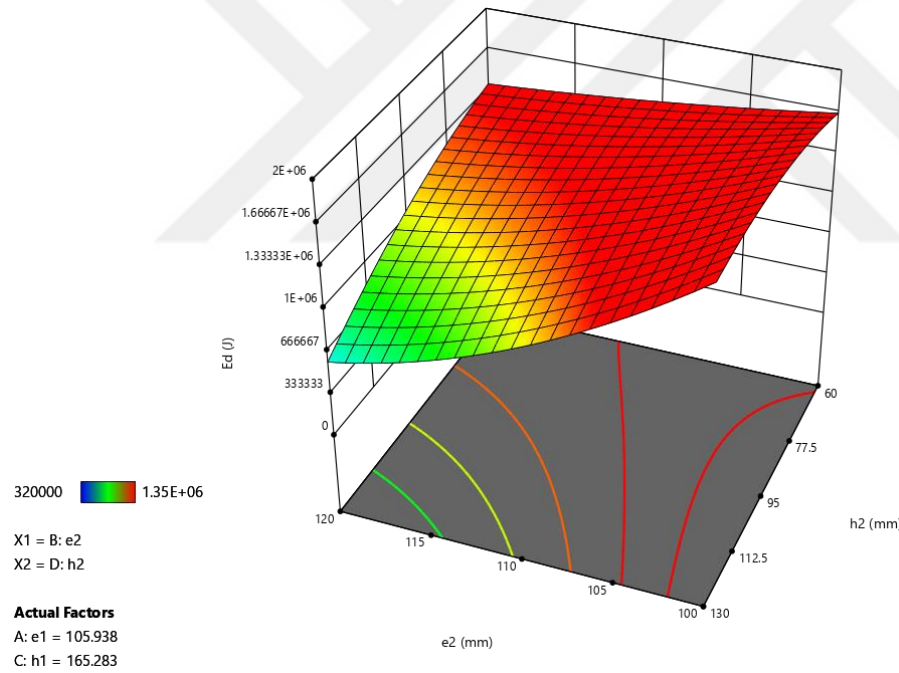
Resim 4.17.  $F_r$ 'nin  $e_1=105.938$  mm ve  $h_1=165.283$  mm sabit değerleri için 3 boyutlu yüzey grafiği



Resim 4.18.  $M_t$ 'nin  $e_1=105.938$  mm ve  $h_1=165.283$  mm sabit değerleri için 3 boyutlu yüzey grafiği

Resim 4.19'da  $e_1=105.938$  mm ve  $h_1=165.283$  mm sabit değerleri için şekillendirme enerjisinin 3 boyutlu yüzey grafiği sunulmuştur. Grafikte  $e_2$  değerleri 120 mm'den 100 mm'ye kadar azalırken  $E_d$  parabolik olarak artmaktadır. Yine  $E_d$ ,  $e_2$ 'nin 120 mm olduğu bölgede  $h_2$  değeri 130 mm'den 60 mm'ye kadar azalırken doğrusal bir şekilde artmaktadır fakat  $e_2$ 'nin 100 mm olduğu bölgede  $E_d$ , 1'e çok yakın dereceli ters parabol şeklinde bir değişim göstermektedir.  $E_d$ 'nin en küçük değeri  $e_2$ 'nin 110 ile 120 mm arası ve  $h_2$  için 100 ile 130 mm arasında kalan bölgede bulunmaktadır.

Çizelge 3.9'da üçüncü paso için listelenen ve yukarıda belirtilen kısıtlamalar istenirlik fonksiyonuna girildiğinde  $e_2$  ve  $h_2$  için çözüm değerleri sırası ile 117.906 ve 122.168 olarak tespit edilmiştir. Bunlara karşılık gelen istenirlik seviyesi 0,138'dir. Çözümler Şekil 4.17, 4.17 ve 4.19'daki grafikler ile tam olarak uyumludur.



Resim 4.19.  $E_d$  'nin  $e_1=105.938$  mm ve  $h_1=165.283$  mm sabit değerleri için 3 boyutlu yüzey grafiği

### Dördüncü Paso

Dördüncü paso için çözüm arama stratejisi girdileri şunlardır:

$e_1$ : İkinci pasodan çıkan iş parçası döndürülmeden dördüncü pasoya girmektedir. Bu nedenle ikinci paso için  $e_2$  değeri üçüncü paso için  $e_1$  değerine eşittir. Dördüncü paso için  $e_1$  değeri 117.906 mm'dir.

$h_1$ : Üçüncü pasonun  $h_2$  değeri üçüncü paso için  $h_1$  değerine eşittir. Bu nedenle  $h_1$  değeri 122.168 mm'dir.

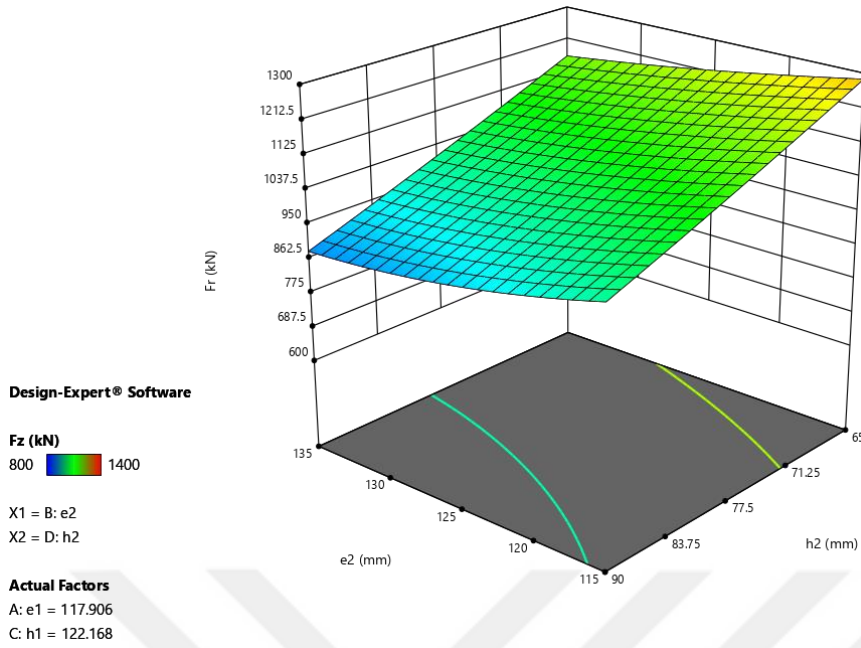
$e_2$  için alt ve üst sınırlar: Malzemenin paso içinde yayılması gerektiği göz önünde bulundurularak  $e_2$  değeri  $e_1$ 'den büyük ilk tamsayı olan 118 mm olarak tanımlanmıştır. Diğer yandan  $e_2$  değerinin üst sınırı  $h_2$ 'nin üst sınırı ile birlikte belirli bir kesit daralmasını sağlayacak şekilde belirlenmiştir. Bu pasoda  $e_2$ 'nin üst sınırı 130 mm olarak tanımlanmıştır.

$h_2$  için alt ve üst sınırlar: Dördüncü pasodan çıkan iş parçası beşinci pasoya girmeden önce  $90^\circ$  döndürülmektedir. Beşinci pasoda  $e_2$ 'nin en küçük ölçüsü 74 mm, en büyük ölçüsü 107 mm'dir. Bu durum dikkate alınarak dördüncü pasonun en düşük  $h_2$  ölçüsü 68 mm olarak tanımlanmıştır. Dördüncü pasonun  $h_2$  ölçüsü ise beşinci pasoda ezilerek 107 mm gelebilecek şekilde 88 mm olarak tanımlanmıştır.

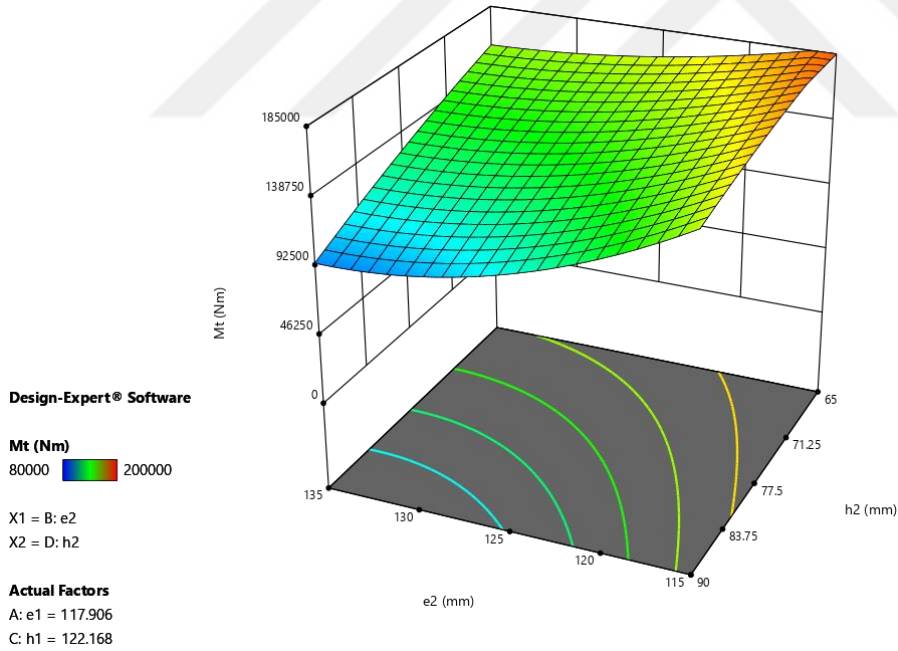
$F_r$ ,  $M_t$  ve  $E_d$  için alt ve üst limitler: Bu değişkenler ile ilgili alt ve üst limitler paso 1, paso 2 ve paso 3'deki gibi tanımlanmıştır.

Dördüncü pasoda  $F_r$  için 3 boyutlu yüzey grafiğini çizmek için  $e_1$  değeri 117.906 mm ve  $h_2$  değeri 122.168 mm olarak sabit tutulmuştur. Oluşturulan 3 boyutlu yüzey grafiği Resim 4.20'de sunulmuştur. Grafikte  $e_2$  değeri 115 mm'den 135 mm'ye artarken  $F_r$  parabolik olarak azalmaktadır. Yine  $h_2$  değerleri 65 mm'den 90 mm'ye artarken  $F_r$  değeri doğrusal olarak azalmaktadır.  $F_r$ 'nin en küçük değerleri grafikte  $h_2$ 'nin 80 ile 90 mm,  $e_2$  nin 125 ile 135 mm arasında olduğu bölgede görülmektedir.

Resim 4.21'de ikinci paso için toplam döndürme momenti grafiği verilmiştir. Grafikte  $e_1$  değeri 117.906 mm ve  $h_2$  değeri 122.168 mm'de sabit tutularak  $M_t$ 'nin  $e_2$  ve  $h_2$ 'ye göre değişimi üç boyutlu yüzey olarak gösterilmektedir.  $M_t$  değeri  $e_2$ 'nin 115 mm ile 130 mm arasında bir parabol oluşturacak şekilde azalmaktadır.  $M_t$ ,  $h_2$  65'den ile 90 mm'ye çıkarken  $h_2$  ile ters orantılı olarak azalmaktadır.  $M_t$ 'nin en düşük değeri  $e_2$ 'nin 125 ile 135 mm ve ile  $h_2$ 'nin 80 mm ile 90 mm arasındaki bölgede görülmektedir.



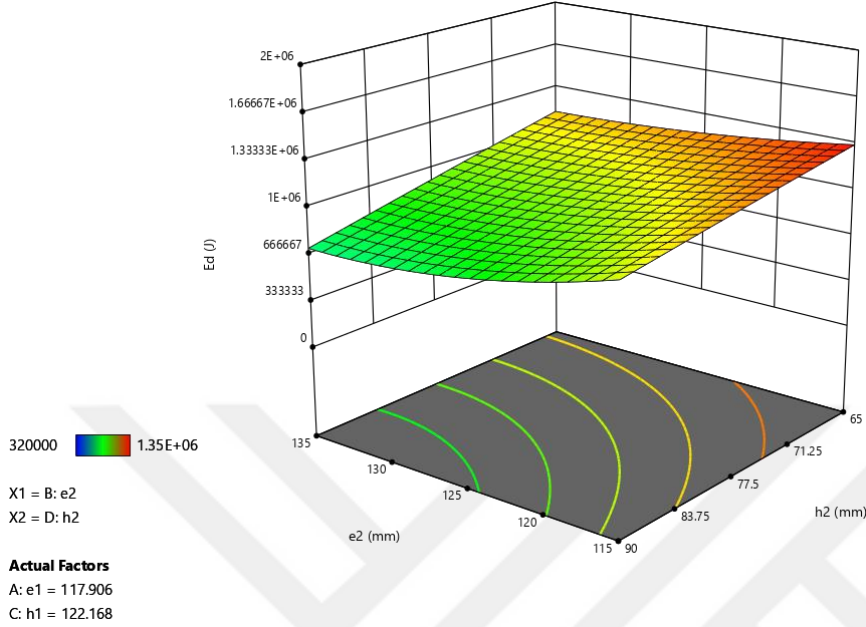
Resim 4.20.  $F_z$ 'nin  $e_2=117,906$  mm ve  $h_1=122,168$  mm sabit değerleri için 3 boyutlu yüzey grafiği



Resim 4.21.  $M_t$ 'nin  $e_2=117,906$  mm ve  $h_1=122,168$  mm sabit değerleri için 3 boyutlu yüzey grafiği

Resim 4.22'de  $117.906$  mm ve  $h_2$  değeri  $122.168$  mm sabit değerleri için şekillendirme enerjisinin 3 boyutlu yüzey grafiği sunulmuştur. Grafikte  $e_2$  değerleri  $130$  mm'den  $115$  mm'ye kadar azalırken  $E_d$  parabolik olarak artmaktadır. Yine  $E_d$ ,  $h_2$  değeri  $95$  mm'den  $65$

mm'ye kadar azalırken doğrusal bir şekilde artmaktadır.  $E_d$  'nin en küçük değeri  $e_2$ 'nin 125 ile 135 mm arası ve  $h_2$  için 80 ile 90 mm arasında kalan bölgede bulunmaktadır.



Resim 4.22.  $E_d$  'nin  $e_2=117,906$  mm ve  $h_1=122,168$  mm sabit değerleri için 3 boyutlu yüzey grafiği

Çizelge 3.9'da dördüncü paso için listelenen ve yukarıda belirtilen kısıtlamalar istenirlik fonksiyonuna girildiğinde  $e_2$  ve  $h_2$  için çözüm değerleri sırası ile 128,512 ve 85,472 olarak tespit edilmiştir. Bunlara karşılık gelen istenirlik seviyesi 0,260'dir. Çözümler Şekil 4.20, 4.21 ve 4.22'teki grafikler ile tam olarak uyumludur.

### Beşinci Paso

Beşinci paso için çözüm arama stratejisi girdileri şunlardır:

$e_1$ : Dördüncü pasodan çıkan iş parçası döndürülmeden beşinci pasoya girmektedir. Bu nedenle dördüncü paso için  $h_2$  değeri üçüncü paso için  $e_1$  değerine eşittir. Beşinci paso için  $e_1$  değeri 85,472 mm'dir.

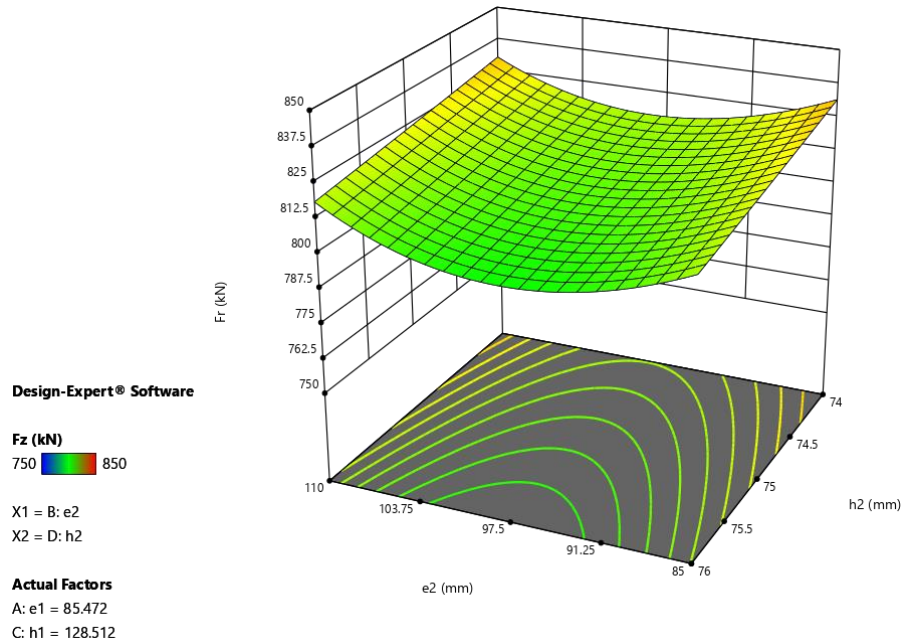
$h_1$ : Üçüncü pasonun  $e_2$  değeri üçüncü paso için  $h_1$  değerine eşittir. Bu nedenle  $h_1$  değeri 128,512 mm olarak tanımlanmıştır.

$e_2$  için alt ve üst sınırlar: Beşinci pasoda  $e_2$ 'nin alt sınırı  $e_1$  değerinden bir sonraki tamsayı olan 86 mm'dir. Bu pasoda  $e_2$ 'nin üst sınırı durum çalışmasının başında belirlenmiş olan bitmiş ürünün kesit ölçüleri tarafından dikte edilmektedir ve 107 mm'dir.

$h_2$  için alt ve üst sınırlar: Bu pasoda  $e_2$ 'nin alt ve üst sınırları bitmiş iş parçasının kesit ölçüleri tarafından sırası ile 74 ve 76 mm olarak belirlenmiştir.

$F_r$ ,  $M_t$  ve  $E_d$  için alt ve üst limitler: Bu değişkenler ile ilgili alt ve üst limitler diğer pasolar ile aynı şekilde tanımlanmıştır.

Beşinci pasoda  $F_r$  için 3 boyutlu yüzey grafiğini çizmek için  $e_1$  değeri 85,472 mm ve  $h_1$  değeri 128.512 mm olarak sabit tutulmuştur. Oluşturulan 3 boyutlu yüzey grafiği Resim 4.23'te sunulmuştur. Grafikte  $e_2$  değeri 85 mm'den 110 mm'ye artarken  $F_r$  parabolik olarak değişmektedir. Yine  $h_2$  değerleri 74 mm'den 76 mm'ye artarken  $F_r$  değeri doğrusal olarak azalmaktadır.  $F_r$ 'nin en küçük değerleri grafikte  $h_2$ 'nin 76 mm olduğu bölge civarında ve  $e_2$ 'nin 90 ile 105 mm arasında olduğu bölgede görülmektedir.



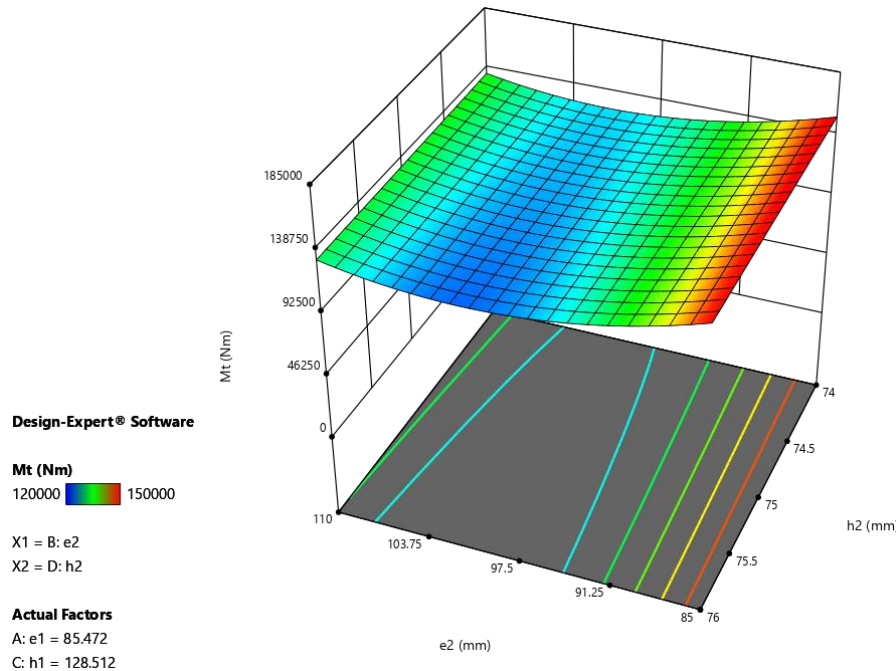
Resim 4.23.  $F_r$ 'nin  $e_1=85,472$  mm ve  $h_1=128,512$  mm sabit değerleri için 3 boyutlu yüzey grafiği



Resim 4.24'te ikinci paso için toplam döndürme momenti grafiği verilmiştir. Grafikte  $e_1$  değeri 85,472 mm ve  $h_2$  değeri 128.512 mm'de sabit tutularak  $M_t$ ' nin  $e_2$  ve  $h_2$ 'ye göre değişimi üç boyutlu yüzey olarak gösterilmektedir.  $M_t$  değeri  $e_2$ 'nin 85 mm ile 110 mm arasında bir parabol oluşturacak şekilde değişim göstermektedir.  $M_t$ ,  $h_2$  74'den 46 mm'ye çıkarken  $h_2$  ile ters orantılı olarak azalmaktadır.  $M_t$ ' nin en düşük değeri  $e_2$ 'nin 98 ile 105 mm ve ile  $h_2$ 'nin 76 mm civarı arasında görülmektedir.

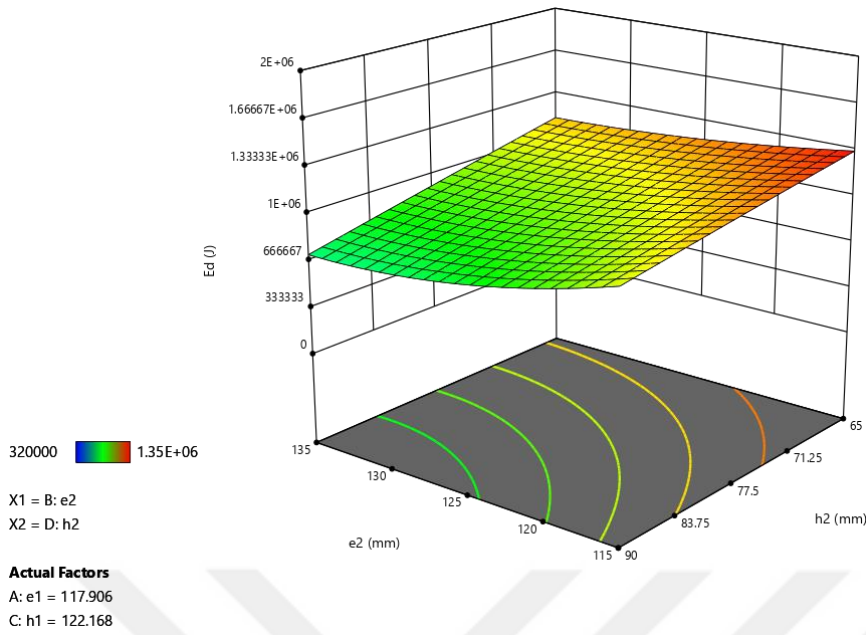
Resim 4.25'da  $e_1$ 'in 85,472 mm ve  $h_2$ 'nin 122.168 mm'de sabit değerleri için şekillendirme enerjisinin 3 boyutlu yüzey grafiği sunulmuştur. Grafikte  $e_2$  değerlerinin 85 mm'den 110 mm'ye kadar olan aralıkta  $E_d$  parabolik olarak değişmektedir. Diğer yandan  $E_d$ ,  $h_2$  değerinin 74 mm ile 76 mm arasında olduğu bölgede hemen hemen değişmemektedir.  $E_d$  'nin en küçük değeri  $e_2$ 'nin 95 ile 105 mm arasında olduğu bölgede bulunmaktadır.

Çizelge 3.9'da beşinci paso için listelenen ve yukarıda belirtilen kısıtlamalar istenirlik fonksiyonuna girildiğinde  $e_2$  ve  $h_2$  için çözüm değerleri sırası ile 97,677 ve 75,903 olarak tespit edilmiştir. Bunlara karşılık gelen istenirlik seviyesi 0,092'dir. Çözümler Şekil 4.23, 4.24 ve 4.25'teki grafikler ile tam olarak uyumludur.



