

T.C.  
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**SONLU ELEMENLAR HESAPLAMA PARAMETRELERİNİN SİMÜLASYON  
SÜRESİ VE HASSASİYETİNE ETKİSİNİN TESPİTİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HÜSEYİN VATANSEVER

TEZ DANIŞMANI  
DR.ÖĞR. ÜYESİ EMRE ESENER

BİLECİK, 2021

10395272

T.C.  
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**SONLU ELEMANLAR HESAPLAMA PARAMETRELERİNİN SİMÜLASYON  
SÜRESİ VE HASSASİYETİNE ETKİSİNİN TESPİTİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HÜSEYİN VATANSEVER

TEZ DANIŞMANI  
DR.ÖĞR. ÜYESİ EMRE ESENER

BİLECİK, 2021

10395272

## BEYAN

“Sonlu Elemanlar Hesaplama Parametrelerinin Sac Metal şekillendirme Simülasyon Süresi ve Hassasiyetine Etkisinin İncelenmesi” adlı yüksek lisans tezi hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel ahlak kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

|                                                                                                                                                                                                        |                            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| Bu çalışmamın,<br>Bilimsel Araştırmalar Projeleri (BAP), TÜBİTAK veya benzeri kuruluşlarca desteklenmesi durumunda; projenin ve destekleyen kurumun adı proje numarası ile birlikte beyan edilmelidir. |                            |
| <b>DESTEK ALINMIŞTIR</b>                                                                                                                                                                               | <b>DESTEK ALINMAMIŞTIR</b> |
| Destek alındı ise;                                                                                                                                                                                     |                            |
| <b>Destekleyen Kurum:</b>                                                                                                                                                                              |                            |
| <b>Desteğin Türü</b>                                                                                                                                                                                   | <b>Proje Numarası</b>      |
| 1- BAP (Bilimsel Araştırma Projesi)                                                                                                                                                                    |                            |
| 2- TÜBİTAK                                                                                                                                                                                             |                            |
| <b>Diğer; .....</b>                                                                                                                                                                                    |                            |

**Öğrenci Adı ve Soyadı**

Hüseyin VATANSEVER

**Tarih**

.../.../2021

**İmza**

## ÖN SÖZ

Tez çalışması sırasında, değerli bilgilerini benimle paylaşan, kendisine ne zaman danışsam bana kıymetli zamanını ayırıp sabırla ve büyük bir ilgiyle bana faydalı olabilmek için elinden gelenden fazlasını sunan, güler yüzünü ve samimiyetini benden esirgemeyen ve gelecekteki meslek hayatımda da bana verdiği değerli bilgilerden faydalanacağımı düşündüğüm kıymetli hocam Dr.Öğr. Üyesi Emre ESENER'e teşekkürü bir borç biliyor ve şükranlarımı sunuyorum. Yüksek lisans eğitimim süresince bana katkı sunan anabilim dalının diğer öğretim üyelerine desteklerinden ötürü teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca çalışmalarım sırasınca bana maddi, manevi desteklerini esirgemeyen aileme ve değerli arkadaşlarıma teşekkür ederim.

**Hüseyin VATANSEVER**

## ÖZET

### SONLU ELEMANLAR HESAPLAMA PARAMETRELERİNİN SİMÜLASYON SÜRESİ VE HASSASİYETİNE ETKİSİNİN TESPİTİ

Yapılan çalışmada, sonlu elemanlar hesaplama parametrelerinin sac metal şekillendirme simülasyon süresi ve hassasiyetine etkisinin tespiti incelenmiştir. Bu kapsamda non-lineer sac metal şekillendirme simülasyonlarında hesaplama parametrelerinden simetri durumu, eleman boyutu, eleman formülasyonu, integrasyon nokta sayısı, zaman adım aralığı, adaptiv ağ yapısı derecesi, şekillendirme hızı etkisi, plastisite modeli ve çözümün gerçekleştirildiği sistemin çekirdek sayısı olmak üzere geniş bir küme analiz edilmiştir. Sac metal şekillendirme prosesi olarak malzeme şekillendirilebilirlik özelliklerinin belirgin şekilde analiz edilebildiği kare kutu çekme prosesi tercih edilmiştir. Malzeme olarak ise gelişmiş yüksek mukavemetli çeliklerden TRIP600 kullanılmıştır. Sonlu elemanlar analizi hassasiyetinin belirlenmesi amacıyla şekillendirme kuvvetinin zımba ilerleme mesafesine göre değişimini temsil eden deneysel eğri referans alınmıştır. Sonrasında belirlenen parametrelerin değişken değerlerinde simülasyonlar gerçekleştirilmiş olup her parametrenin hassasiyete ve çözüm süresine etkisi tespit edilmiştir. Bu kapsamda deneysel eğrinin tahmin edilebilirliği her parametre için incelenmiştir. Parametre kümelerinden süreyi minimize eden parametrelerin tespiti sonrasında elde edilen en verimli simülasyon sonucunda başlangıç durumuna göre hassasiyetten ödün vermeden zamandan yaklaşık %90 oranında tasarruf sağlanmıştır.