Resim 4.24.  $M_t$ ' nin  $e_1=85,472$  mm ve  $h_1= 128,512$  mm sabit değerleri için 3 boyutlu yüzey grafiği





Resim 4.25.  $E_d$  'nin  $e_1=85,472$  mm ve  $h_1=128.512$  mm sabit değerleri için 3 boyutlu yüzey grafiği

## 4.2. Optimum Paso Tasarımın Doğrulanma Sonuçları

Durum çalışması sonucunda elde edilen optimum kutu paso serisi tasarımı Çizelge 4.12'de sunulmuştur. Bu optimum paso tasarımlarının kısım 3.8.4'te anlatılan yöntemle SEY simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar sonucunda elde edilen döndürme moment değerleri kullanılarak kısım 3.8.5'te anlatıldığı gibi her paso için şekillendirme enerjileri hesaplanmıştır. Hesaplanan  $E_d$  değerleri ile birlikte  $F_r$  ve  $M_t$  değerleri Çizelge 4.12'de listelenmiştir. Karşılaştırma amacıyla referans alınan endüstriyel paso tasarımlarının simülasyon sonuçları ve şekillendirme enerjisi değerleri de aynı çizelgede sunulmuştur. Ortaya çıkan sonuçların daha iyi anlaşılması için görselleştirilmesi Şekil 4.1, 4.2 ve 4.3'te yapılmıştır.

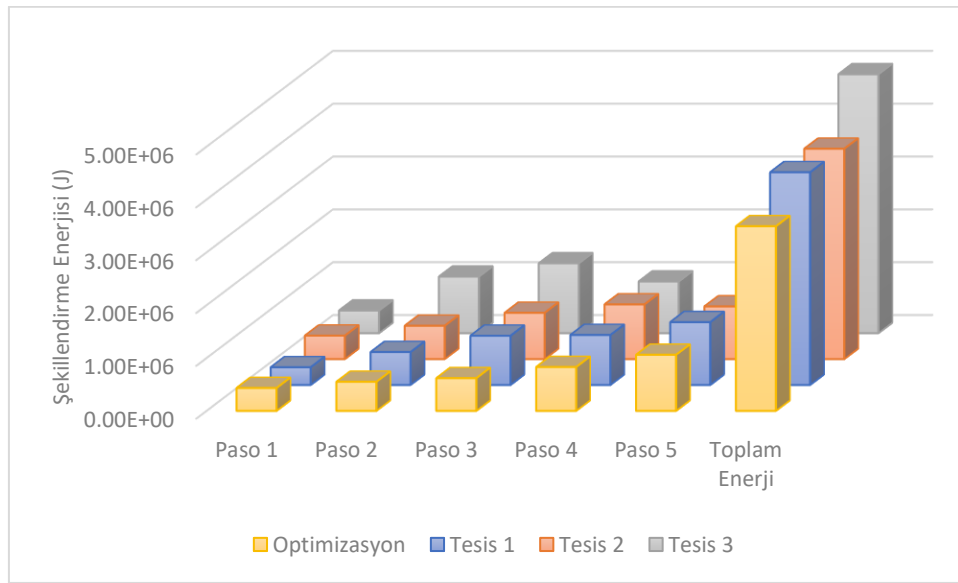
Endüstriyel referans paso tasarımları ve optimizasyon sonucu elde edilen paso tasarımının SEY simülasyonları sonucunda hesaplanan şekillendirme enerjisi sonuçları Şekil 4.3'te sunulmuştur. Grafik incelendiğinde optimum paso tasarımının birinci paso dışındaki bütün pasolar için şekillendirme enerjisinin en düşük değerine sahip olduğu görülmektedir. Toplam şekillendirme enerjileri incelendiğinde optimum tasarımın şekillendirme enerjisi belirgin bir şekilde diğerlerinden düşük olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.12. Referans endüstriyel tasarımlar ve optimize edilmiş tasarımın SEY simülasyon sonuçları

| Paso Tasarımları    |               | Simülasyon Sonuçları   |                        |                        |                        |                        |                        |                                  |
|---------------------|---------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|----------------------------------|
|                     | Paso          | e <sub>1</sub><br>(mm) | e <sub>2</sub><br>(mm) | h <sub>1</sub><br>(mm) | h <sub>2</sub><br>(mm) | Toplam<br>Tork<br>(Nm) | Eksenel<br>Yük<br>(kN) | Şekillendirme<br>Enerjisi<br>(J) |
| Tesis 1             | P1            | 150                    | 165                    | 150                    | 124                    | 71881                  | 945                    | 3,36E+05                         |
|                     | P2            | 165                    | 170                    | 124                    | 100                    | 119238                 | 1262                   | 6,24E+05                         |
|                     | P3            | 100                    | 113                    | 170                    | 110                    | 144334                 | 1016                   | 9,31E+05                         |
|                     | P4            | 113                    | 130                    | 110                    | 70                     | 117436                 | 984                    | 9,46E+05                         |
|                     | P5            | 70                     | 80                     | 130                    | 74                     | 107602                 | 745                    | 1,19E+06                         |
|                     | Ortalama      |                        |                        |                        |                        | 112098                 | 990                    | 8,05E+05                         |
|                     | Maksimum      |                        |                        |                        |                        | 144334                 | 1262                   | 1,19E+06                         |
|                     | Toplam Enerji |                        |                        |                        |                        |                        |                        | <b>4,03E+06</b>                  |
| Tesis 2             | P1            | 150                    | 165                    | 150                    | 116                    | 96665                  | 1090                   | 4,43E+05                         |
|                     | P2            | 165                    | 165                    | 116                    | 94                     | 124763                 | 1310                   | 6,31E+05                         |
|                     | P3            | 94                     | 100                    | 165                    | 124                    | 123718                 | 910                    | 8,76E+05                         |
|                     | P4            | 100                    | 100                    | 124                    | 106                    | 116918                 | 1010                   | 1,03E+06                         |
|                     | P5            | 100                    | 110                    | 106                    | 74                     | 108090                 | 700                    | 9,97E+05                         |
|                     | Ortalama      |                        |                        |                        |                        | 114031                 | 1004                   | 7,96E+05                         |
|                     | Maksimum      |                        |                        |                        |                        | 124763                 | 1310                   | 1,03E+06                         |
|                     | Toplam Enerji |                        |                        |                        |                        |                        |                        | <b>3,98E+06</b>                  |
| Tesis 3             | P1            | 150                    | 167                    | 150                    | 120                    | 92495                  | 1020                   | 4,28E+05                         |
|                     | P2            | 120                    | 137                    | 167                    | 100                    | 206895                 | 1360                   | 1,07E+06                         |
|                     | P3            | 100                    | 115                    | 137                    | 110                    | 61200                  | 640                    | 1,32E+06                         |
|                     | P4            | 115                    | 120                    | 110                    | 66                     | 128803                 | 1108                   | 9,78E+05                         |
|                     | P5            | 66                     | 75                     | 120                    | 76                     | 88792                  | 586                    | 1,10E+06                         |
|                     | Ortalama      |                        |                        |                        |                        | 115637                 | 942,8                  | 9,80E+05                         |
|                     | Maksimum      |                        |                        |                        |                        | 206895                 | 1360                   | 1,32E+06                         |
|                     | Toplam Enerji |                        |                        |                        |                        |                        |                        | <b>4,90E+06</b>                  |
| Optimizasyon Sonucu | P1            | 150,00                 | 159,75                 | 150,00                 | 126,12                 | 92206                  | 958                    | 4,33E+05                         |
|                     | P2            | 159,75                 | 165,28                 | 126,12                 | 105,94                 | 102477                 | 1145                   | 5,51E+05                         |
|                     | P3            | 105,94                 | 117,91                 | 165,28                 | 122,17                 | 96302                  | 847                    | 6,19E+05                         |
|                     | P4            | 117,91                 | 128,51                 | 122,17                 | 85,47                  | 117864                 | 929                    | 8,30E+05                         |
|                     | P5            | 85,47                  | 97,68                  | 128,51                 | 75,90                  | 119501                 | 873                    | 1,06E+06                         |
|                     | Ortalama      |                        |                        |                        |                        | 105670                 | 950                    | 6,99E+05                         |
|                     | Maksimum      |                        |                        |                        |                        | 119501                 | 1145                   | 1,06E+06                         |
|                     | Toplam Enerji |                        |                        |                        |                        |                        |                        | <b>3,49E+06</b>                  |

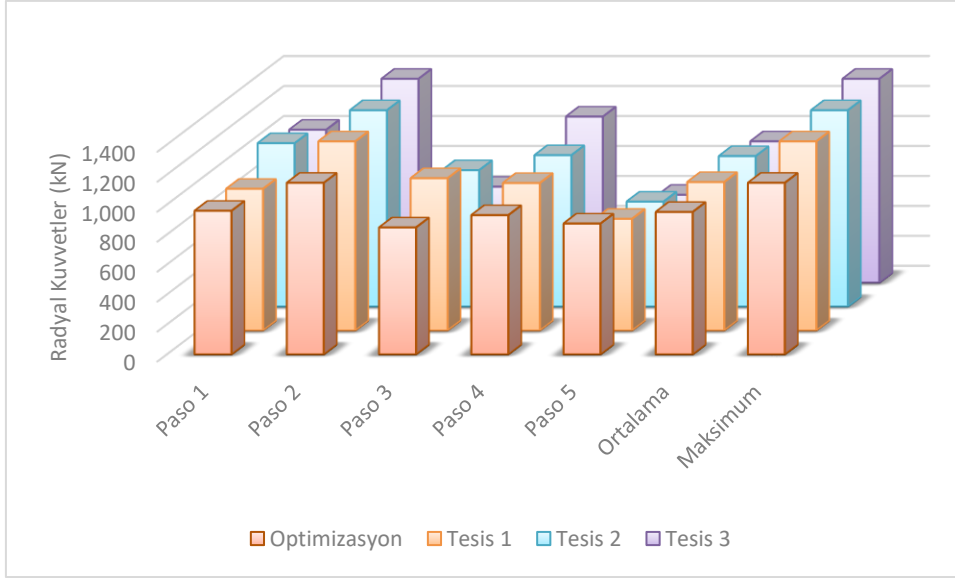
Referans ve optimum paso tasarımlarının radyal kuvvet verilerinin karşılaştırması Şekil 4.4'te verilmiştir. Grafikte her paso kendi arasında değerlendirilirse 2. ve 4. pasalarda optimize edilmiş tasarımının radyal diğerler üç tasarımın radyal kuvvetlerinden daha düşük

olduğu fark edilmektedir. Bunun dışında her paso grubunun kendi radyal kuvvetlerinin ortalaması ele alındığında tesis 3'ün en düşük değere sahip olduğu bunu küçük bir farkla optimize edilmiş paso tasarımının takip ettiği gözlenmektedir. Pasolara ait en büyük  $F_r$  değerleri dikkate alındığında beklenildiği gibi optimize edilmiş paso tasarımının değerlerinin belirgin bir şekilde düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca optimizasyonla elde edilmiş pasolarının radyal kuvvetlerinin kendi arasında karşılaştırması yapılırsa değerlerdeki dalgalanmanın endüstriyel olanlardan daha az olduğu görülmektedir. Bu durum merdanelerin ve hadde tezgâhı parçalarının yorulma ömürlerinin artmasında önemli bir faktördür.

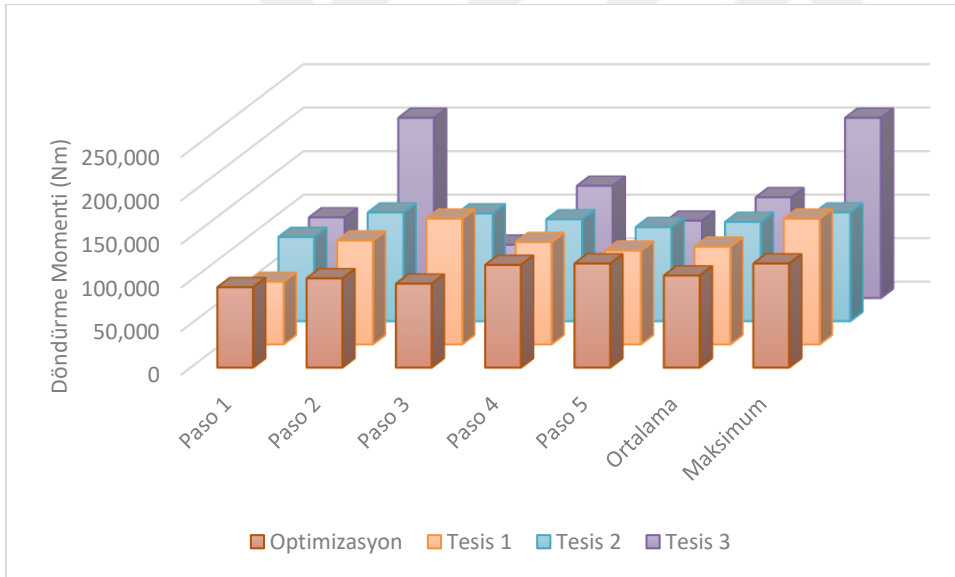


Şekil 4.3. Endüstriyel referans ve birinci aşama optimizasyon çalışmaları sonucunda elde edilen paso tasarımlarının şekillendirme enerjisi karşılaştırması

Şekil 4.5'te optimize edilmiş tasarımın ve referans alınan paso tasarımlarının döndürme momentlerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Pasolar kendi aralarında değerlendirildiğinde optimum tasarımın ikinci ve dördüncü pasolarının en düşük döndürme momentine sahip olduğu fark edilmektedir. Diğer yandan her paso grubunun ortalama ve en yüksek değerleri incelendiğinde optimum paso tasarımının diğerlerine üstünlük sağladığı görülmektedir. Ayrıca tesis 1 ve tesis 3'ün döndürme momenti değerlerinde ciddi şekilde dalgalanma olduğu tespit edilmektedir. Optimum paso tasarımının pasolarının döndürme momenti değerleri arasındaki dalgalanmanın diğer üç tasarımdan daha az olduğu görülmektedir.



Şekil 4.4. Endüstriyel referans ve birinci aşama optimizasyon çalışmaları sonucunda elde edilen paso tasarımlarının şekillendirme radyal kuvvetler karşılaştırması



Şekil 4.5. Endüstriyel referans ve birinci aşama optimizasyon çalışmaları sonucunda elde edilen paso tasarımlarının döndürme momentleri karşılaştırması

Şekil 4.3, 4.4 ve 4.5 birlikte göz önüne alındığında İstenirlik temelli ardışık çözüm arama stratejisi ve önerilen paso optimizasyon metodu ile elde edilen paso tasarımının ciddi bir şekilde enerji tasarrufu sağladığı ve proses sırasında meydana gelen en büyük radyal kuvvet ve döndürme momenti değerlerini kayda değer şekilde azalttığı tespit edilmiştir. Bunun yanında optimize edilmiş pasolara gelen radyal kuvvetler ve döndürme momentlerinin referans tasarımlara göre daha homojen dağıldığı görülmüştür.

Birinci aşama optimizasyonun etkinliğini sayısal olarak ifade etmek için Çizelge 4.13 oluşturulmuştur. Çizelgenin ikinci sütununda sırası her bir tesisin kullandığı toplam şekillendirme enerjisi, tesislerin toplam şekillendirme enerjilerinin ortalaması ve en düşük toplam şekillendirme enerjisine sahip tesis ile optimize edilmiş paso düzeni tarafından kullanılan toplam şekillendirme enerjisi arasındaki farklar oransal olarak listelenmiştir. Diğer sütunlarda ise sırası ile karşılaştırma kriterinin her bir tesisin pasoları arasında en yüksek değere sahip olanı veya paso değerlerinin ortalaması ile optimum paso düzeninin değeri arasındaki oransal farklar sunulmuştur.

Çizelge 4.13. Referans endüstriyel paso tasarımları ile birinci aşama optimum paso tasarımı aralarındaki karşılaştırma sonuçları

| Karşılaştırma Kriteri | Toplam Şekillendirme Enerjisi (%) | Maksimum Döndürme Momenti (%) | Ortalama Döndürme Momenti (%) | Maksimum Radyal Kuvvet (%) | Ortalama Radyal Kuvvet (%) |
|-----------------------|-----------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Tesis 1               | 13,19                             | 17,21                         | 5,73                          | 9,27                       | 4,04                       |
| Tesis 2               | 12,23                             | 4,22                          | 7,33                          | 12,60                      | 5,34                       |
| Tesis 3               | 28,69                             | 42,24                         | 8,62                          | 15,81                      | -0,81                      |
| Tesislerin Ortalaması | 18,78                             | 24,68                         | 7,24                          | 12,64                      | 2,93                       |
| Tesislerin minimumu   | 12,23                             | 4,22                          | 5,73                          | 9,27                       | -0,81                      |

Toplam şekillendirme enerjisinde, gerçekleştirilen birinci aşama optimizasyon çalışması sonucunda elde edilen paso tasarımı ile endüstriyel referans tesislerin ortalamasına göre % 18,78; bunlardan en az enerji kullanan tesise göre %12,23 tasarruf sağlanmıştır. Referans endüstriyel tasarımların her birinin pasoları arasındaki en yüksek döndürme momenti değerleri dikkate alındığında, optimizasyon sonucunda tesislerin ortalamasına göre % 24,68; tesislerin minimumuna göre % 4,22 azalma sağlandığı belirlenmiştir. Benzer şekilde her tasarımın maksimum radyal kuvvetleri karşılaştırılırsa, birinci aşama optimizasyon sonucunda endüstriyel tesislerin ortalamasına göre %12,64, minimumuna göre %9,27 azalma sağlandığı görülmüştür.

Referans endüstriyel paso tasarımlarının son ürün kesitleri birbirlerinden ve optimum paso tasarımlarından farklıdır. Bu nedenden dolayı paso sıralarının kullandığı şekillendirme enerjilerini doğrudan karşılaştırmak muhtemelen pasoların etkinliğini sınamak için tam

olarak objektif olmayabilir. Daha objektif bir karşılaştırma için prosesin toplam şekillendirme enerjisini proses sırasında meydana gelen yüzde kesit daralmasına oranlama yoluna gidilmiştir.

Endüstriyel tesislerin ve birinci aşama optimizasyon sonucu elde edilen tasarımın yüzde kesit daralması başına şekillendirme enerjisi değerleri ve bunların optimizasyon sonucu ile karşılaştırmaları Çizelge 4.14’te sunulmuştur. Durum çalışmasının birinci aşaması sonucunda yüzde kesit daralması başına harcanan şekillendirme enerjisinde endüstriyel tesislerin ortalamasına göre % 16,42, en az enerji harcayana göre % 6,49 tasarruf sağlandığı görülmektedir.

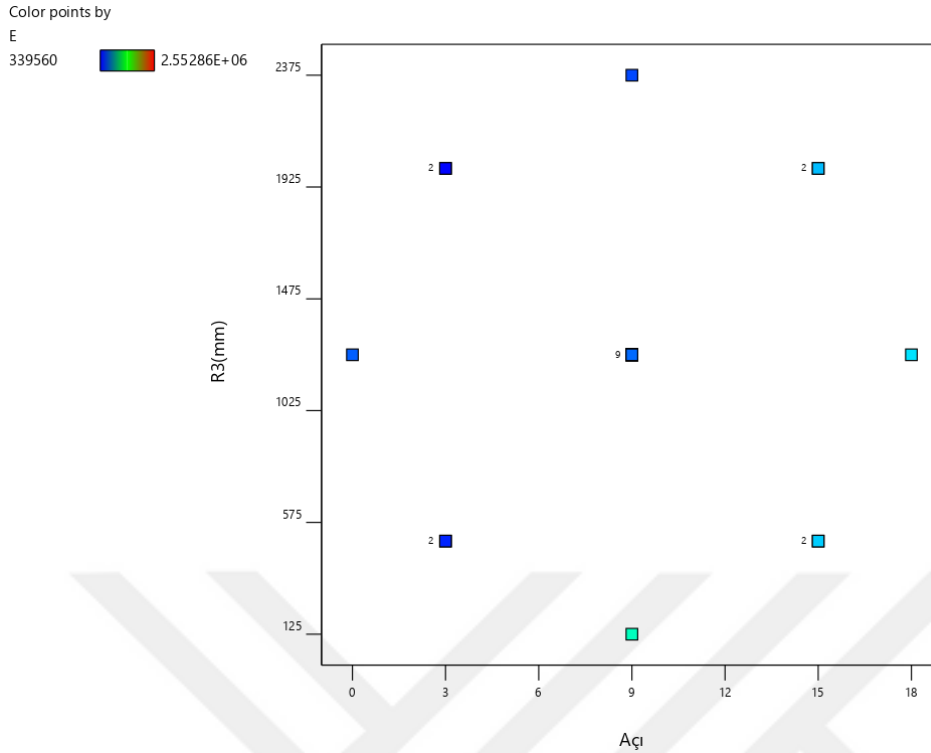
Çizelge 4.14. Referans pasolar ve birinci aşama optimizasyon sonucunda elde edilen yüzde kesit daralması başına şekillendirme enerjisi karşılaştırmaları

|                       | Yüzde kesit daralması<br>başına şekillendirme enerjisi<br>(J) | Optimizasyon ile<br>fark<br>(%) |
|-----------------------|---|---------------------------------|
| Tesis 1               | 53445   | 6,49                            |
| Tesis 2               | 61130   | 18,25                           |
| Tesis 3               | 64796   | 22,87                           |
| Tesislerin ortalaması | 59790   | 16,42                           |
| Optimizasyon          | 49975   | -                               |

### 4.3. İkincil Geometrik Parametrelerin Optimizasyon Sonuçları

#### 4.3.1. Deney Tasarımı

İkincil geometrik parametrelerin optimizasyonunda merkezi kompozit tasarım kullanılmıştır ve simülasyon deneyleri tasarlanan deney parametrelerine tam uyularak gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle bağımsız değişkenlerin dağılım grafiklerinde noktalar beklendiği gibi tasarım noktaları üzerinde ve merkezde görülmektedir. Resim 4.26’ da örnek olarak aç<sub>1</sub> – r<sub>3</sub> dağılımı gösterilmiştir.



Resim 4.26. Aç –  $r_3$  dağılım grafiği

### 4.3.2. İkincil geometrik parametreler için cevap yüzeyleri

İkincil geometrik parametreler için gerçekleştirilen deney tasarımı ve tasarlanan bu deneylerin SEY simülasyonları kullanılarak gerçekleştirilmesi sonrasında bağımsız değişken setlerini ve bu setlere karşılık gelen üç bağımlı değişkenleri ( $F_r$ ,  $M_t$  ve  $E_d$ ) içeren Çizelge 3.11 oluşturulmuştur. Daha sonra bu çizelgedeki veriler kullanılarak radyal kuvvetler, döndürme momentleri ve deformasyon enerjileri için varyans analizi gerçekleştirilmiş ve cevap yüzeyleri oluşturulmuştur.

#### Radyal kuvvetler ( $F_r$ ) için ikincil geometrik parametreler cinsinden cevap yüzeyleri:

Deneme yanımlar sonrasında radyal kuvvetler için indirgenmiş kübik polinomsal cevap yüzeyinin en uygun olduğu görülmüştür. gerçekleştirilen ANOVA sonuçları Çizelge 4.15'te sunulmuştur.

Çizelgede modelin serbestlik derecesinin 16 olması modelde birbirinden bağımsız 16 terim olduğunu ifade eder. Regresyon modelinin F derisinin 2515,61 olması ve p değerinin 0,0001'den küçük olması modelin anlamlı olduğunu gösterir. Çizelge 4.15'te  $r_1$  ve  $r_2$

terimlerinin p değeri 0,1’den büyük olması bu terimler modelde anlamlı olmadığını gösterir. Bu terimler anlamlı olan diğer terimler tarafından içerdiği için hiyerarşiyi korumak için modele dahil edilmiştir. Regresyon modeli için uyum eksikliği hesaplanamamıştır. Bu durum modelde uyumsuzlukların bulunabileceğini gösterir.

Çizelge 4.15. Fr için ANOVA sonuçları

| Kaynak                             | Kareler Toplamı | Serbestlik derecesi | Ortalama Kareler | F-değeri | p-değeri |               |
|------------------------------------|-----------------|---------------------|------------------|----------|----------|---------------|
| <b>Model</b>                       | 4.15E+05        | 16                  | 25910.75         | 2515.61  | < 0.0001 | Anlamlı       |
| <b><math>\alpha</math></b>         | 14450           | 1                   | 14450            | 1402.91  | < 0.0001 |               |
| <b><math>r_3</math></b>            | 2.20E+05        | 1                   | 2.20E+05         | 21338.3  | < 0.0001 |               |
| <b><math>r_1</math></b>            | 0.792           | 1                   | 0.792            | 0.0769   | 0.7953   | Anlamlı değil |
| <b><math>r_2</math></b>            | 2               | 1                   | 2                | 0.1942   | 0.6822   | Anlamlı değil |
| <b><math>\alpha r_3</math></b>     | 73.21           | 1                   | 73.21            | 7.11     | 0.056    |               |
| <b><math>\alpha r_1</math></b>     | 2415.12         | 1                   | 2415.12          | 234.48   | 0.0001   |               |
| <b><math>\alpha r_2</math></b>     | 94482.04        | 1                   | 94482.04         | 9173.01  | < 0.0001 |               |
| <b><math>r_1 r_3</math></b>        | 780.13          | 1                   | 780.13           | 75.74    | 0.001    |               |
| <b><math>r_2 r_3</math></b>        | 673.45          | 1                   | 673.45           | 65.38    | 0.0013   |               |
| <b><math>r_1 r_2</math></b>        | 1711.12         | 1                   | 1711.12          | 166.13   | 0.0002   |               |
| <b><math>\alpha^2</math></b>       | 3346.51         | 1                   | 3346.51          | 324.9    | < 0.0001 |               |
| <b><math>r_3^2</math></b>          | 1.34E+05        | 1                   | 1.34E+05         | 12978.48 | < 0.0001 |               |
| <b><math>r_1^2</math></b>          | 716.8           | 1                   | 716.8            | 69.59    | 0.0011   |               |
| <b><math>r_2^2</math></b>          | 185.66          | 1                   | 185.66           | 18.02    | 0.0132   |               |
| <b><math>\alpha r_2 r_3</math></b> | 14290.86        | 1                   | 14290.86         | 1387.46  | < 0.0001 |               |
| <b><math>r_1^3</math></b>          | 114.01          | 1                   | 114.01           | 11.07    | 0.0292   |               |

Çizelge 4.16’da modelin uyumu ile ilgili istatistikler sunulmuştur. Çizelgede  $R^2$  değerinin 0,9999 olması regresyon modelinin  $F_r$ ’deki değişimin yaklaşık %99,99’unu açıkladığını göstermektedir. Bu değer model için yeterli bir güvenilirlik seviyesini göstermektedir (Amirov ve Vakhshouri 2020; Moghaddas 2021).

Çizelge 4.16. İkincil geometrik parametrelerin Fr regresyon modeli için uyum istatistikleri

| Std. sapma | Ortalama | C.V. % | $R^2$  | Düzeltilmiş $R^2$ | Tahmini $R^2$ | Yeterlilik hassasiyeti |
|------------|----------|--------|--------|-------------------|---------------|------------------------|
| 3,21       | 1009,81  | 0,3178 | 0,9999 | 0,9995            | Mevcut değil  | 233,76                 |



Diğer yandan düzeltilmiş  $R^2$  0,9995 olarak görülmektedir. Bu değer  $R^2$  değerine oldukça yakın olması modelde gereksiz terimlerin bulunmadığını göstermektedir. Ayrıca  $R^2_{adj}$  değerinin bire yakın olması modelin güvenilirliğinin oldukça yüksek olduğunun bir ifadesidir.

Modelin tahmini  $R^2$  değeri hesaplanamamıştır. Bu durum modelin tasarım noktaları dışındaki bazı tahmin yeteneğinin yetersiz kalabileceğini göstermektedir.

Bunun yanında oluşturulan regresyon modelinin yeterlilik hassasiyeti 233,76 olarak bulunmuştur. Yeterlilik hassasiyetinin 4'ten büyük olması sinyal gürültü oranının oldukça tatmin edici olduğu anlamına gelmektedir (Mohammed ve diğerleri 2020; Waseem ve diğerleri 2020).

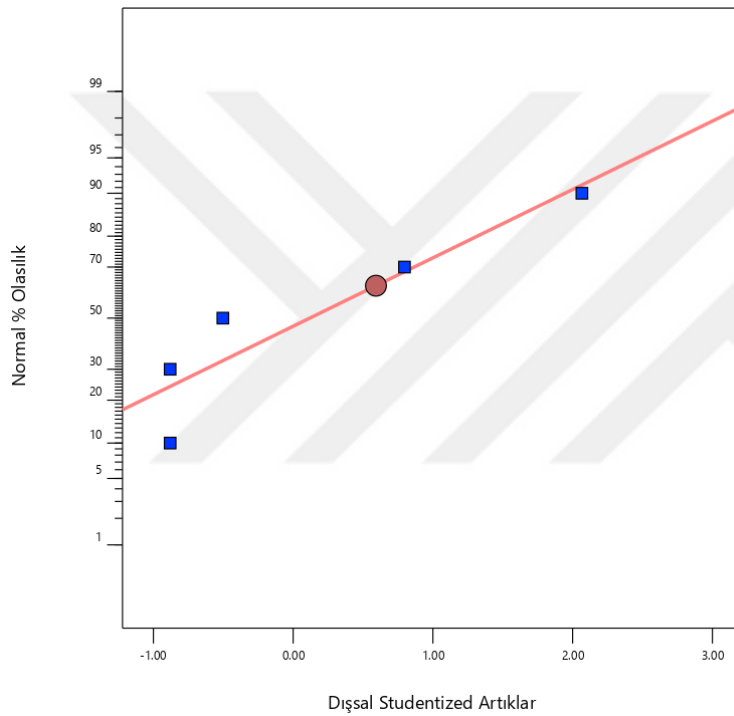
İkincil geometrik parametreler için  $F_r$ 'nin kodlanmış ve gerçek değerler cinsinden eşitlik katsayıları Çizelge 4.17'de listelenmiştir. Bu çizelgedeki "Kodlanmış Faktörler İçin Katsayı" sütunu incelendiğinde  $F_r$ 'yi en fazla etkileyen terimlerin sırası ile,  $r_3$ ,  $\alpha r_2$ ,  $r_3^2$  ve  $\alpha r_2 r_3$  olduğu görülebilir. Çizelgenin gerçek faktörler için katsayı değerleri kullanılarak oluşturulmuş olan regresyon denklemi Eşitlik 4.4'te sunulmuştur.

Çizelge 4.17. İkincil geometrik parametreler için  $F_r$ 'nin kodlanmış ve gerçek değerler cinsinden eşitlik katsayıları

| <b>Faktör</b>                      | <b>Kodlanmış Faktörler İçin Katsayı</b> | <b>Gerçek Faktörler İçin Katsayı</b> |
|------------------------------------|---|--------------------------------------|
| <b>Sabit</b>                       | 943,6                                   | 827,2562                             |
| <b><math>\alpha</math></b>         | 56,67                                   | 89,8875                              |
| <b><math>r_3</math></b>            | -221                                    | -0,5818                              |
| <b><math>r_1</math></b>            | -0,6583                                 | 3,0496                               |
| <b><math>r_2</math></b>            | -0,6667                                 | 65,6407                              |
| <b><math>\alpha r_3</math></b>     | -5,04                                   | -0,0366                              |
| <b><math>\alpha r_1</math></b>     | 17,37                                   | 0,3861                               |
| <b><math>\alpha r_2</math></b>     | -181,12                                 | -7,5700                              |
| <b><math>r_1 r_3</math></b>        | -9,88                                   | -0,0018                              |
| <b><math>r_2 r_3</math></b>        | 15,29                                   | -0,0228                              |
| <b><math>r_1 r_2</math></b>        | -14,62                                  | -0,2600                              |
| <b><math>\alpha^2</math></b>       | 21,51                                   | 0,5975                               |
| <b><math>r_3^2</math></b>          | 135,96                                  | 0,0002                               |
| <b><math>r_1^2</math></b>          | 9,96                                    | -0,2704                              |
| <b><math>r_2^2</math></b>          | 5,07                                    | 0,0901                               |
| <b><math>\alpha r_2 r_3</math></b> | 95,71                                   | 0,0028                               |
| <b><math>r_1^3</math></b>          | 5,03                                    | 0,0119                               |

$$F_r = 89,8875 \alpha + 3,0496r_1 + 65,6407r_2 - 0,5818r_3 + \alpha r_1 - 7,57 \alpha r_2 - 0,0366 \alpha r_3 - 0,26r_1r_2 - 0,0018r_1r_3 - 0,0228r_2r_3 + 0,0028 \alpha r_2r_3 + 0,0002r_1^3 + 827,26(4.4)$$

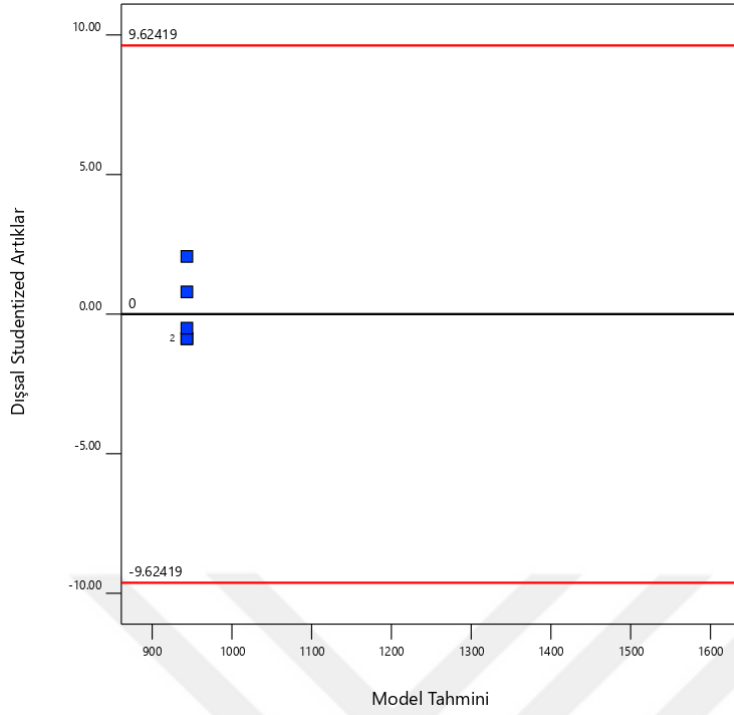
Modelin etkinliği ile ilgili daha fazla bilgi edinmek için normal dağılım grafiklerinden faydalanılmıştır. Resim 4.27'de  $F_r$ 'nin ikincil geometrik parametrelere göre değişim modeli için dışsal studentize edilmiş artıkların % olasılık dağılımını sunulmuştur. Grafikte noktalar yaklaşık olarak bir doğru üzerinde dağıldığı görülmektedir. Bu durum modelin yeterli olduğunu ve dönüşüme gerek olmadığını gösterir.



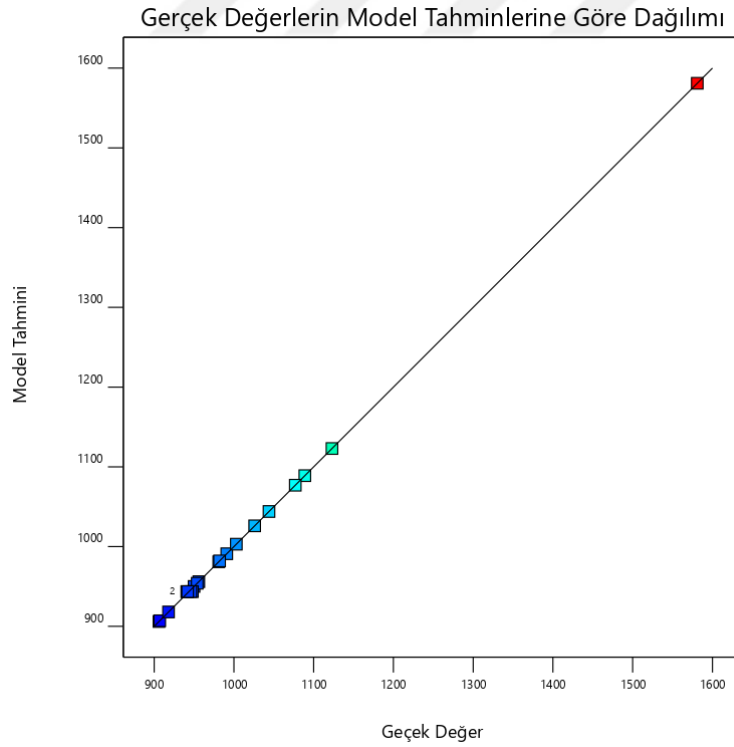
Resim 4.27. İkincil geometrik parametreler için  $F_r$  modelinin dışsal studentize artıklar normal % olasılık dağılımını

Resim 4.28'de dışsal studentize artıkların model tahminine göre dağılım grafiği görülmektedir. Grafikte az sayıda nokta bulunduğu için herhangi bir desen görülmemektedir ve noktalar merkez çizgisine göre homojene yakın bir dağılım göstermektedir. Bu durum modeldeki değişimin sabit olduğunu ve dönüşüme gerek olmadığını gösterir.

Regresyon modelinin tahmin yeteneğini belirlemek için Resim 4.29'de gerçek değerlere karşılık model tahminleri dağılımını sunulmuştur. Grafikte noktalar  $y = x$  doğrusuna çok yakın bir dağılım sergilemektedir. Bu durum regresyon modelinin gerçek değerleri çok iyi bir Şekilde temsil ettiğini göstermektedir.



Resim 4.28. İkincil geometrik parametreler için  $F_r$  modelinin model tahminine karşılık dışsal studentize artıklar dağılımı



Resim 4.29. İkincil geometrik parametreler için  $F_r$  modelinin gerçek değere karşılık model tahmini karşılık dağılımı

Döndürme momenti ( $M_t$ ) için ikincil geometrik parametreler cinsinden cevap yüzeyleri:

Deneme yanımlar sonucunda döndürme momentinin polinomsal cevap yüzeyi için en uygun derecesinin ikinci derece olduğu görülmüştür. Deneme yanımlar sırasında indirgenme yapmanın  $R^2$ ,  $R_{adj}^2$  ve  $R_{pred}^2$  üzerindeki etkilerinin olumlu sonuç vermediği görüldüğü için modelde indirgenme yapılmamıştır. Yapılan ikici dereceden ANOVA sonuçları Çizelge 4.18’de sunulmuştur.

Çizelge 4.18’de modelin serbestlik derecesinin 14 olması modelde birbirinden bağımsız 14 terim olduğunu ifade eder. Regresyon modelinin F değeri 11,68 ve p değerinin 0,0032 olması modelin anlamlı olduğunu gösterir. Çizelgede  $\alpha$ ,  $r_2$ ,  $r_1^2$  ve  $r_2^2$  terimlerinin p değerleri 0,1’den büyük olması bu terimlerin modeldeki etkisinin anlamlı olmadığını gösterir. İndirgenme yapılmadığı için bu terimler modelden çıkarılmamıştır. Uyum eksikliğinin p değerinin 0,05’ten büyük olması uyum eksikliğinin anlamlı olmadığını gösterir fakat bu değer 0,1’den küçük olması uyum eksikliğinin anlamlı olmamasının yeterli seviyede olmadığını ve modelde uyumsuzlukların olabileceğini ifade eder.

Çizelge 4.18.  $M_t$  için ANOVA sonuçları

| Kaynak                         | Kareler Toplamı | Serbestlik derecesi | Ortalama Kareler | F-değeri | p-değeri |               |
|--------------------------------|-----------------|---------------------|------------------|----------|----------|---------------|
| <b>Model</b>                   | 1,827E+11       | 14                  | 1,31E+10         | 11,68    | 0,0032   | Anlamlı       |
| <b><math>\alpha</math></b>     | 1,88E+09        | 1                   | 1,88E+09         | 1,69     | 0,2418   | Anlamlı değil |
| <b><math>r_1</math></b>        | 2,00E+10        | 1                   | 2,00E+10         | 17,87    | 0,0055   |               |
| <b><math>r_2</math></b>        | 6,85E+06        | 1                   | 6,85E+06         | 0,01     | 0,9401   | Anlamlı değil |
| <b><math>r_3</math></b>        | 6,64E+09        | 1                   | 6,64E+09         | 5,94     | 0,0506   |               |
| <b><math>\alpha r_1</math></b> | 2,29E+10        | 1                   | 2,29E+10         | 20,47    | 0,0040   |               |
| <b><math>\alpha r_2</math></b> | 2,15E+10        | 1                   | 2,15E+10         | 19,27    | 0,0046   |               |
| <b><math>\alpha r_3</math></b> | 7,30E+09        | 1                   | 7,30E+09         | 6,54     | 0,0431   |               |
| <b><math>r_1 r_2</math></b>    | 3,28E+10        | 1                   | 3,28E+10         | 29,35    | 0,0016   |               |
| <b><math>r_1 r_3</math></b>    | 3,24E+10        | 1                   | 3,24E+10         | 29,03    | 0,0017   |               |
| <b><math>r_2 r_3</math></b>    | 5,42E+09        | 1                   | 5,42E+09         | 4,85     | 0,0699   |               |
| <b><math>\alpha^2</math></b>   | 5,57E+09        | 1                   | 5,57E+09         | 4,98     | 0,0671   |               |
| <b><math>r_1^2</math></b>      | 3,51E+09        | 1                   | 3,51E+09         | 3,14     | 0,1269   | Anlamlı değil |
| <b><math>r_2^2</math></b>      | 6,29E+08        | 1                   | 6,29E+08         | 0,56     | 0,4814   | Anlamlı değil |
| <b><math>r_3^2</math></b>      | 9,76E+09        | 1                   | 9,76E+09         | 8,74     | 0,0254   |               |
| <b>Uyum eksikliği</b>          | 4,91E+09        | 2                   | 2,45E+09         | 5,46     | 0,0718   | Anlamlı değil |

İkincil geometrik parametrelerin  $M_t$  regresyon modelinin uyum istatistikleri Çizelge 4.19’da sunulmuştur. Çizelgede  $R^2$  değerinin 0.9646 olması modelin  $M_t$ ’deki değişimin % 96,46’sını açıklayabildiğini ifade eder. Bu değer model için yeterli güvenlik seviyesindedir.

Çizelge 4.19. İkincil geometrik parametrelerin  $M_t$  regresyon modeli için uyum istatistikleri

| Std. sapma | Ortalama | C.V. % | $R^2$  | Düzeltilmiş $R^2$ | Tahmini $R^2$ | Yeterlilik hassasiyeti |
|------------|----------|--------|--------|-------------------|---------------|------------------------|
| 33429.12   | 149900   | 22,30  | 0,9646 | 0,882             | -1,220        | 16,095                 |

Diğer taraftan düzeltilmiş  $R^2$  seviyesinin 0,882 olması tek başına ele alındığında yeterli bir güvenilirlik seviyesini ifade edebilirdi. Fakat  $R^2$  ile düzeltilmiş  $R^2$  arasında bir miktar fark olması modelde uyumsuzluk olabileceğini göstermektedir (Amirov ve Vakhshouri 2020; Montgomery 2008).

Modelin tahmini  $R^2$  değeri -1,22 olarak hesaplanmıştır. Bu değer negatif olması bu cevabı daha iyi tahmin edebilecek regresyon modellerinin bulunabileceğini ifade etmektedir. Daha yüksek dereceden modeller de denediği için ve daha iyi sonuçlar elde edilemediği için halihazırdaki model ile devam etmeye karar verilmiştir.

Diğer yandan modelin yeterlilik hassasiyeti 16.01 olarak hesaplanmıştır. Bu değer 4’ten büyük olduğu için sinyal gürültü oranının yeterli olduğu düşünülmektedir.

İkincil geometrik parametreler için  $M_t$ ’nin kodlanmış ve gerçek değerler cinsinden eşitlik katsayıları Çizelge 4.20’de listelenmiştir. Bu çizelgedeki “Kodlanmış Faktörler İçin Katsayı” sütunu incelendiğinde  $M_t$ ’yi en fazla etkileyen terimlerin sırası ile  $\alpha_2$ ,  $r_1r_2$ ,  $r_1r_3$  ve  $\alpha_1$  olduğu görülebilir. Çizelgenin gerçek faktörler için katsayı değerleri kullanılarak oluşturulmuş olan regresyon denklemi Eşitlik 4.5’te sunulmuştur.

$$M_t = 15113,4 \alpha + 4273,72r_1 + 18624,01r_2 - 40,27r_3 + 1188,30 \alpha r_1 - 1921,79 \alpha r_2 - 11,19 \alpha r_3 - 1138,31r_1r_2 - 11,32r_1r_3 + 7,71r_2r_3 + 636,35 \alpha^2 + 323,28r_1^2 + 1184,45r_2^2 + 0,05r_3^2 - 34227,96 \quad (4.5)$$

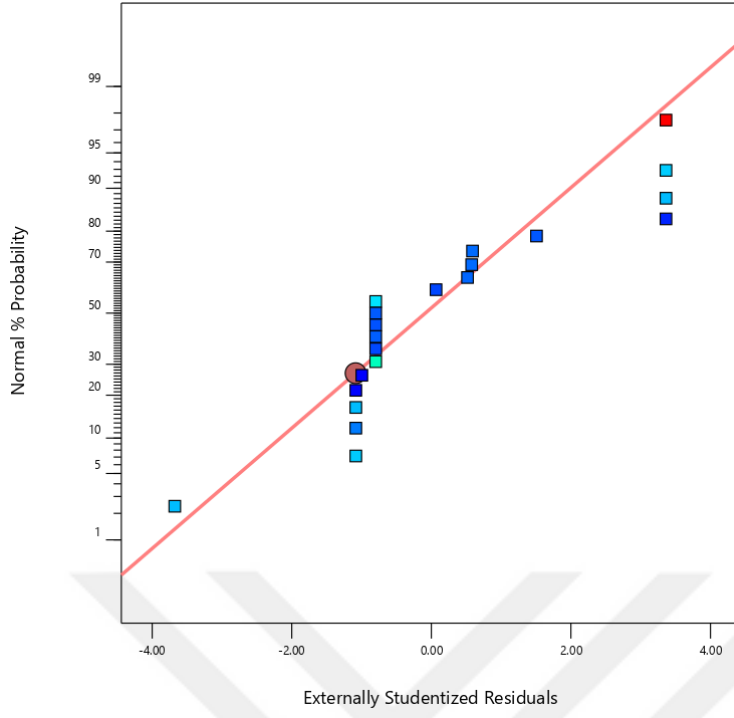
Çizelge 4.20. İkincil geometrik parametreler için  $M_i$ 'nin kodlanmış ve gerçek değerler cinsinden eşitlik katsayıları

| Faktör       | Kodlanmış Faktörler İçin Katsayı | Gerçek Faktörler İçin Katsayı |
|--------------|----------------------------------|-------------------------------|
| Sabit        | 1,03E+05                         | -34227,96                     |
| $\alpha$     | 20463,50                         | 15113,40                      |
| $r_1$        | -39971,90                        | 4273,72                       |
| $r_2$        | 1234,00                          | 18624,01                      |
| $r_3$        | -38419,17                        | -40,27                        |
| $\alpha r_1$ | 53473,56                         | 1188,30                       |
| $\alpha r_2$ | -86480,48                        | -1921,79                      |
| $\alpha r_3$ | -50358,44                        | -11,19                        |
| $r_1 r_2$    | -64029,81                        | -1138,31                      |
| $r_1 r_3$    | -63680,19                        | -11,32                        |
| $r_2 r_3$    | 43387,69                         | 7,71                          |
| $\alpha^2$   | 22908,45                         | 636,35                        |
| $r_1^2$      | 18184,45                         | 323,28                        |
| $r_2^2$      | 136,95                           | 1184,45                       |
| $r_3^2$      | 30343,34                         | 0,05                          |

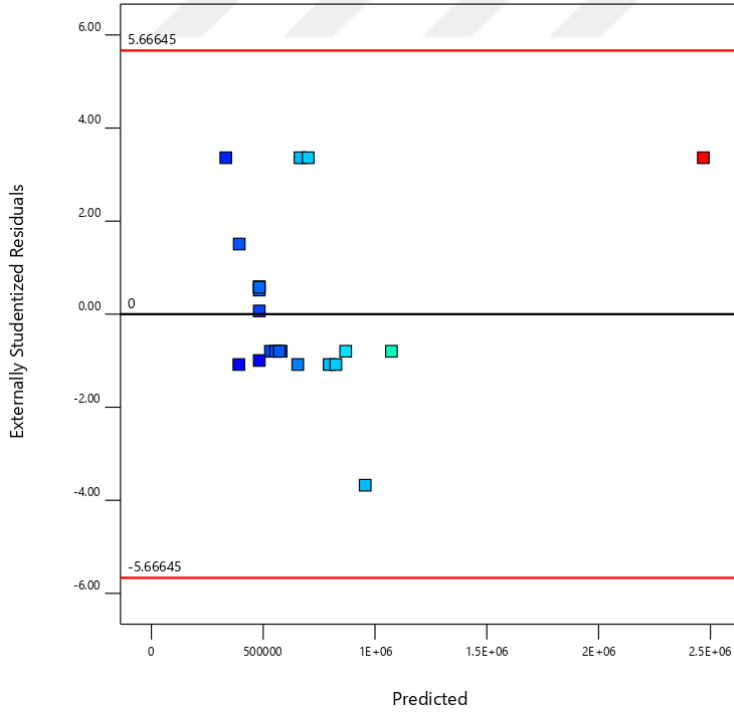
Modelin etkinliğini daha fazla incelemek için normal dağılım grafikleri kullanılmıştır (Bkz. Resim 4.30-4.32).

Artıkların normal bir dağılım izleyip izlemediğini sınamak için standartlaştırılmış atıkların dağılım grafikleri kullanılmaktadır.  $M_i$ 'nin ikincil geometrik parametrelere göre değişim modeli için dışsal studentize edilmiş artıkların % olasılık dağılımı Resim 4.30'da sunulmuştur. Grafikte noktalar S şeklinde bir dağılım göstermese de çoğunluğu eğilim doğrusundan uzakta bulunmaktadır. Bu durum modelin uyum problemi olabileceğini ve transformasyon gerekebileceğini göstermektedir. Fakat transformasyonlar yapılarak gerçekleştirilen denemeler sonucunda modelin daha iyiye gitmediği gözlemlendiğinden mevcut model ile devam etmeye karar verilmiştir.

Resim 4.31'de ise ikincil geometrik parametrelerin  $M_i$  modeli için dışsal studentize artıkların model tahminlerine göre dağılımı görülmektedir. Noktaların dağılımı incelendiğinde belirgin bir desen görülmemektedir. Bu da modelde bir değişim ihtiyacı olmadığını bir ifadesidir.

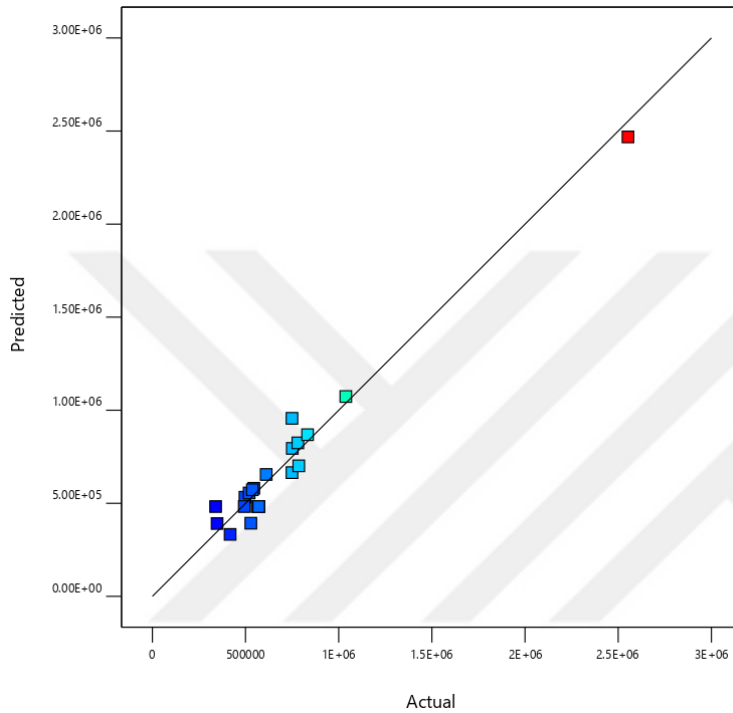


Resim 4.30. İkincil geometrik parametreler için  $M_t$  modelinin dışsal studentize artıklar normal % olasılık dağılımı



Resim 4.31. İkincil geometrik parametreler için  $M_t$  modelinin model tahminine karşılık dışsal studentize artıklar dağılımı

İkincil geometrik parametrelerin  $M_t$  modelinin tahmin yeteneğini belirlemek için oluşturulan gerçek değerlere karşılık model tahminleri dağılımı Resim 4.32’de görülmektedir. Grafik incelendiğinde bazı tolere edilebilecek sapmalarla birlikte noktaların genel olarak  $y=x$  doğrusuna yakın bir şekilde dağıldığı görülmektedir. Bu da modelin gerçek değerleri kabul edilebilecek seviyede temsil ettiğinin bir göstergesidir.



Resim 4.32. İkincil geometrik parametreler için  $M_t$  modelinin gerçek değere karşılık model tahmini karşılık dağılımı

Şekillendirme enerjisi ( $E_d$ ) için ikincil geometrik parametreler cinsinden cevap yüzeyleri:

Deneme yanımlar sonucunda ikinci dereceden polinomsal modelin şekillendirme enerjisinin ikincil geometrik parametreler cinsinden cevap yüzeyi için uygun bulunmuştur. Bunun için uygulanan ANOVA sonuçları Çizelge 4.21’de listelenmiştir.

Çizelge 4.18 ve Çizelge 4.21 birbiri ile karşılaştırıldığında modellerin ve terimlerin F değerleri ve p değerlerinin aynı oldukları görülmektedir. Şekillendirme enerjisi ile ilgili Eş. 3.57 incelendiğinde şekillendirme enerjisinin dolaylı olarak döndürme momenti ve iş parçası boyu ile ilgili olduğu görülmektedir. İş parçası boyu ise iş parçasının kesit alanı ile ters orantılıdır ve deney setlerindeki pasoların kesit alanlarının birbirine eşittir. İki cevap



değişkenine ait istatistiksel değerlerin eşit olmasının nedeninin bahsedilen döndürme momenti ile şekillendirme enerjisi arasındaki bu ilişki olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 4.21. İkincil geometrik parametrelerin  $E_d$  modeli için ANOVA sonuçları

| Kaynak                         | Kareler Toplamı | Serbestlik derecesi | Ortalama Kareler | F-değeri | p-değeri |               |
|--------------------------------|-----------------|---------------------|------------------|----------|----------|---------------|
| <b>Model</b>                   | 4,03E+12        | 14                  | 2,88E+11         | 11,680   | 0,0032   | Anlamlı       |
| <b><math>\alpha</math></b>     | 4,16E+10        | 1                   | 4,16E+10         | 1,690    | 0,24180  |               |
| <b><math>r_3</math></b>        | 1,47E+11        | 1                   | 1,47E+11         | 5,940    | 0,05060  |               |
| <b><math>r_1</math></b>        | 4,41E+11        | 1                   | 4,41E+11         | 17,870   | 0,00550  |               |
| <b><math>r_2</math></b>        | 1,51E+08        | 1                   | 1,51E+08         | 0,006    | 0,94010  |               |
| <b><math>\alpha r_3</math></b> | 1,61E+11        | 1                   | 1,61E+11         | 6,540    | 0,04310  |               |
| <b><math>\alpha r_1</math></b> | 5,05E+11        | 1                   | 5,05E+11         | 20,470   | 0,00400  |               |
| <b><math>\alpha r_2</math></b> | 4,75E+11        | 1                   | 4,75E+11         | 19,270   | 0,00460  |               |
| <b><math>r_1 r_3</math></b>    | 7,16E+11        | 1                   | 7,16E+11         | 29,030   | 0,00170  |               |
| <b><math>r_2 r_3</math></b>    | 1,20E+11        | 1                   | 1,20E+11         | 4,850    | 0,06990  |               |
| <b><math>r_1 r_2</math></b>    | 7,23E+11        | 1                   | 7,23E+11         | 29,350   | 0,00160  |               |
| <b><math>\alpha^2</math></b>   | 1,23E+11        | 1                   | 1,23E+11         | 4,980    | 0,06710  |               |
| <b><math>r_3^2</math></b>      | 2,15E+11        | 1                   | 2,15E+11         | 8,740    | 0,02540  |               |
| <b><math>r_1^2</math></b>      | 7,73E+10        | 1                   | 7,73E+10         | 3,140    | 0,12690  |               |
| <b><math>r_2^2</math></b>      | 1,39E+10        | 1                   | 1,39E+10         | 0,563    | 0,48140  |               |
| <b>Uyum eksikliği</b>          | 1,08E+11        | 2                   | 5,41E+10         | 5,46     | 0,0718   | Anlamlı değil |

İkincil geometrik değişkenler cinsinden  $E_d$  için geliştirilen modelin uyum istatistikleri Çizelge 4.22’de sunulmuştur. Çizelgede  $R^2$ , düzeltilmiş  $R^2$ , tahmini  $R^2$  ve yeterlilik hassasiyeti değerleri  $M_t$  için hazırlanan Çizelge 4.19’deki değerler ile aynıdır ve bu iki çizelgedeki değerlerler kullanılarak gerçekleştirilen çıkarımlar tamamen aynıdır.

Çizelge 4.22. İkincil geometrik parametrelerin  $E_d$  regresyon modeli için uyum istatistikleri

| Std. sapma | Ortalama | C.V. % | $R^2$  | Düzeltilmiş $R^2$ | Tahmini $R^2$ | Yeterlilik hassasiyeti |
|------------|----------|--------|--------|-------------------|---------------|------------------------|
| 1,57E+05   | 7,04E+05 | 22,30  | 0,9646 | 0,882             | -1,220        | 16,095                 |

İkincil geometrik parametreler için  $E_d$ ’nin kodlanmış ve gerçek değerler cinsinden eşitlik katsayıları Çizelge 4.23’te sunulmuştur. Bu çizelgeden de Çizelge 4.20’de olduğu gibi etkili faktörlerin  $\alpha r_2$ ,  $r_1 r_2$ ,  $r_1 r_3$  ve  $\alpha r_1$  olduğu görülmektedir. Gerçek faktörler için katsayılar kullanılarak oluşturulan  $E_d$  regresyon modeli Eş 4.6’da verilmiştir.

$$E_d = 70975,26 \alpha - 189,13r_1 + 20070,17r_2 + 87461,73r_3 + 5580,48 \alpha r_1 - 9025,07 \alpha r_2 - 52,55 \alpha r_3 - 5345,70r_1r_2 - 53,17r_2r_3 - 36,22r_1r_3 + 7,71r_2r_3 + 2988,40 \alpha^2 + 1518,18r_1^2 + 643r_2^2 + 0,25r_3^2 - 1,61E + 05 \quad (4.6)$$

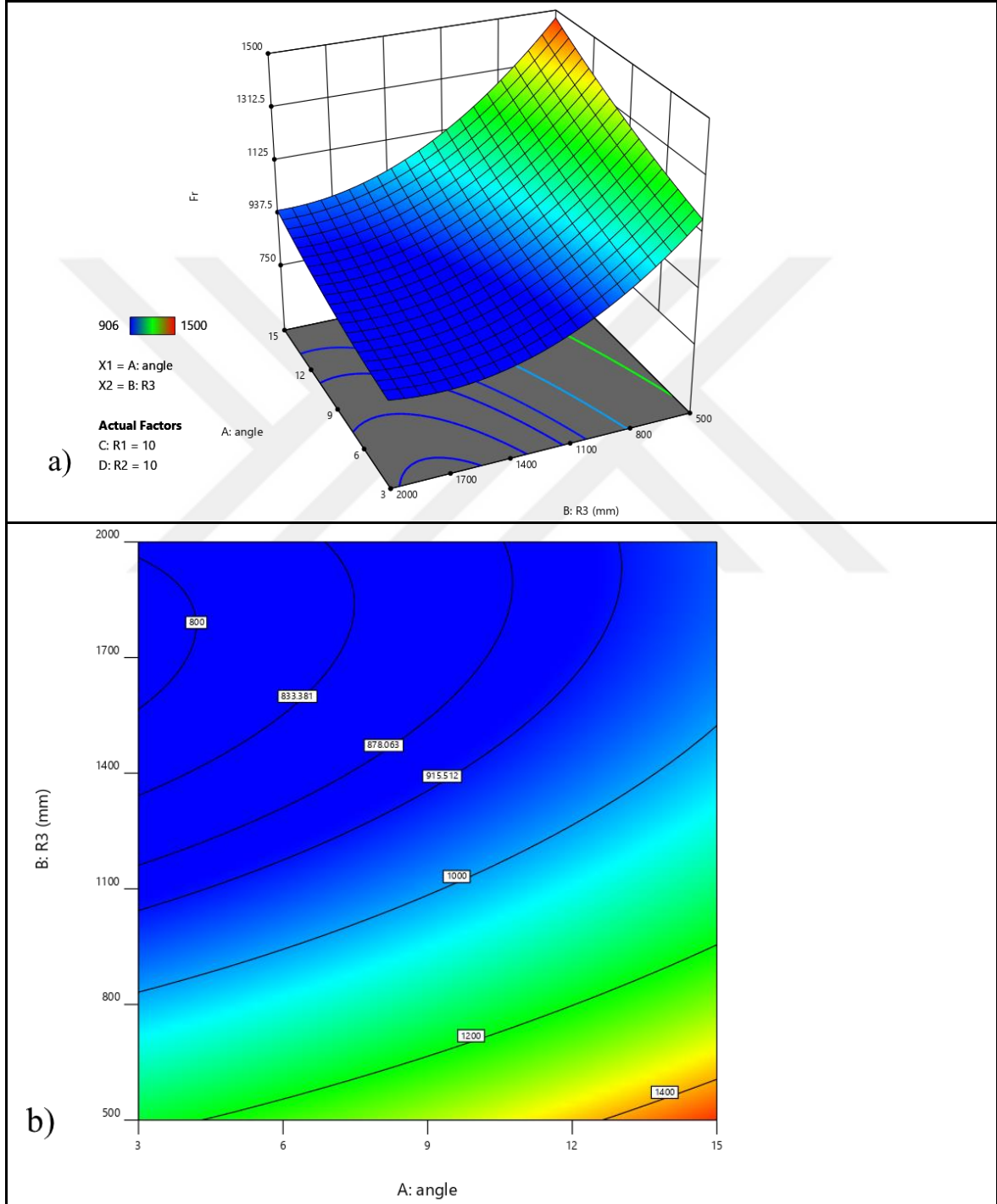
Çizelge 4.23. İkincil geometrik parametreler için  $E_d$ 'nin kodlanmış ve gerçek değerler cinsinden eşitlik katsayıları

| Faktör       | Kodlanmış Faktörler İçin Katsayı | Gerçek Faktörler İçin Katsayı |
|--------------|----------------------------------|-------------------------------|
| Sabit        | 4,83E+05                         | -1,61E+05                     |
| $\alpha$     | 96100,29                         | 70975,26                      |
| $r_1$        | -1,88E+05                        | -189,13                       |
| $r_2$        | 5795,09                          | 20070,17                      |
| $r_3$        | -1,80E+05                        | 87461,73                      |
| $\alpha r_1$ | 2,51E+05                         | 5580,48                       |
| $\alpha r_2$ | -4,06E+05                        | -9025,07                      |
| $\alpha r_3$ | -2,37E+05                        | -52,55                        |
| $r_1 r_2$    | -3,01E+05                        | -5345,70                      |
| $r_1 r_3$    | -2,99E+05                        | -53,17                        |
| $r_2 r_3$    | 2,04E+05                         | -36,22                        |
| $\alpha^2$   | 1,08E+05                         | 2988,40                       |
| $r_1^2$      | 85397,46                         | 1518,18                       |
| $r_2^2$      | 36176,79                         | 643                           |
| $r_3^2$      | 1,43E+05                         | 0,25                          |

Elde edilen  $E_d$  regresyon modelinin etkinliğini görmek için oluşturulan dağılım grafikleri Resim 4.33, Resim 4.34 ve Resim 4.35'te görülmektedir. Grafikler  $M_t$ 'ye ait dağılım grafikleriyle karşılaştırıldığında birbirleriyle aynı olduğu görülmektedir. Bunun nedeni yukarıda da açıklandığı gibi cevap yüzeyleri için oluşturulan deney setleri için şekillendirme enerjisinin döndürme momenti ile doğru orantılı olmasıdır. Bu durumda  $M_t$  ile ilgili dağılım grafikleri için yapılan değerlendirmeler  $E_d$  dağılım grafikleri için de geçerlidir.

İkincil geometrik parametreler cinsinden cevap yüzeylerinin görselleştirilmesi ancak iki bağımsız sabit tutulup diğer ikisinin değişen değerlerine karşılık 3B cevap yüzeyinin ya da cevap değerlerinin renklerle ve eşdeğer eğrileriyle temsil edildiği konturların oluşturulmasıyla yapılabilir. En ve yükseklik optimizasyonu yapılırken her pasoda dört bağımsız değişkenin ikisi ( $e_1$  ile  $h_1$  veya  $e_2$  ile  $h_2$ ) ardışıklıktan dolayı sabitti ve bağımlı değişkenlerin kalan iki bağımsız değişkene göre değişimi gözlenebilmekteydi. İkincil geometrik parametrelerde kendiliğinden oluşan böyle sabit değerler yoktur ve 4 bağımsız

değişkenin herhangi iki kombinasyonunda sonsuz sayıda 3B yüzey veya kontur grafiği çizilebilir. Çalışmanın bu kısmında bir fikir edinmek için endüstriyel tasarımlarda çok kullanılan radyüs ve ölçüleri sabit değerler olarak kullanılıp iki değişik kombinasyon için inceleme yapılmıştır.



Resim 4.33.  $r_1 = 10$  mm ve  $r_2 = 10$  mm sabit değerleri için  $F_r$ 'nin  $\alpha$  ve  $r_3$  ile değişiminin a) 3B yüzey ve b) kontur grafikleri

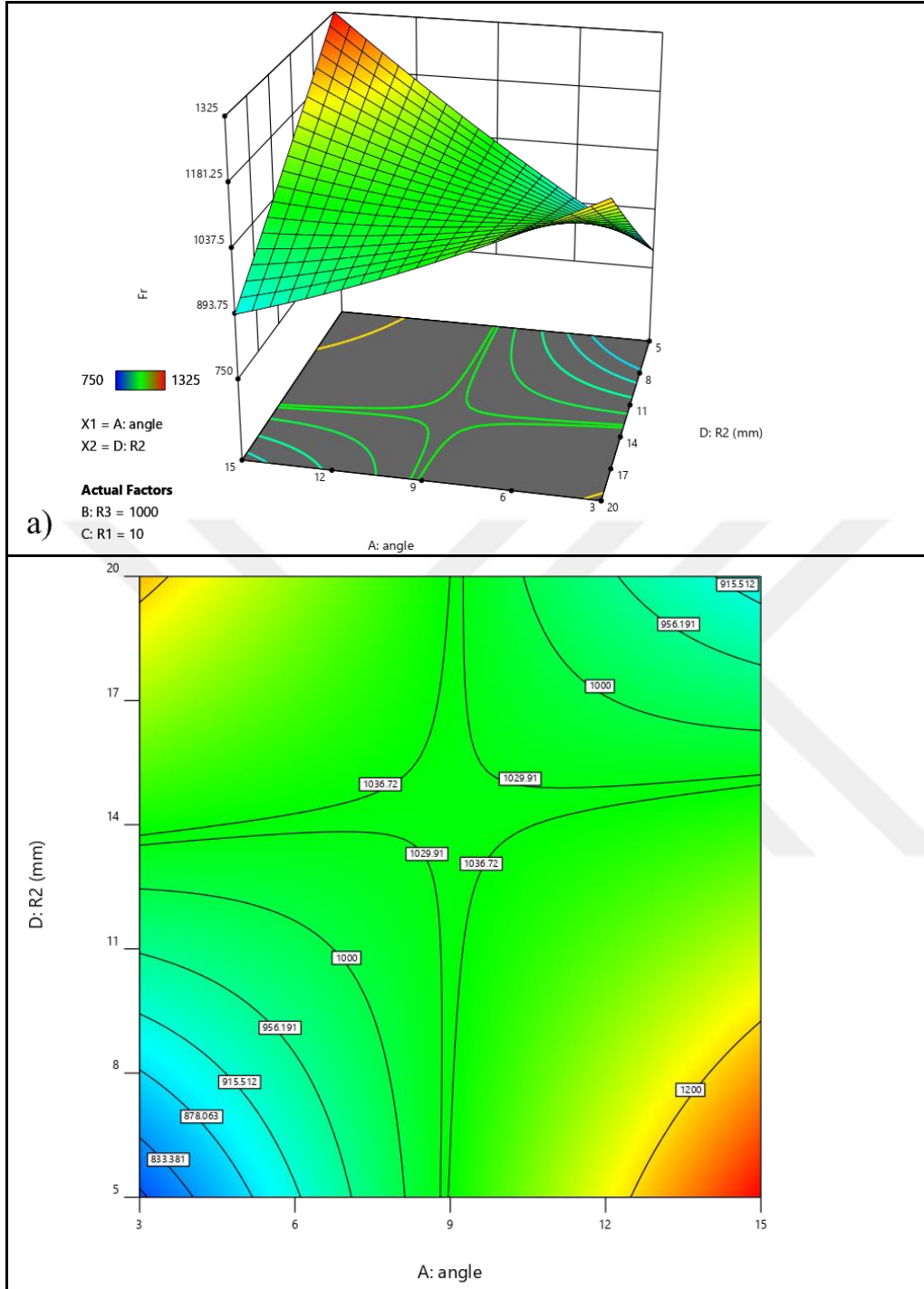
Resim 4.33 a ve b’de  $r_1 = 10$  mm ve  $r_2 = 10$  mm sabit değerleri için  $F_r$ ’nin  $\alpha$  ve  $r_3$  ile değişiminin sırası ile 3B yüzey ve kontur grafikleri sunulmuştur. Grafikte  $F_r$  ikinci dereceden 3B parabolik bir yüzey üzerinde değişmektedir.  $F_r$ ,  $3^\circ$  ile  $15^\circ$  arasında  $\alpha$ ’nın artmasıyla artmaktadır. Fakat  $r_3$ ’ün 500 mm ile 2000 mm arasında olduğu bölgede  $F_r$  parabolik olarak değişmektedir ve parabolün dip bölgesi  $r_3$ ’ün 1700 mm civarı olduğu bölgededir. Özellikle Resim 4.33 b incelendiğinde  $F_r$  en düşük olduğu bölgenin  $\alpha$ ’nın  $3^\circ$   $r_3$ ’ün 1700 civarı olduğu görülmektedir.

Resim 4.34 a ve b’de  $r_1 = 10$  mm ve  $r_3 = 1000$  mm sabit değerleri için  $F_r$ ’nin  $\alpha$  ve  $r_2$  ile değişiminin 3B yüzey ve kontur grafikleri sunulmuştur.  $F_r$  grafik ilgilenilen bölgede karmaşık yapıları bir yüzey oluşturmuştur. Resim 4.34 b’deki kontur grafiği incelendiğinde  $F_r$ ’nin en düşük değerlerinin  $\alpha$ ’nın  $3^\circ$ ,  $R_2$ ’nin 5 mm kesişimine yakın bölgede olduğu görülmektedir.

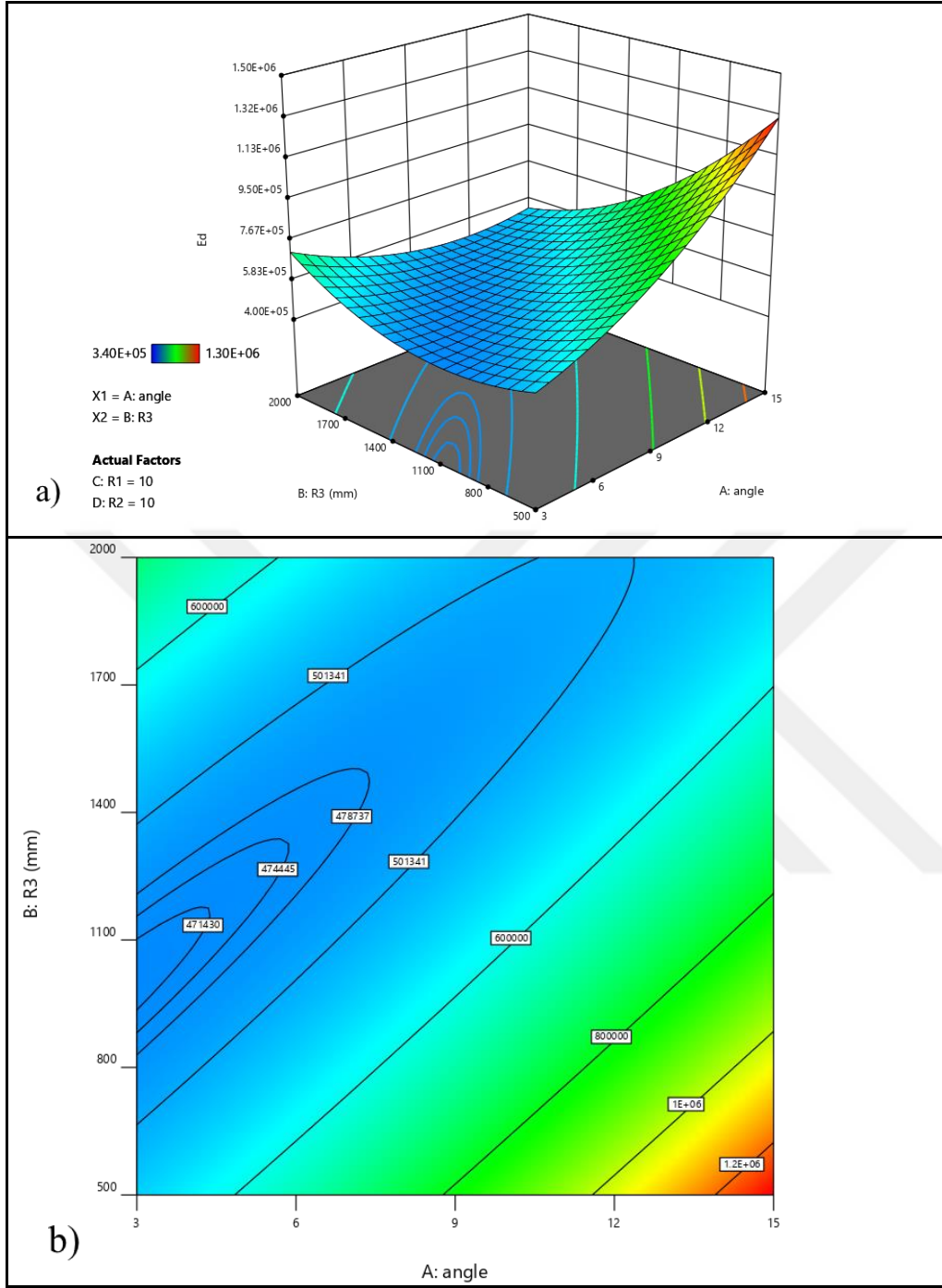
$E_d$ ’nin  $\alpha$  ve  $r_3$  ile değişimi,  $r_1 = 10$  mm ve  $r_2 = 10$  mm’de sabit tutularak Resim 4.35 a’da 3B yüzey ve Resim 4.35 b’de kontur grafiği olarak görselleştirilmiştir. Grafikte  $E_d$ ’nin ikinci dereceden 3B parabolik bir yüzey oluşturduğu görülmektedir.  $E_d$ ,  $3^\circ$  ile  $15^\circ$  arasında  $\alpha$ ’nın artmasıyla artmaktadır. Diğer yandan  $r_3$ ’ün 500 mm ile 2000 mm arasında olduğu bölgede  $E_d$  de parabolik olarak değişmektedir ve parabolün dip bölgesi  $r_3$ ’ün 1050 mm civarı olduğu bölgededir. Özellikle Resim 4.35 b incelendiğinde  $E_r$ ’nin en düşük olduğu bölgenin  $\alpha$ ’nın  $3^\circ$   $r_3$ ’ün 1050 mm civarı olduğu görülmektedir.

Resim 4.36 a ve b’de  $r_1 = 10$  mm ve  $r_3 = 1000$  mm sabit değerleri için  $E_d$ ’nin  $\alpha$  ve  $r_2$  ile değişiminin 3B yüzey ve kontur grafikleri sunulmuştur.  $F_r$  grafik ilgilenilen bölgede karmaşık yapıları bir yüzey oluşturmuştur. Resim 4.36 b’deki kontur grafiği incelendiğinde  $E_d$ ’nin en düşük değerlerinin  $\alpha$ ’nın  $3^\circ$ ,  $R_2$ ’nin 5 mm kesişimine yakın bölgede olduğu görülmektedir.

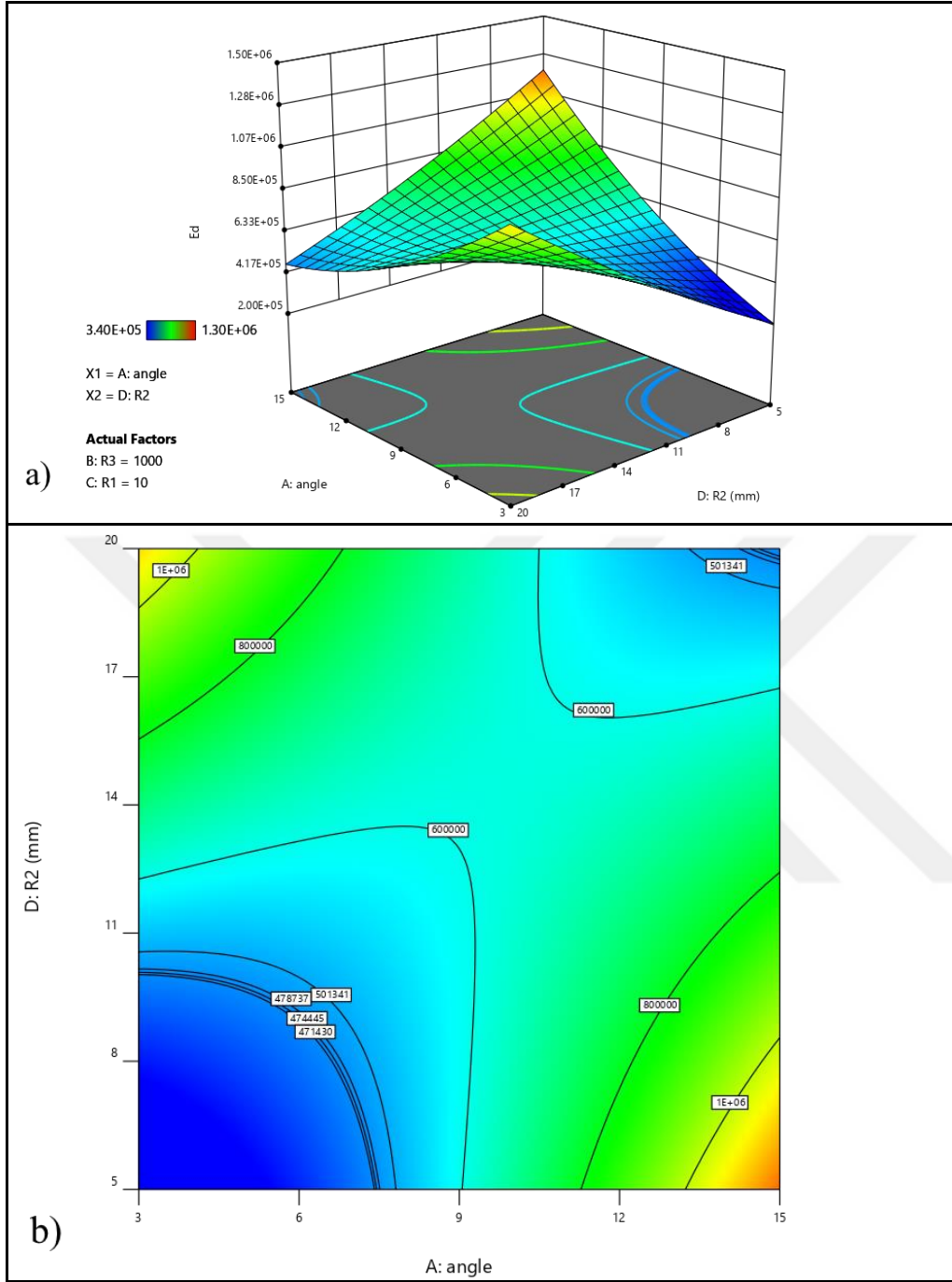
Kısım 4.3.2’de açıklandığı gibi  $M_t$  değerleri ile  $E_d$  değerleri orantılıdır ve bu iki cevap değişkeni için çizilen grafikler benzerdir. Bu nedenle  $M_t$  ile ilgili grafikler ayrıca verilmemiştir.



Resim 4.34.  $r_1 = 10$  mm ve  $r_3 = 1000$  mm sabit değerleri için  $F_r$ 'nin  $\alpha$  ve  $r_3$  ile değişiminin a) 3B yüzey ve b) kontur grafikleri



Resim 4.35.  $r_1 = 10$  mm ve  $r_2 = 10$  mm sabit değerleri için  $E_d$ 'nin  $\alpha$  ve  $r_3$  ile değişiminin a) 3B yüzey ve b) kontur grafikleri



Resim 4.36.  $r_1 = 10$  mm ve  $r_3 = 1000$  mm sabit değerleri için  $E_d$ 'nin  $\alpha$  ve  $r_3$  ile değişiminin a) 3B yüzey ve b) kontur grafikleri

### 4.3.3. İkincil geometrik parametreler için optimizasyon sonuçları

İkincil geometrik parametreler için oluşturulan cevap yüzeyleri istenirlik fonksiyonu ile birlikte kullanılarak optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon kriterleri ve hedeflerinin nasıl belirlendiği Kısım 3.8.10'da belirtilmiş ve kriterler Çizelge 3.12'te

listelenmiştir. Bu kriterlerin istenirlik fonksiyonuna uygulanması ile elde edilen optimum çözüm değerleri Çizelge 4.24'te listelenmiştir.

Çizelge 4.24. İkincil geometrik parametrelerin optimizasyonundan elde edilen değerler

| Değişken               | $\alpha$ | r <sub>1</sub><br>(mm) | r <sub>2</sub><br>(mm) | r <sub>3</sub><br>(mm) | İstenirlik<br>Değeri |
|------------------------|----------|------------------------|------------------------|------------------------|----------------------|
| Optimizasyon<br>Sonucu | 8,68     | 16,99                  | 16,53                  | 1476,01                | 1,00                 |

#### 4.3.4. İkincil geometrik parametre optimizasyonu doğrulama sonuçları

Kutu pasodaki ikincil geometrik parametrelerin optimizasyonu sonucunda elde edilen açı ve radyüs ölçüleri istenirlik temelli çözüm arama stratejisi ile tespit edilen paso sırası tasarımının beş pasosuna da uygulanmıştır. Bu şekilde oluşturulan paso tasarımlarının SEY simülasyonları gerçekleştirilerek bunların şekillendirme enerjisi, döndürme momenti ve radyal kuvvetleri bulunmuş ve elde edilen değerler Çizelge 4.25'te listelenmiştir.

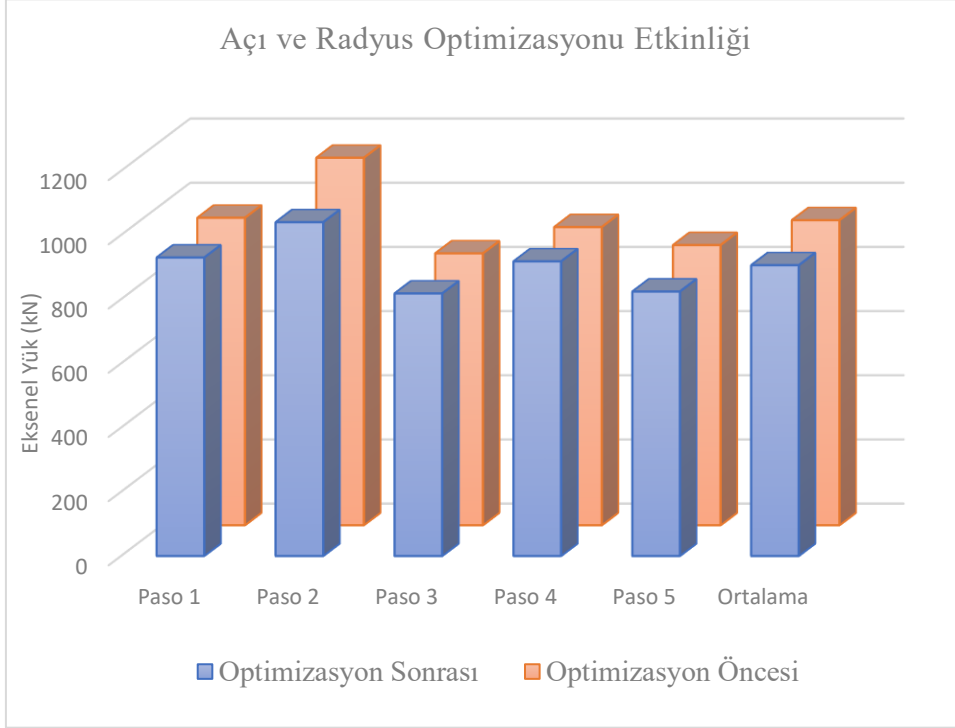
Çizelge 4.25. İkincil geometrik parametre optimizasyon doğrulamasından elde edilen E<sub>d</sub>, F<sub>r</sub> ve M<sub>t</sub> değerleri

| Paso     | e <sub>1</sub><br>(mm) | e <sub>2</sub><br>(mm) | h <sub>1</sub><br>(mm) | h <sub>2</sub><br>(mm) | $\alpha$ | r <sub>1</sub><br>(mm) | r <sub>2</sub><br>(mm) | r <sub>3</sub><br>(mm) | M <sub>t</sub><br>(Nm) | F <sub>r</sub><br>(kN) | E <sub>d</sub><br>(J) |
|----------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|----------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| P1       | 150,00                 | 159,75                 | 150,00                 | 126,12                 | 8,683    | 16,99                  | 16,53                  | 1476,01                | 103694                 | 930                    | 4,90E+05              |
| P2       | 159,75                 | 165,28                 | 126,12                 | 105,94                 | 8,683    | 16,99                  | 16,53                  | 1476,01                | 92945                  | 1040                   | 4,83E+05              |
| P3       | 105,94                 | 117,91                 | 165,28                 | 122,17                 | 8,683    | 16,99                  | 16,53                  | 1476,01                | 97617                  | 818                    | 6,04E+05              |
| P4       | 117,91                 | 128,51                 | 122,17                 | 85,47                  | 8,683    | 16,99                  | 16,53                  | 1476,01                | 103096                 | 918                    | 5,38E+05              |
| P5       | 85,47                  | 97,68                  | 128,51                 | 75,90                  | 8,683    | 16,99                  | 16,53                  | 1476,01                | 113830                 | 824                    | 1,26E+06              |
| Ortalama |                        |                        |                        |                        |          |                        |                        |                        | 102236                 | 906                    | 3,37E+06              |
| Maksimum |                        |                        |                        |                        |          |                        |                        |                        | 113830                 | 1040                   | 1,26E+06              |

İstenirlik temelli çözüm arama stratejisi ile oluşturulan paso sırası tasarımının ikincil parametre optimizasyonu uygulanmış ve uygulanmamış halinin F<sub>r</sub> değerleri Şekil 4.6'da grafik olarak sunulmuştur. Grafikte bütün pasolarda ikincil geometrik parametrelerin radyal kuvvetlerin azalmasını sağladığı görülmüştür. Optimizasyon öncesi ve sonrası radyal



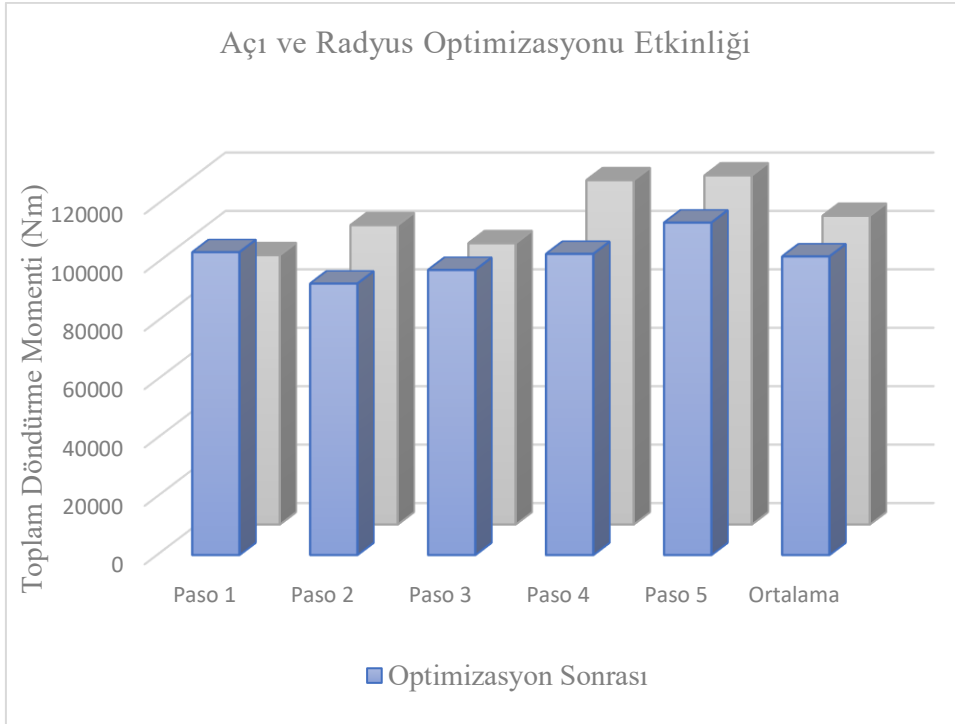
kuvvetlerin ortalamaları karşılaştırıldığında optimizasyonun gözle görülür bir düşüş sağladığı görülmektedir.



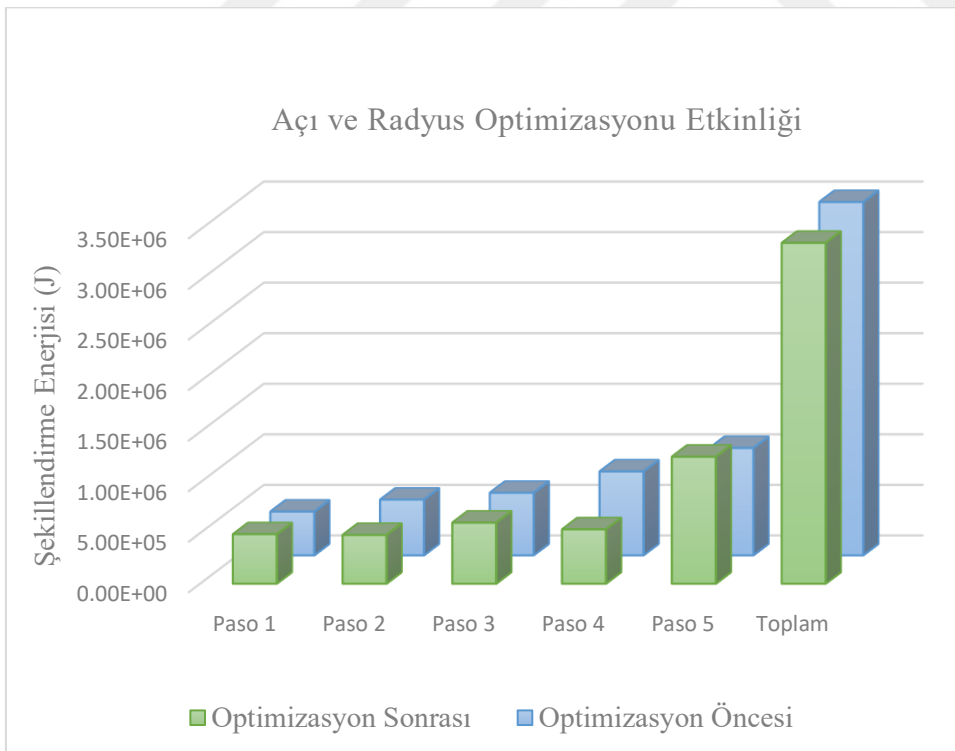
Şekil 4.6. İkincil geometrik parametre optimizasyonunun radyal kuvvetlere etkisi

Radyüs ve açı optimizasyon uygulamasının döndürme momentine etkisi Şekil 4.7’de görülmektedir. Grafik incelendiğinde yeni parametrelerin 1. Pasoda  $M_t$ ’ yi arttırdığı görülmektedir. Diğer pasolarda ise  $M_t$  değeri değişik seviyelerde azalmıştır. Pasoların ortalamaları karşılaştırıldığında ise döndürme momenti seviyesinin bir miktar düştüğü görülmektedir.

Şekil 4.8’de radyüs ve açı optimizasyonunun şekillendirme enerjilerine etkisi görülmektedir. Grafikte ilk dört pasoda optimizasyonun şekillendirme enerjisi değerlerini düşürdüğü fakat beşinci pasoda olumsuz şekilde etkilediği görülmektedir. Her iki tasarım için toplam şekillendirme enerjileri karşılaştırıldığında optimizasyonun belirgin şekilde enerji değerini düşürdüğü görülmektedir.



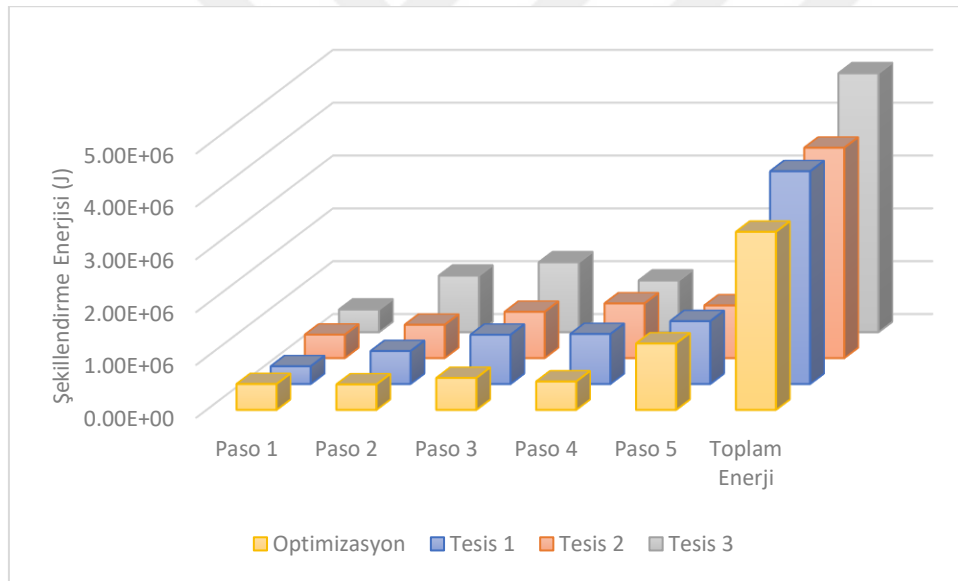
Şekil 4.7. İkincil geometrik parametre optimizasyonunun döndürme momentine etkisi



Şekil 4.8. İkincil geometrik parametre optimizasyonunun şekillendirme enerjisine etkisi

Kısım 4.2’de durum çalışmasının birinci aşaması sonucunda elde edilen paso tasarımının sonuçları ile referans alınan tasarımların değerleri karşılaştırılmıştı. Bu kısımda da durum çalışmasının iki aşamasının sonucu olarak elde edilen paso tasarım değerleri referans tasarımlar ile karşılaştırmak için oluşturulan grafikler incelenecektir.

Referans alınan endüstriyel tasarımlar ve ikinci aşama optimizasyon uygulanmış pasoların şekillendirme enerjisi değerleri Şekil 4.9’da karşılaştırılmıştır. Grafikte birinci ve beşinci pasolarda optimizasyon sonucu tasarlanan pasonun şekillendirme enerjilerinin referans tasarımlardan hafifçe yüksek olduğu görülmektedir. Diğer pasolarda ise optimizasyon sonucu tasarlanan pasonun şekillendirme enerjisi değerleri en düşük seviyededir. Toplam şekillendirme enerjileri göz önüne alındığında optimizasyon sonucunda elde edilen değer referans pasoların üçünden de bariz şekilde düşük olduğu görülmektedir.

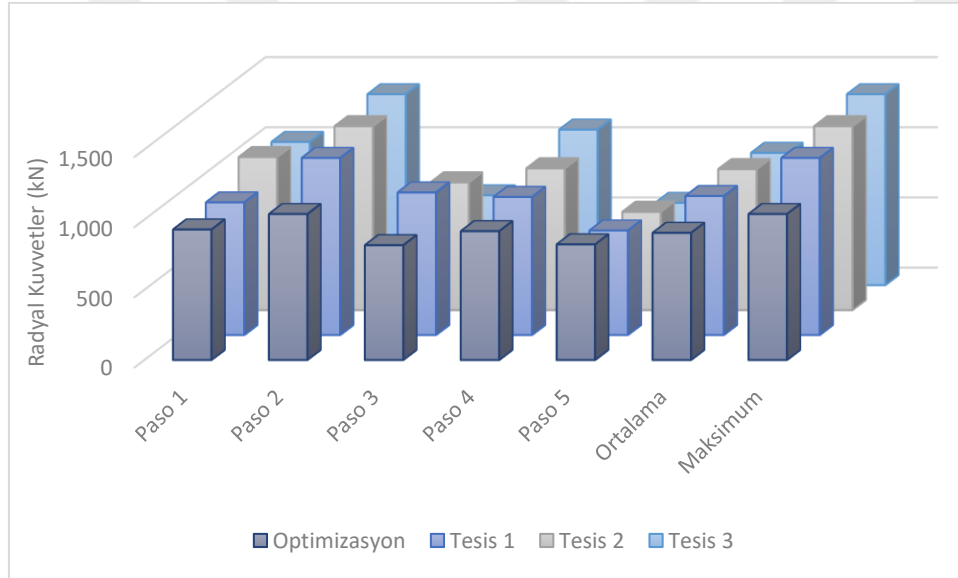


Şekil 4.9. Endüstriyel referans ve ikinci aşama optimizasyon çalışmaları sonucunda elde edilen paso tasarımlarının şekillendirme enerjisi karşılaştırması

İkinci aşama sonucunda elde edilen ve referans endüstriyel pasolara ait radyal kuvvet değerleri Şekil 4.10’da karşılaştırılmıştır. Optimum pasonun radyal kuvvet değerlerinin üçüncü pasoda tesis 3’ten beşinci pasoda referans tesislerin üçünden de yüksek olduğu görülmektedir. Diğer üç pasoda optimize edilmiş paso tasarımının radyal kuvvetleri en düşük seviyededir. Asıl önemli olan ortalama ve maksimum radyal kuvvet değerleri incelendiğinde ikinci aşama optimizasyon sonuçlarının diğer üç pasodan da belirgin şekilde düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca optimize edilmiş pasoların radyal kuvvet değerlerinin

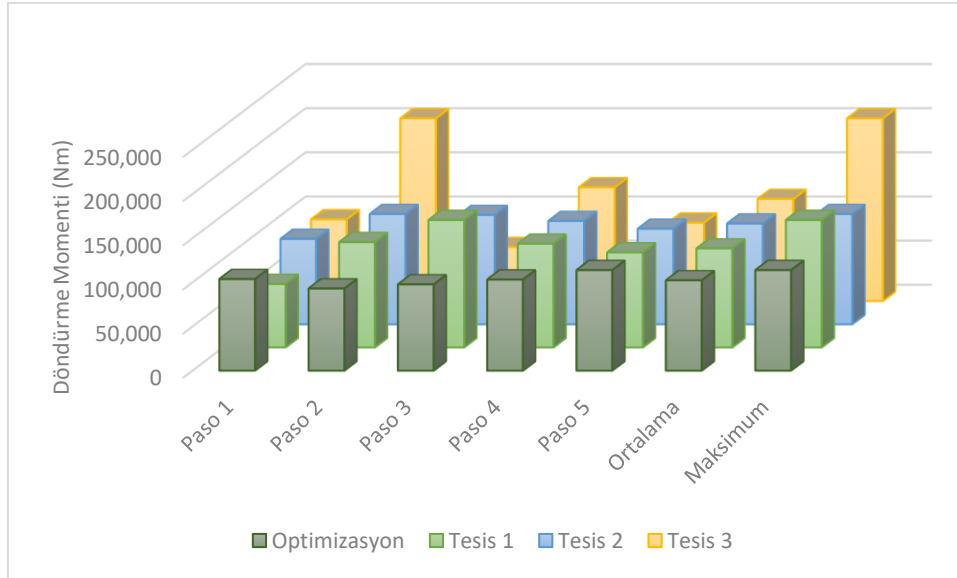
endüstriyel pasolarla kıyaslandığında çok daha düzgün dağılıma sahip olduğu görülmektedir.

Şekil 4.11’de referans alınan endüstriyel tasarımlar ile ikinci aşama optimizasyon sunucunda elde edilen döndürme momentlerinin karşılaştırması yapılmıştır. Grafik incelendiğinde ikinci ve dördüncü pasoda optimize edilmiş tasarımın en düşük döndürme momentine sahip olduğu görülmektedir. Ortalama ve maksimum radyal kuvvet değerleri karşılaştırıldığında optimize edilmiş tasarıma ait değerlerin belirgin derecede düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca ikinci aşama optimizasyon sonrasında elde edilen pasolara ait döndürme momenti değerleri oldukça düzgün bir dağılıma sahiptir.



Şekil 4.10. Endüstriyel referans ve ikinci aşama optimizasyon çalışmaları sonucunda elde edilen paso tasarımlarının radyal kuvvelerinin karşılaştırması

Şekillendirme enerjisi, radyal kuvvet ve döndürme momentlerinin birinci ve ikinci optimizasyon aşamaları sonrasında referans tasarımlarla karşılaştırma için çizilen Şekil 4.3 – Şekil 4.10 arasında sunulan grafikler incelendiğinde radyüs ve açı optimizasyonu sonrasında bu cevap değişkenlerinin ortalama ve en yüksek değerlerinde bir miktar daha azalma sağlandığı görülmektedir. Buna ek olarak ikinci aşama sonrası bu değişkenleri pasolar arası dalgalanmalarının da biraz daha azaldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.11. Endüstriyel referans ve ikinci aşama optimizasyon çalışmaları sonucunda elde edilen paso tasarımlarının döndürme momentleri karşılaştırması

Referans alınan endüstriyel paso tasarımlarının deformasyon enerjisi, radyal kuvvet ve döndürme momenti değerleri Çizelge 4.12’de, ikincil geometrik parametrelerin optimizasyonu sonucunda oluşturulan paso tasarımının değerleri ise Çizelge 4.25’te sunulmuştur. Bu bölümde bu iki çizelge kullanılarak birinci aşama optimizasyon sonuçlarına göre tasarlanmış ve üzerine ikinci aşama optimizasyon da uygulanmış paso tasarımı ile referans alınan endüstriyel tasarımların sonuçlarının karşılaştırması yapılmıştır.

Endüstriyel referans tasarımlar ile durum çalışmasının ikinci aşaması sonuçlarının karşılaştırılması Çizelge 4.26’da sunulmuştur. Yapılan hesaplamalara göre ikinci aşama optimizasyon sonucunda endüstriyel tesislerin ortalamasına göre % 21,65, tesisler içinde en düşük enerji kullanana göre %15,33 şekillendirme enerjisi tasarrufu sağlanmıştır. Her bir paso serisinin en yüksek döndürme momenti değeri diğer paso serilerinininki ile karşılaştırıldığında ikinci aşama optimizasyonun maksimum döndürme momentinin endüstriyel tasarımların ortalamasına göre % 28,26, en düşük olanına göre % 8,76 daha az olduğu görülmektedir. Aynı şekilde her paso serisinin en yüksek radyal kuvvet değerleri karşılaştırılırsa optimum tasarımın radyal kuvvet değerinin tesislerin ortalamasına göre %20,65, en düşük olana göre % 17,59 daha az olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.26. Referans endüstriyel paso tasarımları ile ikinci aşamada elde edilen optimum paso tasarımı aralarındaki karşılaştırma sonuçları

| <b>Karşılaştırma Kriteri</b> | <b>Toplam Şekillendirme Enerjisi (%)</b> | <b>Maksimum Döndürme Momenti (%)</b> | <b>Ortalama Döndürme Momenti (%)</b> | <b>Maksimum Radyal Kuvvet (%)</b> | <b>Ortalama Radyal Kuvvet (%)</b> |
|------------------------------|--|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| <b>Tesis 1</b>               | 16,26                                    | 21,13                                | 8,80                                 | 17,59                             | 8,52                              |
| <b>Tesis 2</b>               | 15,33                                    | 8,76                                 | 10,34                                | 20,61                             | 9,76                              |
| <b>Tesis 3</b>               | 31,22                                    | 44,98                                | 11,59                                | 23,53                             | 3,90                              |
| <b>Tesislerin Ortalaması</b> | 21,65                                    | 28,26                                | 10,26                                | 20,65                             | 7,46                              |
| <b>Tesislerin minimumu</b>   | 15,33                                    | 8,76                                 | 8,80                                 | 17,59                             | 3,90                              |

Şekillendirme enerjisi değerlerini daha objektif bir yaklaşımla karşılaştırabilmek için ikinci aşama optimizasyon sonucunda da elde edilen yüzde kesit daralması başına kullanılan şekillendirme enerjisi değeri hesaplanmış ve bunun referans endüstriyel tasarımların değerleriyle karşılaştırması Çizelge 4.27’de sunulmuştur.

Çizelge 4.27. Referans pasolar ve ikinci aşama optimizasyon sonucunda elde edilen yüzde kesit daralması başına şekillendirme enerjisi karşılaştırmaları

|                              | <b>Yüzde kesit daralması başına şekillendirme enerjisi (J)</b> | <b>Optimizasyon ile fark (%)</b> |
|------------------------------|--|----------------------------------|
| <b>Tesis 1</b>               | 53445,01   | 8,60                             |
| <b>Tesis 2</b>               | 61129,79   | 20,09                            |
| <b>Tesis 3</b>               | 64795,53   | 24,61                            |
| <b>Tesislerin ortalaması</b> | 59790,11   | 18,30                            |
| <b>Optimizasyon</b>          | 48850,05   | 0,00                             |

Durum çalışmasının ikinci aşaması sonucunda elde edilen yüzde kesit daralması başına harcanan şekillendirme enerjisinde sağlanan tasarruf miktarının referans alınan endüstriyel tesislerin ortalamasına göre % 18,30’a, tesislerden en düşük enerji harcayana göre % 8,60’a çıktığı görülmektedir.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında hadde pasosu tasarımının ardışık yapısı ile ilgili sorunları aşmak için bir çözüm arama stratejisi geliştirilmiştir. Geliştirilen strateji temel olarak istenirlik fonksiyonlarını kullanmakta ve paso tasarımının ardışık yapısını geometrik ve teknolojik kısıtlamalar ile birlikte göz önünde bulundurmaktadır. Buna ek olarak geliştirilen stratejisinin kutu paso tasarımlarına etkin olarak uygulanabilmesi için bir optimizasyon metodu önerilmiştir.

Geliştirilen istenirlik temelli çözüm arama stratejisi prosesin başlangıç koşullarını, prosesin ardışık yapısından ve teknolojik gerekliliklerden dolayı ortaya çıkan kısıtlamaları gözeterek optimizasyon hedeflerini sağlayan çözümleri aramaktadır. Çözüm arama stratejisi, önce birinci pasodan başlayarak ileriye doğru çözüm aramaktadır. Herhangi bir aşamada belirlenen kriterlere uygun çözüm bulunamaması durumunda son pasoya atlanarak çözüm arama prosesine geriye doğru devam edilmektedir.

Önerilen paso optimizasyon metodu istenirlik temelli çözüm arama stratejisini de kullanarak paso tasarımı optimizasyonunu gerçekleştirmek için gerekli olan işlemleri kapsamakta ve bu işlemlerin nasıl yürütüleceğini belirlemektedir. Paso optimizasyon metodu altı aşamadan oluşmaktadır. Metodun ilk beş aşaması istenirlik temelli çözüm arama stratejisinin uygulanması olan son aşamada kullanılacak olan regresyon modellerinin oluşturulmasını ve bunun için gerekli işlemleri içermektedir.

Geliştirilen çözüm arama stratejisi ve optimizasyon metodunun uygulamasını göstermek ve etkinliğini sınamak için bir durum çalışması yapılmıştır. Durum çalışmasında 5 pasodan oluşan bir kaba haddeleme prosesinin kullandığı toplam şekillendirme enerjisini optimize etmek birincil amaç olarak belirlenmiştir. Buna ek olarak merdanelere etki eden radyal kuvvetlerin ve döndürme momentlerinin azaltılması ikincil amaçlar olarak tespit edilmiştir.

Durum çalışması kapsamında yapılan optimizasyon işlemleri tasarım prosesinin karmaşıklığını azaltmak amacı ile iki aşama olarak gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada birincil geometrik parametreler olarak belirlenen  $e_1$ ,  $e_2$ ,  $h_1$  ve  $h_2$  (Bkz. Şekil 3.3) ölçüleri geliştirilen istenirlik temelli ardışık çözüm arama stratejisi ve önerilen optimizasyon metodu kullanılarak optimize edilmiştir. İkinci aşamada ise cevap yüzeyleri ve istenirlik fonksiyonu

kullanılarak ikincil geometrik parametreler olarak belirlenen Şekil 3.3'teki kutu paso tasarımında gösterilen  $\alpha$  açısı,  $r_1$ ,  $r_2$  ve  $r_3$  ölçüleri optimize edilmiştir.

Durum çalışmasında bağımsız değişkenlerin farklı kombinasyonlarına karşılık gelen bağımlı değişken değerlerini tespit etmek için birinci aşamada 144 deney seti, ikinci aşamada ise 21 deney seti oluşturulmuştur. Daha sonra sonlu elemanlar yöntemi temelli ticari bir yazılım ile simülasyonlar gerçekleştirilerek bu deney setlerine karşılık gelen bağımlı değişken değerleri bulunmuştur. Elde edilen bu verilerin varyans analizleri gerçekleştirilerek bağımlı değişkenler olan şekillendirme enerjisi, döndürme momenti ve radyal kuvvetler için regresyon modelleri oluşturulmuştur. Durum çalışmasının birinci aşamasında istenirlik temelli çözüm arama stratejisi, ikinci aşamada ise istenirlik fonksiyonu kullanılarak optimum paso tasarımı tespit edilmiştir.

### 5.1. Birinci Aşama Optimizasyon Sonuçları

Bu bölümde birinci aşamada gerçekleştirilen optimizasyonun etkinliğini belirlemek için optimizasyon sonucu tasarlanan paso tasarımı sonuçları ile referans endüstriyel paso tasarımlarının SEY simülasyonlarından elde edilen sonuçların karşılaştırması yapılmıştır.

Birinci aşama optimizasyon sonucunda elde edilen paso tasarımı, toplam şekillendirilme enerjisinde endüstriyel referans paso tasarımlarının ortalamasına göre %18,78 tasarruf sağlamıştır. Endüstriyel referans paso tasarımlarından en düşük toplam enerji kullanımı olan ile optimize edilmiş paso tasarımının toplam enerji kullanımı karşılaştırıldığında optimum tasarımın % 12,23 daha az enerji kullandığı görülmüştür.

Her bir paso serisinin en yüksek döndürme momenti değerine sahip pasoları dikkate alındığında birinci aşama optimizasyonu yapılmış paso tasarımı ile endüstriyel referans tesislerin en yüksek döndürme momenti ortalaması karşılaştırıldığında optimizasyon ile % 24,68 oranında azalma gerçekleştiği tespit edilmiştir. Yine optimum paso tasarımı ile maksimum döndürme momenti en az olan endüstriyel tasarım karşılaştırıldığında optimizasyon ile % 4,22 düşüş sağlandığı görülmektedir.

Paso tasarımlarının en yüksek radyal kuvvet değerine sahip pasoları karşılaştırıldığında birinci aşama optimizasyon ile referans endüstriyel tasarımların ortalamasına göre % 12,64



iyileşme sağlandığı görülmektedir. Yine optimize edilmiş paso tasarımı ile endüstriyel tasarımlardan en düşük radyal maksimum kuvvet değerine sahip olan karşılaştırıldığında optimum paso tasarımının % 9.27 daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Referans alınan endüstriyel paso tasarımların ve optimizasyon sonucu elde edilen paso tasarımlarının son ürün ölçüleri birbirlerinden farklıdır. Bundan dolayı pasoların kullandığı toplam şekillendirme enerjilerini doğrudan karşılaştırmak tam olarak objektif bir değerlendirme olmayabilir. Daha objektif bir değerlendirme yapabilmek için her bir prosesin kullandığı toplam şekillendirme enerjisini o proses ile elde edilen yüzde kesit daralmasına oranlama yoluna gidilmiştir.

Birinci aşama optimizasyon ile elde edilen paso tasarımı ile endüstriyel referans pasoların yüzde kesit daralması başına kullanılan şekillendirme enerjileri karşılaştırıldığında endüstriyel tasarımların ortalamasına göre % 16,42, en az enerji kullanan paso tasarımına göre % 6,49 enerji tasarrufu sağlandığı görülmüştür.

## **5.2. İkinci Aşama Optimizasyon Sonuçları**

Bu kasımda birinci aşama optimizasyon ile elde edilmiş paso tasarımına ikinci aşama optimizasyonun da uygulanmasıyla elde edilen paso tasarımı ile referans paso tasarımlarının karşılaştırılması yapılmıştır.

İki aşama optimizasyon sonucunda referans endüstriyel paso tasarımlarının ortalamasına göre %21,65 şekillendirme enerjisi tasarrufu sağlanmıştır. Yine iki aşama optimizasyon sonucunda toplam şekillendirme enerjisinde, en az enerji kullanan referans endüstriyel tasarıma göre % 15,33 azalma sağlanmıştır.

İkinci aşama optimizasyon sonucunda tasarlanan paso ve endüstriyel referans pasoların en yüksek döndürme momentine sahip pasoları karşılaştırıldığında, optimum pasoların en yüksek döndürme momentinin referans pasoların maksimumlarının ortalamasından % 28,26 daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Yine ikinci aşama optimizasyon sonucu ile referans pasoların maksimum döndürme momentlerinin en küçük olanı karşılaştırıldığında optimizasyon sonucunun % 8.26 daha düşük olduğu görülmüştür.

İkinci aşama optimizasyon sonucuna göre tasarlanmış ve referans paso tasarımlarının en yüksek radyal kuvvet değerleri karşılaştırıldığında, optimum paso tasarımının referans pasoların en yüksek radyal kuvvet değerlerinin ortalamasına göre % 20.65 daha düşük değere sahip olduğu görülmektedir. Yine optimum pasonun en yüksek radyal kuvvet değeri ile referans pasoların maksimum değerlerinin en düşüğü karşılaştırıldığında optimizasyon ile % 3,90 oranında iyileşme sağlandığı görülmüştür.

Birinci aşama optimizasyon sonunda olduğu gibi ikinci aşama optimizasyon sonucunda elde edilen paso tasarımının da yüzde kesit daralması başına düşen şekillendirme enerjisi yönünden referans tasarımlarla karşılaştırılması yapılmıştır. Yapılan karşılaştırmalarda ikinci aşama optimizasyon sonucunda elde edilen paso tasarımının, referans tasarımlarının ortalamasına göre % 18,30, en az şekillendirme enerjisi kullanan tesise göre % 8,60 şekillendirme enerjisi sağladığı tespit edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde geliştirilen çözüm arama stratejisi ve önerilen optimizasyon metodunun durum çalışmasında oldukça başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir. Endüstriyel tesislerde yapılan incelemelerde kaba haddeleme tezgahında kullanılan elektrik motorunun çektiği gücün 1,37 MW seviyelerine çıktığı tespit edilmiştir (Bkz. Çizelge 4.1). Bu durum da dikkate alınırca geliştirilen çözüm arama stratejisi ve çözüm metodunun endüstride kullanımının ürün maliyetlerinde ciddi seviyelerde azalma sağlayabileceği düşünülmektedir. Merdanelere gelen radyal kuvvetlerin ve döndürme momentlerinin gerek büyüklük gerekse durağanlık açısından iyileştirilmesi, bakım ve işletme maliyetlerinde ek olarak iyileşme sağlayacaktır.

### 5.3. Öneriler

Bu tez kapsamında yapılan araştırmalar ve gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda ileride yapılacak çalışmalar için aşağıdaki hususlar önerilebilir:

- Bu tez çalışması kapsamındaki durum çalışması sırasında gerçekleştirilen paso tasarımı yöntemi kutu paso kullanılan herhangi bir endüstriyel kaba haddeleme prosesine de doğrudan uygulanabilir.

- Önerilen paso optimizasyon yöntemi kaba haddeleme prosesi ve kutu paso tasarımları ile sınırlı değildir ve küçük revizyonlarla değişik türdeki pasoların optimizasyonu için kullanılabilir.
- Geliştirilen istenirlik tabanlı çözüm arama stratejisi geneldir ve küçük revizyonlar yapılarak ardışık yapıdaki farklı problemlerin çözümü için kullanılabilir.
- Bu çalışmada her cevap değişkeni için bir cevap yüzeyi oluşturulmuştur. İleride yapılacak çalışmalarda daha fazla iyileşme sağlayabilmek için pasoların değişik en ve yükseklik oranları için farklı cevap yüzeyleri oluşturularak elde edilen regresyon modellerinin gerçeğe uygunluğu arttırılabilir. Bu sayede yapılacak olan optimizasyonun etkinliği de arttırılabilir
- Paso sırası optimizasyonunda cevap yüzey yöntemi ile elde edilen matematik modeller makine öğrenmesi algoritmalarıyla birlikte kullanılarak istatistik yöntemlerle ele alınması güç olan çok sayıda faktör aynı anda optimize edilebilir.

## KAYNAKLAR

- Abhary, Kazem, Zlatko Kovacic, Sven Erik Lundberg, Ramadas Narayanan, and Sead Spuzic. 2015. "The Application of a Hybrid Algorithm to Roll Pass Design." *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 79(5–8):1063–70.
- Aksenov, S. A., E. N. Chumachenko, I. V. Logashina, and T. Kubina. 2015. "Numerical Simulation IN ROLL PASS DESIGN FOR BAR ROLLING." *Metalurgija* 54(1):75–78.
- Akteke-Öztürk, Başak, Gerhard-Wilhelm Weber, and Gülser Köksal. 2020. "Generalized Desirability Functions: A Structural and Topological Analysis of Desirability Functions." *Optimization* 69(1):115–30.
- Al-Jamimi, Hamdi A., Galal M. BinMakhashen, Kalyanmoy Deb, and Tawfik A. Saleh. 2021. "Multiobjective Optimization and Analysis of Petroleum Refinery Catalytic Processes: A Review." *Fuel* 288:119678.
- Altan, Taylan, and Markus Knoerr. 1992. "Application of the 2D Finite Element Method to Simulation of Cold-Forging Processes." *Journal of Materials Processing Technology* 35(3):275–302.
- Amirov, Nurlan, and Amir Reza Vakhshouri. 2020. "Numerical Modeling and Optimization of Product Selectivity and Catalyst Activity in Fischer-Tropsch Synthesis via Response Surface Methodology: Cobalt Carbide Particle Size and H<sub>2</sub>/CO Ratio Effects." *International Journal of Hydrogen Energy* 45(56):31913–25.
- Anfar, Zakaria, Hassan Ait Ahsaine, Mohamed Zbair, Abdallah Amedlous, Abdellah Ait El Fakir, Amane Jada, and Nouredine El Alem. 2020. "Recent Trends on Numerical Investigations of Response Surface Methodology for Pollutants Adsorption onto Activated Carbon Materials: A Review." *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 50(10):1043–84.
- Argyris, J. H. 1954. "Energy Theorems and Structural Analysis: A Generalized Discourse with Applications on Energy Principles of Structural Analysis Including the Effects of Temperature and Non-Linear Stress-Strain Relations." *Aircraft Engineering and Aerospace Technology* 26(10):347–56.
- Bagheripoor, Mahdi, and Hosein Bisadi. 2013. "Application of Artificial Neural Networks for the Prediction of Roll Force and Roll Torque in Hot Strip Rolling Process." *Applied Mathematical Modelling* 37(7):4593–4607.
- Baker, A. J. 2012. *Finite Elements: Computational Engineering Sciences*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Bartnicki, Jarosław, Yingxiang Xia, and Xuedao Shu. 2021. "The Chosen Aspects of Skew Rolling of Hollow Stepped Shafts." *Materials* 14(4).
- BAŞ, Cem. 2010. "CEVAP YÜZEYİ TASARIMLARI VE SİNİR AĞLARI YAKLAŞIMI." ANKARA ÜNİVERSİTESİ.

- Başar, Gökhan, Funda Kahraman, and Ganime Tuğba Önder. 2019. “Mathematical Modeling and Optimization of Milling Parameters in AA 5083 Aluminum Alloy.” *European Mechanical Science* 3:159–63.
- Bauer, Alexander, Yupiter H. P. Manurung, Joeran Sprungk, Marcel Graf, Birgit Awiszus, and Keval Prajadhiana. 2019. “Investigation on Forming–Welding Process Chain for DC04 Tube Manufacturing Using Experiment and FEM Simulation.” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 102(5–8):2399–2408.
- Box, G. E. P., and K. B. Wilson. 1951. “On the Experimental Attainment of Optimum Conditions.” *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)* 13(1):1–45.
- Box, George E. P., and Norman R. Draper. 2007. *Response Surfaces, Mixtures, and Ridge Analyses: Second Edition*.
- Brinza, V. V., and I. S. Kuznetsov. 2014. “Modeling the Laws That Determine the Quality of Rolled Rounds During the Rolling Operation.” *Metallurgist* 58(5–6):510–15.
- Cao, Q., L. Hua, and D. S. Qian. 2015. “Finite Element Analysis of Deformation Characteristics in Cold Helical Rolling of Bearing Steel-Balls.” *Journal of Central South University* 22(4):1175–83.
- Çapan, Levon. 2010. *Metallere Plastik Şekil Verme*. 5th ed. İstanbul: Çağlayan Kitabevi.
- Çavdar, Faruk, and Erdoğan Kanca. 2020. “Utilization of Response Surfaces in Optimization of Roll Pass Design in Hot Rolling.” *Emerging Materials Research* 9(4):1–12.
- Çavdar, Faruk, Erdoğan Kanca, Mustafa Yaşar, Ali Günen, İsmail Kalleci, and Mehmet Demir. 2015. “KABA HADDELEME PROSESİNİN SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ.” Pp. 748–53 in 2. *Uluslar Arası Demir Çelik Sempozyumu*. Karabük-Turkey.
- Çetinkaya, Sefa. 2020. “YAPAY SİNİR AĞLARI İLE ÇUBUK KANGAL HADDE PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ.” Karabük Üniversitesi.
- Chabbi, Amel, Mohamed Athmane Yallese, Ikhlas Meddour, Mourad Nouioua, Tarek Mabrouki, and François Girardin. 2017. “Predictive Modeling and Multi-Response Optimization of Technological Parameters in Turning of Polyoxymethylene Polymer (POM C) Using RSM and Desirability Function.” *Measurement* 95:99–115.
- Chadha, Kanwal, Davood Shahriari, and Mohammad Jahazi. 2018. “An Approach to Develop Hansel–Spittel Constitutive Equation during Ingot Breakdown Operation of Low Alloy Steels.” Pp. 239–46 in *Frontiers in Materials Processing, Applications, Research and Technology*, edited by M. Muruganant, C. Ali, and B. Raj. Springer, Singapore.
- Clough, Ray W. 1960. “The Finite Element Method in Plane Stress Analysis.” 345–78.
- Das, Rabindra Nath. 2014. *Robust Response Surfaces, Regression, and Positive Data Analyses*. CRC Press.

- Derringer, George, and Ronald Suich. 1980. "Simultaneous Optimization of Several Response Variables." *Journal of Quality Technology* 12(4):214–19.
- Dinov, Ivo. 2020. "F Distribution Tables." 1. Retrieved February 4, 2021 ([http://www.socr.ucla.edu/applets.dir/f\\_table.html](http://www.socr.ucla.edu/applets.dir/f_table.html)).
- Ekpotu, Wilson, Joshua O. Ighalo, King-Akanimo Nkundu, Precious Onu, and Adewale Adeniyi. 2020. "Analysis of Factor Effects and Interactions in a Conventional Drilling Operation by Response Surface Methodology and Historical Data Design." *Petroleum and Coal* 62:1356–68.
- Favre, Leonardo Cristian, Guido Rolandelli, Ndumiso Mshicileli, Lusani Norah Vhangani, Cristina dos Santos Ferreira, Jessy van Wyk, and María del Pilar Buera. 2020. "Antioxidant and Anti-Glycation Potential of Green Pepper (*Piper Nigrum*): Optimization of  $\beta$ -Cyclodextrin-Based Extraction by Response Surface Methodology." *Food Chemistry* 316:126280.
- Fish, Jacob, and Ted Belytschko. 2007. *A First Course in Finite Elements*. West Sussex: JohnWiley&Sons, Ltd.
- Ganguly, S., X. Wang, K. Chandrashekhara, M. F. Buchely, S. Lekakh, R. J. O'Malley, A. Kumar, and V. Thapliyal. 2021. "Modeling and Simulation of Mass Flow during Hot Rolling Low Carbon Steel I-Beam." *Journal of Manufacturing Processes* 64:285–93.
- Gontarz, Andrzej, Janusz Tomczak, Zbigniew Pater, and Tomasz Bulzak. 2019. "Effect of the Forming Zone Length on Helical Rolling Processes for Manufacturing Steel Balls." *Materials* 12(18).
- Gopalakannan, Subramanian, and Thiagarajan Senthilvelan. 2014. "Optimization of Machining Parameters for EDM Operations Based on Central Composite Design and Desirability Approach." *Journal of Mechanical Science and Technology* 28(3):1045–53.
- Halim, Noor A. A., Zurina Z. Abidin, Shamsul I. Siajam, Chong G. Hean, and Mohd R. Harun. 2020. "Screening of Factors Influencing the Yield of Citrus Hystrix Leaves Essential Oil Extracted via Pressurized Hot Water Extraction Based on Resolution V Fractional Factorial Design." *Journal of Food Process Engineering* 43(11):e13531.
- Harrington, Edwin C. 1965. "The Desirability Function." *Industrial Quality Control* 21(10):494–98.
- Hönsch, Florian, Josef Domitner, Christof Sommitsch, and Bruno Go. 2020. "Modeling the Failure Behavior of Self-Piercing Riveting Joints of 6xxx Aluminum Alloy." 29(August):4888–97.
- Huang, Bin, Ke Xing, Kazem Abhary, and Sead Spuzic. 2011. "Investigation of Roll Pass Optimal Design Based on IGA." *Advanced Materials Research* 211–212(February):195–99.
- Huang, Bin, Ke Xing, Kazem Abhary, and Sead Spuzic. 2012a. "Development of Energy-Saving Optimization for the Oval-Edging Oval Pass Design Using Genetic Algorithm." *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 61(5–8):423–29.

- Huang, Bin, Ke Xing, Kazem Abhary, and Sead Spuzic. 2012b. "Optimization of Oval-Round Pass Design Using Genetic Algorithm." *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 28(4):493–99.
- Huang, Bin, Ke Xing, Kan Huang, and Hong Lan. 2014. "Development of a Geometric Modelling Strategy for Roll Pass Optimal Design." *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 30(6):622–28.
- Huang, Kan, Bin Huang, Lei Fu, and Kazem Abhary. 2019. "Towards Energy Efficient Shape Rolling: Roll Pass Optimal Design and Case Studies." *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)* 32(1).
- Hutton, David V. 2004. "Fundamentals of Finite Element Analysis." 494.
- Hwang, Joong-Ki. 2020. "Thermal Behavior of a Rod during Hot Shape Rolling and Its Comparison with a Plate during Flat Rolling." *Processes* 8(3).
- Imran, Muhammad, Muhammad Junaid Afzal, Johannes Buhl, Markus Bambach, Anthony Dunlap, Alexander Schwedt, Anke Aretz, Shuhan Wang, Johannes Lohmar, and Gerhard Hirt. 2020. "Evaluation of Process-Induced Damage Based on Dynamic Recrystallization during Hot Caliber Rolling." *Production Engineering* 14(1):5–16.
- International Trade Centre, Trade Map. 2021. "List of Products Exported by Turkey: 72 Iron and Steel." Retrieved ([https://www.trademap.org/Country\\_SelProductCountry\\_TS.aspx?nvpm=1%7C792%7C%7C%7C%7C72%7C%7C%7C2%7C1%7C1%7C2%7C2%7C1%7C2%7C1%7C1%7C1](https://www.trademap.org/Country_SelProductCountry_TS.aspx?nvpm=1%7C792%7C%7C%7C%7C72%7C%7C%7C2%7C1%7C1%7C2%7C2%7C1%7C2%7C1%7C1%7C1)).
- Kadiyan, Sunil, Brijnandan S. Dehiya, R. K. Garg, Pawan Kamiya, and Meenu Saini. 2021. "A Statistical Method to Predict the Hardness and Grain Size After Channel Angular Pressing of AA-6063 with Intermediate Annealing." *Arabian Journal for Science and Engineering* 46(3):2055–70.
- Kalantari, Mohsen. 2020. "Mohsen KALANTARI." GAZİ ÜNİVERSİTESİ.
- Karl A. Seeler. 2014. *System Dynamics: An Introduction for Mechanical Engineers*. New York.
- Kayalı, E. Sabri, and Cahit Ensari. 2000. *Metallere Plastik Şekil Verme İlke ve Uygulamaları*. 3. Baskı. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Rektörlüğü.
- Kelsey, S., and J. H. Argyris. 1954. "Energy Theorems and Structural Analysis: A Generalized Discourse with Applications on Energy Principles of Structural Analysis Including the Effects of Temperature and Non-Linear Stress-Strain Relations Part II. Applications to Thermal Stress Problems And." *Aircraft Engineering and Aerospace Technology* 26(12):410–22.
- Khuri, A. I., and Raymond H. Myers. 1979. "Modified Ridge Analysis." *Technometrics* 21(4):467–73.
- Khuri, Andre I., and John A. Cornell. 1996. *Response Surfaces: Designs and Analyses*.

- Khuri, André I., and Siuli Mukhopadhyay. 2010. "Response Surface Methodology." *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics* 2(2):128–49.
- Kim, S. H., and Y. T. Im. 1999. "Knowledge-Based Expert System for Roll Pass and Profile Design for Shape Rolling of Round and Square Bars." *Journal of Materials Processing Technology* 89–90:145–51.
- Koncewicz, S. 1956. "Analiza i Porównanie Wzorow Do Obliczania Roztloczenia Przy Waicowaniu Na Goraco (Analysis and Comparison of Formulae for the Calculation of Spread in Hot Rolling)." *Zeszyty Naukowe Politechniki Sląskiej. Mechanika* (3):47\*63.
- Kubit, Andrzej, and Tomasz Trzepiecinski. 2020. "A Fully Coupled Thermo-Mechanical Numerical Modelling of the Refill Friction Stir Spot Welding Process in Alclad 7075-T6 Aluminium Alloy Sheets." *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 20(4):117.
- Kumar Parida, Asit, and Kalipada Maity. 2019. "Modeling of Machining Parameters Affecting Flank Wear and Surface Roughness in Hot Turning of Monel-400 Using Response Surface Methodology (RSM)." *Measurement* 137:375–81.
- Kurt, Gazi. 2019. "Çelik Profillerin Sıcak Haddelenmesinde Merdane Kalibre Tasarımı ve Simulasyonu." Karabük Üniversitesi.
- Kurt, Gazi, and Nafiz Yaşar. 2020. "Comparison of Experimental, Analytical and Simulation Results for Hot Rolling of S275JR Quality Steel." *Journal of Materials Research and Technology* 9(3):5204–15.
- Kwon, H. C., and Y. T. Im. 2002. "Interactive Computer-Aided-Design System for Roll Pass and Profile Design in Bar Rolling." *Journal of Materials Processing Technology* 123(3):399–405.
- Lambiase, Francesco. 2013. "Optimization of Shape Rolling Sequences by Integrated Artificial Intelligent Techniques." *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 68(1–4):443–52.
- Lambiase, Francesco. 2014. "Prediction of Geometrical Profile in Slit Rolling Pass." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 71(5–8):1285–93.
- Lange, Kurt, Klaus Pöhlandt, Ragu S. Raghupathi, John D. Saniter, Wolfgang J. Sauer, John A. Schey, Klaus J. Weinmann, and G. E. O. Gidera, eds. 1985. *Handbook of Metal Forming*. Vol. 16. First. Michigan USA: Society of Manufacturing Engineers.
- Lapovok, R., and P. F. Thomson. 1997. "An Approach to the Optimal Design of Rolling Passes." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 37(8):1143–54.
- Lee, S. M., W. Shin, and R. Shivpuri. 1992. "Investigation of Two Square-to-Round Multipass Rolling Sequences by the Slab-Finite Element Method." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 32(3):315–27.
- Lee, Sang-jin, Kyung-hun Lee, Dae-cheol Ko, Sang-kon Lee, and Byung-min Kim. 2015. "Design of Roll Profile in Shape Rolling by 3D-EFA." 16(4):701–6.



- Li, Tianxiang, Haijun Li, Ruihao Li, Zhaodong Wang, and Guodong Wang. 2019. "Work Roll Surface Profile Design and Optimization for Hot-Core Heavy Reduction Rolling Process." *ISIJ International* 59(7):1314–22.
- Liman, Muhammad Mukhtar, and Khaled Abou-El-Hossein. 2019. "Modeling and Multiresponse Optimization of Cutting Parameters in SPDT of a Rigid Contact Lens Polymer Using RSM and Desirability Function." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 102(5):1443–65.
- Mesalamy, Ahmed S. El, and Amro Youssef. 2020. "Enhancement of Cutting Quality of Abrasive Waterjet by Using Multipass Cutting Strategy." *Journal of Manufacturing Processes* 60:530–43.
- Milenin, Andrij, Władysław Zalecki, Monika Pernach, Łukasz Rauch, Roman Kuziak, Tomasz Zygmunt, and Maciej Pietrzyk. 2020. "Numerical Simulation of Manufacturing Process Chain for Pearlitic and Bainitic Steel Rails." *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 20(4):107.
- Minutolo, F. Capece, M. Durante, F. Lambiase, and A. Langella. 2006. "Dimensional Analysis of a New Type of Groove for Steel Rebar Rolling." *Journal of Materials Processing Technology* 175(1–3):69–76.
- Moghaddas, M. A. 2021. "Modeling and Optimization of Thrust Force, Torque, and Surface Roughness in Ultrasonic-Assisted Drilling Using Surface Response Methodology." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 112(9):2909–23.
- Mohammed, Sayeed, Zhe Zhang, and Radovan Kovacevic. 2020. "Optimization of Processing Parameters in Fiber Laser Cladding." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 111(9):2553–68.
- Montgomery, D. C. 2008. *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons.
- Myers, Raymond H., Douglas C. Montgomery, and Christine M. Anderson-cook. 2016. *Response Surface Methodology*.
- Na, Doo-Hyun, and Youngseog Lee. 2013. "A Study to Predict the Creation of Surface Defects on Material and Suppress Them in Caliber Rolling Process." *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 14(10):1727–34.
- Nayak, Bijaya Bijeta, Souranil Kundu, Mritunjay Kumar, Vivek Kumar, Rishabh Kumar, and Kumar Poornendu Shivam. 2021. "Parametric Optimization in Drilling of GFRP Composites Using Desirability Function Integrated Simulated Annealing Approach." *Materials Today: Proceedings*.
- Nellippallil, A.B., V. Rangaraj, B. Gautham, A. K. Singh, J. K. Allen, and F. Mistree. 2017. "A Goal-Oriented, Inverse Decision-Based Design Method to Achieve the Vertical and Horizontal Integration of Models in a Hot Rod Rolling Process Chain." *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference* 2B-2017(August 2017).
- Nellippallil, Anand Balu, Kevin N. Song, Chung-Hyun Goh, Pramod Zagade, B. P. Gautham, Janet K. Allen, and Farrokh Mistree. 2016. "A Goal Oriented, Sequential Process Design of a Multi-Stage Hot Rod Rolling System." P. V02BT03A007 in *42nd*

*Design Automation Conference.*

- Nellippallil, Anand Balu, Kevin N. Song, Chung-Hyun Goh, Pramod Zagade, B. P. Gautham, Janet K. Allen, and Farrokh Mistree. 2017. "A Goal-Oriented, Sequential, Inverse Design Method for the Horizontal Integration of a Multistage Hot Rod Rolling System." *Journal of Mechanical Design* 139(3):031403.
- Oduguwa, V., and R. Roy. 2006. "A Review of Rolling System Design Optimisation." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 46(7–8):912–28.
- Oduguwa, Victor, Rajkumar Roy, and Didier Farrugia. 2007. "Development of a Soft Computing-Based Framework for Engineering Design Optimisation with Quantitative and Qualitative Search Spaces." *Applied Soft Computing Journal* 7(1):166–88.
- Oduguwa, Victor, Ashutosh Tiwari, and Rajkumar Roy. 2004. "Sequential Process Optimisation Using Genetic Algorithms BT - Parallel Problem Solving from Nature - PPSN VIII." Pp. 782–91 in, edited by X. Yao, E. K. Burke, J. A. Lozano, J. Smith, J. J. Merelo-Guervós, J. A. Bullinaria, J. E. Rowe, P. Tiño, A. Kabán, and H.-P. Schwefel. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Oduguwa, Victor, Ashutosh Tiwari, and Rajkumar Roy. 2006. "Sequential Process Optimisation Using Genetic Algorithms." 3242:782–91.
- Orcajo, G. A., J. Rodríguez D., P. Ardura G., J. M. Cano, J. G. Norniella, R. Llera T., and D. Cifrián R. 2016. "Dynamic Estimation of Electrical Demand in Hot Rolling Mills." *IEEE Transactions on Industry Applications* 52(3):2714–23.
- Pan, Cheng-gang, Chuan-xiang Zhao, Qing-ming Chang, Jia-lin Zhou, and Qiong Wu. 2017. "Three-Dimensional Metal Particle Flow Simulation during the Whole Rolling Process for 60 Kg/m Heavy Rail." *Advances in Mechanical Engineering* 9:168781401772087.
- Park, J. J., Nuno Rebelo, and Shiro Kobayashi. 1983. "A New Approach to Preform Design in Metal Forming with the Finite Element Method." *International Journal of Machine Tool Design and Research* 23(1):71–79.
- Park, Mincheol, Chanjoo Lee, Jungmin Lee, Inkyu Lee, Mansoo Joun, Byungmin Kim, and Kyunghun Lee. 2016. "Development of L-Sectioned Ring for Construction Machines by Profile Ring Rolling Process." *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 17(2):233–40.
- Pater, Zbigniew. 2020. "A Comparative Analysis of Forming Railway Axles in 3- and 4-Roll Rolling Mills." *Materials* 13(14):764–84.
- Pinto, Diana, Elsa F. Vieira, Andreia F. Peixoto, Cristina Freire, Vitor Freitas, Paulo Costa, Cristina Delerue-Matos, and Francisca Rodrigues. 2021. "Optimizing the Extraction of Phenolic Antioxidants from Chestnut Shells by Subcritical Water Extraction Using Response Surface Methodology." *Food Chemistry* 334:127521.
- Prabhu, P. R., S. M. Kulkarni, and Sathyashankara Sharma. 2020. "Multi-Response Optimization of the Turn-Assisted Deep Cold Rolling Process Parameters for Enhanced Surface Characteristics and Residual Stress of AISI 4140 Steel Shafts." *Journal of Materials Research and Technology* 9(5):11402–23.

- Qazi, Mohsin I., Muhammad Abas, Razaullah Khan, Waqas Saleem, Catalin I. Pruncu, and Muhammad Omair. 2021. "Experimental Investigation and Multi-Response Optimization of Machinability of AA5005H34 Using Composite Desirability Coupled with PCA." *Metals* 11(2).
- R. C. Hibbeler. 2010. *Engineering Mechanics: Dynamics*. 12th ed. New Jersey: Prentice Hall.
- Rao, Singiresu S. 2011. *The Finite Element Method in Engineering*. Elsevier Inc.
- Raymond A. Serway, and Jr. John W. Jewett. 2010. *Physics For Scientists and Engineers With Modern Physics*. 8th ed. Cengage Learning.
- Reybrouck, Nicky, Tim Mullem, L. Taerwe, and Robby Caspeepe. 2020. "Influence of Long-term Creep on Prestressed Concrete Beams in Relation to Deformations and Structural Resistance: Experiments and Modeling." *Structural Concrete* 21.
- Sahoo, Ashok Kumar, and Purna Chandra Mishra. 2014. "A Response Surface Methodology and Desirability Approach for Predictive Modeling and Optimization of Cutting Temperature in Machining Hardened Steel." *International Journal of Industrial Engineering Computations* 5(3):407–16.
- Sahoo, Ashok, Arun Rout, and Diptikanta Das. 2015. "Response Surface and Artificial Neural Network Prediction Model and Optimization for Surface Roughness in Machining." *International Journal of Industrial Engineering Computations* 6:229–40.
- Sakhaei, A. H., M. Salimi, and M. Kadkhodaei. 2013. "New Multi-Pass Hot Channel Section Rolling Design by the Finite Element Method." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* 227(12):2742–50.
- Sharifi, Shima, Rahbar Rahimi, Davod Mohebbi-Kalhari, and C. Ozgur Colpan. 2020. "Coupled Computational Fluid Dynamics-Response Surface Methodology to Optimize Direct Methanol Fuel Cell Performance for Greener Energy Generation." *Energy* 198:117293.
- Sharma, P. C. 2007. *A Textbook of Production Technology*. 6th ed. New Delhi: S. Chand Publishing.
- Shivpuri, R., and W. Shin. 1992. "A Methodology for Roll Pass Optimization for Multi-Pass Shape Rolling." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 32(5):671–83.
- Siebel, E. 1932. *Die Formgebung Im Bildsamen Zustande (Formability in Metal Working)*. Dusseldorf.
- Simsek, Suleyman, and Samet Uslu. 2020. "Investigation of the Effects of Biodiesel/2-Ethylhexyl Nitrate (EHN) Fuel Blends on Diesel Engine Performance and Emissions by Response Surface Methodology (RSM)." *Fuel* 275:118005.
- Simufact Engineering GmbH. 2012. "Simufact.Material Manuel." 31.

- Simufact Engineering GmbH. 2015. "Simufact.Forming Basics." 141.
- Singh, Ram, Syed Abou Iltaf Hussain, Aruntapan Dash, and Ram Naresh Rai. 2020. "Modelling and Optimizing Performance Parameters in the Wire-Electro Discharge Machining of Al5083/B4C Composite by Multi-Objective Response Surface Methodology." *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 42(6):344.
- Spittel, Marlene, and Thilo Spittel. 2009. *Advanced Materials and Technologies Volume 2 Materials Subvolume C Metal Forming Data*. edited by H. Warlimont. Berlin: Springer.
- SteelData. 2021. "SteelData." Retrieved (<https://www.steel-data.com/>).
- Strycharska, D., S. Mróz, and P. Szota. 2017. "Increasing the Durability of Separating Rolls During Rolling Ribbed Bars in the Three-Strand Technology." 62(No 3).
- Świercz, Rafał, Dorota Oniszczyk-Świercz, and Tomasz Chmielewski. 2019. "Multi-Response Optimization of Electrical Discharge Machining Using the Desirability Function." *Micromachines* 10(1).
- T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı. 2019. *DEMİR ÇELİK SEKTÖR RAPORU (2019)*.
- T.C. Ticaret Bakanlığı, İhracat Genel Müdürlüğü. 2018. *Demir Çelik, Demir-Çelikten Eşya Sektör*. Ankara.
- Tafel, Wilhelm. 1921. "Walzen Und Walzenkalibrieren; Einführung in Die Vorgänge Beim Walzen Und in Die Arbeit Des Kalibrierens, von Wilhelm Tafel ... Mit 161 Abb. Und 8 Tafeln." 6 p. 1., 228, [4] p.
- Tati, Abdelouahab. 2021. "A Five Unknowns High Order Shear Deformation Finite Element Model for Functionally Graded Plates Bending Behavior Analysis." *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 43.
- Tebassi, Hamid, Mohamed Yallese, S. Belhadi, François Girardin, and Tarek Mabrouki. 2017. "Quality-Productivity Decision Making When Turning of Inconel 718 Aerospace Alloy: A Response Surface Methodology Approach." *International Journal of Industrial Engineering Computations* 8:347–62.
- Telles, Fabio, Heraldo J. Amorim, and André J. Souza. 2021. "Comparative Assessment of Lubri-Cooling Conditions When Turning CP-Ti Grade 4 Based on Surface Roughness." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 113(1):365–78.
- Turczyn, Stanisław, Michał Dziedzic, and Zbigniew Kuzminski. 2014. "A STUDY ON DESIGN OF SLITTING PASSES USED FOR REBAR ROLLING." Pp. 1–6 in *Metal 2014*. Brno: TANGER Ltd.
- Türk Standartları Enstitüsü. 2006. "TS EN 10025-1 Sıcak Haddelenmiş Yapı Çelikleri - Bölüm 1: Genel Teknik Teslim Şartları."
- Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği. 2019. *Türkiye Demir ve Demir Dışı Metaller Meclisi Raporu*.

- Turner, M. J., R. W. Clough, H. C. Martin, and L. J. Topp. 1956. "Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures." *Journal of the Aeronautical Sciences* 23(9):805–23.
- Usman, Mustapha, Ping Zou, Beibei Ji, and Tianyu Lin. 2021. "Development of Empirical Models for the Prediction of Surface Functional Parameters in Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 113.
- Vining, Geoff. 2010. "Technical Advice: Residual Plots to Check Assumptions." *Quality Engineering* 23(1):105–10.
- Vinogradov, A. I., M. A. Timofeeva, S. O. Korol', and A. I. Traino. 2013. "Development of a Rational Roll Pass Design for a Rolling Mill Using Performance Criteria." *Russian Metallurgy (Metally)* 2013(1):43–47.
- Vogel, Manfred, and Marion Merklein. 2021. "Manufacturing of Tailored Blanks by Orbital Forming with a Two-Sided Material Thickening." *Journal of Materials Processing Technology* 287(March 2019):116491.
- Wang, Minting, Xuetong Li, Fengshan Du, and Yangzeng Zheng. 2005. "A Coupled Thermal-Mechanical and Microstructural Simulation of the Cross Wedge Rolling Process and Experimental Verification." *Materials Science and Engineering A* 391(1–2):305–12.
- Waseem, Muhammad, Bashir Salah, Tufail Habib, Waqas Saleem, Muhammad Abas, Razaullah Khan, Usman Ghani, and Muftooh U. Siddiqi. 2020. "Multi-Response Optimization of Tensile Creep Behavior of PLA 3D Printed Parts Using Categorical Response Surface Methodology." *Polymers* 12(12).
- Widyaningsih, Tri, S. Waziroh, E. Wijayanti, and N. Maslukhah. 2018. "Pilot Plant Scale Extraction of Black Cincau (*Mesona Palustris* BL) Using Historical-Data Response Surface Methodology." *International Food Research Journal* 25.
- Wusatowski, Z. 1955. "Hot Rolling: A Study of Draught, Spread and Elongation." *Iron Steel* 28:49–54.
- Wusatowski, Zygmunt. 1969. *Fundamentals of Rolling*. Gliwice, Poland: Pergamon.
- Yandell, B. S. 2017. *Practical Data Analysis for Designed Experiments*. CRC Press.
- Yılmaz, Mustafa. 1988. *Metallerin Haddelenmesi*. Hatay: Türkiye Demir ve Çelik İşletmeleri.
- Yu, Jianmin, Qiang Wang, Zhimin Zhang, and Xubin Li. 2017. "Multi-Objective Optimizations of Multidirectional Forming Mold Based on Fractional Factorial Design." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 88(1):1151–60.



**EKLER**

EK-1. Deneyslerde kullanılan bağımsız değişken setleri ve bunlara karşılık gelen deneysel bağımlı değişken değerleri

| <b>Deney No</b> | <b>e<sub>1</sub><br/>(mm)</b> | <b>e<sub>2</sub><br/>(mm)</b> | <b>h<sub>1</sub><br/>(mm)</b> | <b>h<sub>2</sub><br/>(mm)</b> | <b>M<sub>t</sub><br/>(Nm)</b> | <b>F<sub>z</sub><br/>(kN)</b> | <b>E<sub>a</sub><br/>(J)</b> |
|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| 1               | 150,00                        | 151,00                        | 150,00                        | 104,00                        | 328000                        | 1520                          | 1,46E+06                     |
| 2               | 104,00                        | 114,00                        | 151,00                        | 95,00                         | 166000                        | 840                           | 1,15E+06                     |
| 3               | 95,00                         | 95,00                         | 114,00                        | 79,00                         | 118000                        | 640                           | 1,14E+06                     |
| 4               | 79,00                         | 87,00                         | 95,00                         | 60,00                         | 72000                         | 500                           | 9,59E+05                     |
| 5               | 150,00                        | 150,00                        | 150,00                        | 122,40                        | 254000                        | 1020                          | 1,18E+06                     |
| 6               | 112,50                        | 143,00                        | 150,00                        | 99,00                         | 160750                        | 890                           | 9,63E+05                     |
| 7               | 99,00                         | 104,00                        | 143,00                        | 97,00                         | 133000                        | 645                           | 1,02E+06                     |
| 8               | 104,00                        | 123,00                        | 97,00                         | 48,00                         | 135000                        | 880                           | 1,32E+06                     |
| 9               | 48,00                         | 60,00                         | 128,00                        | 60,00                         | 61000                         | 345                           | 1,05E+06                     |
| 10              | 150,00                        | 172,50                        | 150,00                        | 112,50                        | 168350                        | 1250                          | 7,63E+05                     |
| 11              | 112,50                        | 135,00                        | 172,50                        | 90,00                         | 205100                        | 970                           | 1,14E+06                     |
| 12              | 90,00                         | 108,75                        | 135,00                        | 97,50                         | 80000                         | 630                           | 7,15E+05                     |
| 13              | 97,50                         | 101,25                        | 108,75                        | 55,00                         | 166600                        | 1080                          | 1,57E+06                     |
| 14              | 55,00                         | 60,00                         | 101,25                        | 60,00                         | 73200                         | 420                           | 1,31E+06                     |
| 15              | 150,00                        | 178,95                        | 150,00                        | 91,70                         | 237500                        | 1630                          | 1,03E+06                     |
| 16              | 91,70                         | 110,68                        | 178,95                        | 108,14                        | 144100                        | 640                           | 9,43E+05                     |
| 17              | 110,68                        | 129,00                        | 108,14                        | 67,66                         | 142700                        | 985                           | 1,17E+06                     |
| 18              | 67,66                         | 81,67                         | 129,00                        | 55,00                         | 139000                        | 1030                          | 1,51E+06                     |
| 19              | 150,00                        | 165,00                        | 150,00                        | 94,52                         | 247500                        | 1520                          | 1,08E+06                     |
| 20              | 94,52                         | 103,98                        | 165,00                        | 103,98                        | 199000                        | 880                           | 1,35E+06                     |
| 21              | 60,06                         | 66,07                         | 124,77                        | 55,00                         | 99000                         | 600                           | 1,26E+06                     |
| 22              | 55,00                         | 60,00                         | 66,07                         | 60,00                         | 27000                         | 170                           | 7,14E+05                     |
| 23              | 150,00                        | 170,48                        | 150,00                        | 80,15                         | 213250                        | 1680                          | 9,04E+05                     |
| 24              | 93,25                         | 101,13                        | 88,98                         | 49,83                         | 123000                        | 890                           | 1,40E+06                     |
| 25              | 49,83                         | 61,79                         | 101,13                        | 49,53                         | 68300                         | 440                           | 1,27E+06                     |

EK-1. (Devam) Deneyleerde kullanılan bağımsız değişken setleri ve bunlara karşılık gelen deneysel bağımlı değişken değerleri

| Deney No | e <sub>1</sub> (mm) | e <sub>2</sub> (mm) | h <sub>1</sub> (mm) | h <sub>2</sub> (mm) | M <sub>t</sub> (Nm) | F <sub>z</sub> (kN) | E <sub>a</sub> (J) |
|----------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| 26       | 150,00              | 153,71              | 150,00              | 95,93               | 290000              | 1500                | 1,27E+06           |
| 27       | 95,93               | 103,13              | 153,71              | 93,71               | 180000              | 780                 | 1,26E+06           |
| 28       | 93,71               | 96,04               | 96,04               | 65,96               | 122500              | 625                 | 1,23E+06           |
| 29       | 65,96               | 70,91               | 96,04               | 58,55               | 70000               | 625                 | 1,05E+06           |
| 30       | 150,00              | 170,48              | 150,00              | 80,15               | 266100              | 1950                | 1,12E+06           |
| 31       | 80,15               | 93,25               | 170,48              | 88,98               | 157400              | 900                 | 1,23E+06           |
| 32       | 93,25               | 101,13              | 88,98               | 49,83               | 113400              | 1005                | 1,31E+06           |
| 33       | 150,00              | 208,06              | 150,00              | 59,15               | 363500              | 2200                | 1,46E+06           |
| 34       | 83,57               | 111,73              | 80,55               | 50,00               | 132000              | 620                 | 1,17E+06           |
| 35       | 59,15               | 83,57               | 208,06              | 80,55               | 26350               | 320                 | 6,74E+05           |
| 36       | 45,58               | 70,00               | 97,47               | 56,85               | 115450              | 990                 | 1,41E+06           |
| 37       | 56,85               | 60,00               | 70,00               | 60,00               | 52550               | 320                 | 1,15E+06           |
| 38       | 150,00              | 165,00              | 150,00              | 94,53               | 274000              | 1750                | 1,20E+06           |
| 39       | 94,53               | 103,98              | 165,00              | 103,98              | 170000              | 780                 | 1,18E+06           |
| 40       | 103,98              | 124,78              | 103,98              | 60,07               | 117750              | 890                 | 1,08E+06           |
| 41       | 60,07               | 78,53               | 124,78              | 58,00               | 88650               | 540                 | 1,16E+06           |
| 42       | 58,00               | 60,00               | 78,53               | 60,00               | 34220               | 260                 | 7,41E+05           |
| 43       | 150,00              | 165,00              | 150,00              | 113,45              | 156950              | 1250                | 7,03E+05           |
| 44       | 113,45              | 150,34              | 165,00              | 99,37               | 222700              | 1300                | 1,22E+06           |
| 45       | 109,30              | 135,30              | 102,10              | 54,55               | 157126              | 1080                | 1,32E+06           |
| 46       | 54,55               | 60,00               | 135,30              | 60,00               | 89300               | 640                 | 1,13E+06           |
| 47       | 150,00              | 172,50              | 150,00              | 112,50              | 150750              | 1260                | 7,41E+05           |
| 48       | 112,50              | 135,00              | 172,50              | 90,00               | 217000              | 1300                | 1,24E+06           |
| 49       | 90,00               | 97,50               | 135,00              | 90,00               | 98500               | 680                 | 8,92E+05           |
| 50       | 97,50               | 101,25              | 90,00               | 58,00               | 79650               | 870                 | 9,35E+05           |
| 51       | 150,00              | 180,00              | 150,00              | 135,00              | 90500               | 890                 | 4,00E+05           |



EK-1. (Devam) Deneyleerde kullanılan bağımsız değişken setleri ve bunlara karşılık gelen deneysel bağımlı değişken değerleri

| Deney No | e <sub>1</sub> (mm) | e <sub>2</sub> (mm) | h <sub>1</sub> (mm) | h <sub>2</sub> (mm) | M <sub>t</sub> (Nm) | F <sub>z</sub> (kN) | E <sub>a</sub> (J) |
|----------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| 52       | 180,00              | 185,00              | 135,00              | 60,00               | 359600              | 2650                | 1,54E+06           |
| 53       | 60,00               | 67,50               | 185,00              | 127,50              | 70500               | 430                 | 9,07E+05           |
| 54       | 67,50               | 82,50               | 127,50              | 58,00               | 97380               | 750                 | 1,15E+06           |
| 55       | 58,00               | 60,00               | 82,50               | 60,00               | 44500               | 360                 | 9,83E+05           |
| 56       | 160,00              | 166,80              | 120,00              | 96,00               | 150150              | 1480                | 8,30E+05           |
| 57       | 96,00               | 110,00              | 166,80              | 104,00              | 174712              | 470                 | 1,24E+06           |
| 58       | 130,00              | 136,12              | 130,00              | 124,00              | 60792               | 460                 | 3,78E+05           |
| 59       | 136,00              | 161,00              | 124,00              | 100,00              | 101030              | 920                 | 5,95E+05           |
| 60       | 100,00              | 112,00              | 161,00              | 110,00              | 114333              | 750                 | 7,22E+05           |
| 61       | 112,00              | 130,00              | 110,00              | 70,00               | 132400              | 1200                | 1,08E+06           |
| 62       | 167,11              | 189,98              | 128,73              | 70,00               | 267550              | 1700                | 1,27E+06           |
| 63       | 70,00               | 72,70               | 189,00              | 114,02              | 123175              | 420                 | 1,11E+06           |
| 64       | 72,70               | 73,00               | 114,02              | 59,00               | 125450              | 650                 | 1,41E+06           |
| 65       | 59,00               | 60,00               | 73,00               | 60,00               | 46600               | 340                 | 1,06E+06           |
| 66       | 70,00               | 72,70               | 189,00              | 114,02              | 151850              | 460                 | 1,27E+06           |
| 67       | 59,00               | 60,00               | 73,00               | 60,00               | 45440               | 260                 | 1,07E+06           |
| 68       | 72,70               | 119,76              | 114,02              | 40,00               | 123750              | 900                 | 1,35E+06           |
| 69       | 40,00               | 60,00               | 73,00               | 60,00               | 55000               | 260                 | 1,15E+06           |
| 70       | 72,70               | 119,76              | 114,02              | 40,00               | 121800              | 880                 | 1,33E+06           |
| 71       | 150,00              | 170,00              | 150,00              | 123,82              | 126800              | 1050                | 5,92E+05           |
| 72       | 170,00              | 184,53              | 123,82              | 112,28              | 64750               | 870                 | 3,39E+05           |
| 73       | 112,28              | 130,00              | 184,53              | 80,00               | 248150              | 1310                | 1,23E+06           |
| 74       | 130,00              | 140,00              | 80,00               | 59,00               | 101150              | 860                 | 9,47E+05           |
| 75       | 59,00               | 60,00               | 140,00              | 60,00               | 127700              | 680                 | 1,53E+06           |
| 76       | 150,00              | 161,27              | 150,00              | 122,74              | 135657              | 915                 | 6,32E+05           |
| 77       | 161,27              | 168,11              | 122,74              | 102,08              | 112925              | 1124                | 6,13E+05           |

EK-1. (Devam) Deneyleerde kullanılan bağımsız değişken setleri ve bunlara karşılık gelen deneysel bağımlı değişken değerleri

| Deney No | e <sub>1</sub> (mm) | e <sub>2</sub> (mm) | h <sub>1</sub> (mm) | h <sub>2</sub> (mm) | M <sub>t</sub> (Nm) | F <sub>z</sub> (kN) | E <sub>a</sub> (J) |
|----------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| 78       | 102,08              | 118,81              | 168,11              | 127,72              | 91611               | 759                 | 6,09E+05           |
| 79       | 118,81              | 172,86              | 127,72              | 59,55               | 206433              | 1291                | 1,57E+06           |
| 80       | 59,55               | 60,00               | 172,86              | 60,00               | 128172              | 805                 | 1,26E+06           |
| 81       | 150,00              | 161,22              | 150,00              | 124,23              | 91500,5             | 970                 | 4,28E+05           |
| 82       | 161,22              | 168,22              | 124,23              | 108,13              | 90960,5             | 1065                | 4,95E+05           |
| 83       | 108,13              | 133,52              | 168,22              | 132,54              | 84642,5             | 790                 | 5,37E+05           |
| 84       | 133,52              | 170,57              | 132,54              | 54,96               | 218606              | 1580                | 1,20E+06           |
| 85       | 54,96               | 60,00               | 170,57              | 60,00               | 129151              | 890                 | 1,40E+06           |
| 86       | 150,00              | 161,11              | 150,00              | 136,09              | 65743,5             | 690                 | 3,16E+05           |
| 87       | 161,11              | 174,56              | 136,09              | 121,39              | 86700               | 985                 | 4,28E+05           |
| 88       | 121,39              | 150,56              | 174,56              | 140,93              | 68067,5             | 765                 | 3,62E+05           |
| 89       | 150,56              | 153,09              | 140,93              | 58,90               | 287414              | 1850                | 1,28E+06           |
| 90       | 150,00              | 153,22              | 150,00              | 111,78              | 211044              | 1335                | 9,59E+05           |
| 91       | 153,22              | 156,24              | 111,78              | 90,59               | 112244              | 1180                | 6,85E+05           |
| 92       | 50,00               | 60,00               | 128,04              | 60,00               | 86070,5             | 640                 | 1,43E+06           |
| 93       | 150,00              | 164,99              | 150,00              | 128,61              | 69744               | 877                 | 3,29E+05           |
| 94       | 164,99              | 181,72              | 128,61              | 110,35              | 101124              | 1140                | 5,22E+05           |
| 95       | 110,35              | 114,58              | 181,72              | 161,40              | 115200              | 506                 | 7,15E+05           |
| 96       | 114,58              | 145,88              | 161,40              | 54,31               | 251842              | 1600                | 1,35E+06           |
| 97       | 118,87              | 122,32              | 156,89              | 55,98               | 266789              | 1690                | 1,41E+06           |
| 98       | 150,00              | 164,73              | 150,00              | 125,54              | 76527               | 867                 | 3,59E+05           |
| 99       | 164,73              | 179,88              | 125,54              | 108,79              | 90649,5             | 1000                | 4,78E+05           |
| 100      | 108,79              | 118,87              | 179,88              | 156,89              | 54837,5             | 550                 | 3,44E+05           |
| 101      | 118,87              | 149,68              | 156,89              | 58,03               | 252755              | 1551                | 1,35E+06           |
| 102      | 150,00              | 156,07              | 150,00              | 129,13              | 133735              | 884                 | 6,33E+05           |
| 103      | 156,07              | 162,90              | 129,13              | 111,03              | 86341,5             | 1003                | 4,70E+05           |

EK-1. (Devam) Deneyleerde kullanılan bağımsız değişken setleri ve bunlara karşılık gelen deneysel bağımlı değişken değerleri

| <b>Deney No</b> | <b>e<sub>1</sub><br/>(mm)</b> | <b>e<sub>2</sub><br/>(mm)</b> | <b>h<sub>1</sub><br/>(mm)</b> | <b>h<sub>2</sub><br/>(mm)</b> | <b>M<sub>t</sub><br/>(Nm)</b> | <b>F<sub>z</sub><br/>(kN)</b> | <b>E<sub>a</sub><br/>(J)</b> |
|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| 104             | 111,03                        | 114,00                        | 162,90                        | 134,32                        | 154007                        | 710                           | 9,85E+05                     |
| 105             | 114,00                        | 121,67                        | 134,32                        | 67,68                         | 197226                        | 1370                          | 1,29E+06                     |
| 106             | 67,68                         | 75,00                         | 121,67                        | 75,00                         | 101574                        | 648                           | 1,24E+06                     |
| 107             | 150,00                        | 163,82                        | 150,00                        | 132,61                        | 53288,5                       | 804                           | 2,54E+05                     |
| 108             | 163,82                        | 177,30                        | 132,61                        | 117,22                        | 81772                         | 990                           | 4,19E+05                     |
| 109             | 117,22                        | 123,84                        | 177,30                        | 157,03                        | 93661,5                       | 558                           | 5,53E+05                     |
| 110             | 123,84                        | 159,24                        | 157,03                        | 64,22                         | 249607                        | 1520                          | 1,29E+06                     |
| 111             | 64,22                         | 75,00                         | 159,24                        | 75,00                         | 117219                        | 770                           | 1,18E+06                     |
| 112             | 123,84                        | 129,83                        | 157,03                        | 65,66                         | 240959                        | 1680                          | 1,25E+06                     |
| 113             | 65,66                         | 75,00                         | 129,83                        | 75,00                         | 111739                        | 770                           | 1,32E+06                     |
| 114             | 150,00                        | 165,00                        | 150,00                        | 124,00                        | 71881                         | 945                           | 3,36E+05                     |
| 115             | 165,00                        | 170,00                        | 124,00                        | 100,00                        | 119238                        | 1262                          | 6,24E+05                     |
| 116             | 100,00                        | 113,00                        | 170,00                        | 110,00                        | 144334                        | 1016                          | 9,31E+05                     |
| 117             | 112,00                        | 130,00                        | 110,00                        | 70,00                         | 117436                        | 984                           | 9,46E+05                     |
| 118             | 70,00                         | 80,00                         | 130,00                        | 74,00                         | 107602                        | 745                           | 1,19E+06                     |
| 119             | 150,00                        | 165,00                        | 150,00                        | 116,00                        | 96218                         | 1100                          | 4,41E+05                     |
| 120             | 165,00                        | 165,00                        | 116,00                        | 94,00                         | 124763                        | 1310                          | 6,31E+05                     |
| 121             | 94,00                         | 100,00                        | 165,00                        | 124,00                        | 123718                        | 910                           | 8,76E+05                     |
| 122             | 100,00                        | 100,00                        | 124,00                        | 106,00                        | 116918                        | 1010                          | 1,03E+06                     |
| 123             | 100,00                        | 110,00                        | 106,00                        | 74,00                         | 108090                        | 700                           | 9,97E+05                     |
| 124             | 150,00                        | 167,00                        | 150,00                        | 120,00                        | 92495                         | 1020                          | 4,28E+05                     |
| 125             | 120,00                        | 137,00                        | 167,00                        | 100,00                        | 206895                        | 1360                          | 1,07E+06                     |
| 126             | 115,00                        | 120,00                        | 110,00                        | 66,00                         | 128803                        | 1108                          | 9,78E+05                     |
| 127             | 66,00                         | 75,00                         | 120,00                        | 76,00                         | 88792                         | 586                           | 1,10E+06                     |
| 128             | 150,00                        | 169,21                        | 150,00                        | 115,67                        | 105996                        | 1116                          | 4,86E+05                     |
| 129             | 115,67                        | 127,18                        | 169,21                        | 128,35                        | 126763                        | 945                           | 7,40E+05                     |

EK-1. (Devam) Deneyleerde kullanılan bağımsız değişken setleri ve bunlara karşılık gelen deneysel bağımlı değişken değerleri

| <b>Deney No</b> | <b>e<sub>1</sub><br/>(mm)</b> | <b>e<sub>2</sub><br/>(mm)</b> | <b>h<sub>1</sub><br/>(mm)</b> | <b>h<sub>2</sub><br/>(mm)</b> | <b>M<sub>t</sub><br/>(Nm)</b> | <b>F<sub>z</sub><br/>(kN)</b> | <b>E<sub>a</sub><br/>(J)</b> |
|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| <b>130</b>      | 128,35                        | 142,09                        | 127,18                        | 94,51                         | 88110                         | 940                           | 5,71E+05                     |
| <b>131</b>      | 94,51                         | 104,23                        | 142,09                        | 68,48                         | 179937                        | 1195                          | 1,33E+06                     |
| <b>132</b>      | 68,48                         | 75,00                         | 142,09                        | 75,00                         | 77291                         | 505                           | 1,09E+06                     |
| <b>133</b>      | 103,29                        | 106,09                        | 143,63                        | 68,03                         | 201590                        | 1292                          | 1,38E+06                     |
| <b>134</b>      | 68,03                         | 75,00                         | 106,09                        | 75,00                         | 77692                         | 535                           | 1,08E+06                     |
| <b>135</b>      | 150,00                        | 163,21                        | 150,00                        | 117,94                        | 102268                        | 1106                          | 4,71E+05                     |
| <b>136</b>      | 163,21                        | 177,79                        | 117,94                        | 95,73                         | 104939                        | 1146                          | 5,77E+05                     |
| <b>137</b>      | 94,51                         | 103,29                        | 177,79                        | 143,63                        | 90591,5                       | 632                           | 6,34E+05                     |
| <b>138</b>      | 103,29                        | 120,52                        | 143,63                        | 73,69                         | 158860                        | 1100                          | 1,10E+06                     |
| <b>139</b>      | 73,69                         | 75,00                         | 120,52                        | 75,00                         | 111273                        | 650                           | 1,26E+06                     |
| <b>140</b>      | 150,00                        | 160,80                        | 150,00                        | 130,71                        | 75969                         | 825                           | 3,61E+05                     |
| <b>141</b>      | 160,80                        | 172,63                        | 130,71                        | 113,89                        | 90150,5                       | 1075                          | 4,73E+05                     |
| <b>142</b>      | 113,89                        | 119,03                        | 172,63                        | 152,49                        | 106623                        | 650                           | 6,58E+05                     |
| <b>143</b>      | 119,03                        | 130,64                        | 152,49                        | 73,22                         | 226870                        | 1448                          | 1,28E+06                     |
| <b>144</b>      | 73,22                         | 75,00                         | 130,64                        | 75,00                         | 118318                        | 600                           | 1,25E+06                     |

## DİZİN

**A**

akma gerilmesi · 73, 74  
 ANOVA · viii, ix, x, xi, xvii, 57, 58,  
 60, 62, 90, 104, 105, 110, 116,  
 141, 142, 146, 150, 151  
 ardışık · iv, xiv, 4, 5, 6, 43, 64, 65,  
 66, 69, 70, 91, 94, 138, 165,  
 169

**B**

bağımlı değişken · x, 28, 67, 90,  
 95, 96, 104, 166, 181, 182,  
 183, 184, 185, 186  
 bağımsız değişken · viii, 28, 67,  
 70, 90, 99, 121, 141, 181, 182,  
 183, 184, 185, 186

**C**

CCD · xvii, 34, 57, 95  
 cevap yüzey yöntemi · 6, 41, 57,  
 61, 169  
 cevap yüzeyi yöntemi · 27  
 CYY · vii, xvii, 27, 28, 29, 31, 32,  
 35, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 70,  
 90

**D**

deformasyon · vii, 4, 12, 13, 17,  
 41, 42, 45, 47, 50, 52, 54, 55,  
 73, 74, 85, 141, 163  
 Deney tasarımı · 31  
 döndürme momenti · 95, 100,  
 135

**E**

eleman · vii, xvi, 20, 22, 23, 24,  
 25, 26, 27, 46, 47, 50, 51, 52,  
 53, 81, 83, 85  
 ezme · vii, 8, 12, 13, 15, 16, 50,  
 120

**F**

F değeri · 114, 146  
 faktörler · 4, 31, 106, 115, 143,  
 147, 151

**i**

istenirlik · iv, viii, x, xv, 5, 6, 38,  
 39, 40, 41, 59, 60, 61, 62, 63,  
 64, 65, 66, 90, 91, 92, 93, 94,  
 99, 122, 125, 129, 132, 134,  
 157, 158, 165, 166, 169

**K**

kaba haddeme · 2  
 kalibre · 2, 15, 17, 45, 49, 50, 51,  
 52, 64  
 kutu paso · iv, 2, 5, 18, 135, 165,  
 166, 168, 169

**M**

merkezi birleşik tasarım · xvii

**O**

optimizasyon · iv, viii, ix, x, xi, xii,  
 xiv, xv, xvii, 5, 6, 7, 35, 37, 38,  
 39, 42, 43, 47, 60, 63, 64, 65,  
 66, 67, 68, 69, 91, 92, 93, 94,  
 97, 99, 120, 121, 135, 136,  
 137, 138, 139, 140, 157, 158,  
 159, 161, 162, 163, 164, 165,  
 166, 167, 168, 169

**P**

P değeri · 104  
 parametre · ix, x, xi, xiv, 48, 54,  
 62, 63, 71, 95, 97, 98, 158,  
 159, 160  
 paso sırası · iv, 4, 5, 42, 49, 64,  
 91, 100, 158

**R**

radyal kuvvet · 90, 136, 138, 161,  
 162, 163, 166, 168  
 regresyon modeli · x, xi, 105, 106,  
 110, 111, 116, 142, 147, 151

**S**

SEY · viii, xi, xvii, 4, 5, 20, 21, 22,  
 27, 43, 45, 46, 50, 51, 52, 53,  
 54, 55, 71, 72, 74, 78, 79, 80,  
 81, 82, 85, 90, 98, 100, 120,  
 121, 135, 136, 141, 158, 166  
 sıcak haddeleme · 1, 2, 3, 7, 42,  
 49, 50, 52, 53, 71

Simülasyon · viii, xvii, 44, 46, 49,  
71, 81, 82, 95, 100, 102, 136  
sonlu elemanlar yöntemi · viii,  
xvii, 4, 20, 21, 50  
studentize · xvii, xviii, 107, 108,  
112, 113, 114, 117, 118, 144,  
145, 148, 149

---

**Ş**

şekillendirme enerjisi · 120

---

**V**

varyans analizi · **57, 58, 60, 141**

---

**Y**

yayıma · 15, 16, 48





# TEKNOVERSİTE



teknoversite AYRICALIĞINDASINIZ

İSTE