#### Anahtar Kelimeler

Sonlu elemanlar analizi, Sac metal şekillendirme, Hesaplama parametreleri, Hassasiyet, Simülasyon süresi.

## **ABSTRACT**

### **DETERMINING THE EFFECT OF FINITE ELEMENT CALCULATION PARAMETERS ON SIMULATION TIME AND ACCURACY**

In the study, it is aimed to determine the effects of finite element calculation parameters on sheet metal forming simulation time and accuracy. In this context, symmetry condition, element size, element formulation, number of integration points, time step size, adaptivity level, forming speed, plasticity model, and number of cores in CPU are analyzed as finite element calculation parameters. Square cup drawing is used as sheet metal forming process due to its capability of analyzing materials formability properties. TRIP600 advanced high strength steel is used as material. Forming force vs. punch stroke curve is used as experimental result for validating finite element simulation prediction accuracy. Then, simulations with determined parameters were performed with selected values and effects of these parameters on simulation time and accuracy are contained. Simulation with determined parameters minimized the simulation time as approximate 90%.

#### **Key Words**

Finite element analysis, Sheet metal forming, Calculation parameters, Accuracy, Simulation time.

## İÇİNDEKİLER

|                                       | Sayfa No |
|---------------------------------------|----------|
| ÖN SÖZ.....                           | i        |
| ÖZET.....                             | ii       |
| ABSTRACT .....                        | iii      |
| İÇİNDEKİLER.....                      | iv       |
| ŞEKİLLER LİSTESİ.....                 | v        |
| TABLolar LİSTESİ.....                 | vii      |
| SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ ..... | viii     |
| 1. GİRİŞ.....                         | 1        |
| 1.1 Tezin Amacı.....                  | 4        |
| 2. SAC METAL ŞEKİLLENDİRME .....      | 5        |
| 3. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ.....       | 13       |
| 3.1 Hesaplama Parametreleri .....     | 15       |
| 3.1.1 Simetri Durumu.....             | 15       |
| 3.1.2 Eleman Boyutu.....              | 15       |
| 3.1.3 Kalıp Hızı .....                | 16       |
| 3.1.4 Malzeme Modeli .....            | 16       |
| 3.1.5 Adaptiv Ağ Yapısı Derecesi..... | 18       |
| 3.1.6 Eleman Formülasyonu.....        | 18       |
| 3.1.7 İntegrasyon Nokta Sayısı .....  | 19       |
| 3.1.8 Zaman Adım Aralığı .....        | 20       |
| 3.2 Bölüm Değerlendirmesi.....        | 20       |
| 4. UYGULAMA ÇALIŞMASI .....           | 22       |
| 5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA .....         | 35       |
| KAYNAKLAR.....                        | 38       |

## ŞEKİLLER LİSTESİ

|                                                                                           | Sayfa No |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Şekil 1.1. Sac Ürünlere Örnekler .....                                                    | 1        |
| Şekil 2.1. Sac Kesme İşlemi .....                                                         | 5        |
| Şekil 2.2. Bükme Prosesinin Şematik Gösterimi .....                                       | 6        |
| Şekil 2.3. Derin Çekme Prosesinin Şematik Gösterimi .....                                 | 6        |
| Şekil 2.4. Preste Form Verme Kalıp Takım Şematiği .....                                   | 7        |
| Şekil 2.5. Karmaşık Geometrilere Sahip Sac Parçalar.....                                  | 8        |
| Şekil 2.6. Sac Metal Şekillendirmede Karşılaşılan Hatalar .....                           | 9        |
| Şekil 2.7. Sac Metal Şekillendirmede Karşılaşılan Hatalara Örnekler .....                 | 9        |
| Şekil 2.8. Sac Metal Şekillendirmede Geri Esneme Hatası .....                             | 10       |
| Şekil 2.9. Tipik Bir Şekillendirme Sınır Diyagramı Şematiği .....                         | 11       |
| Şekil 2.10. Şekillendirilmiş Örnek Bir Sacın ŞSD’da İncelenmesi .....                     | 11       |
| Şekil 3.1. Sonlu Elemanlar Modelinde Elemanlar ve Düğüm Noktaları .....                   | 13       |
| Şekil 3.2. İş Akış Şeması .....                                                           | 14       |
| Şekil 3.3. Çeyrek, Yarı ve Tam Model Simetri Durumları .....                              | 15       |
| Şekil 3.4. Geometriyi Temsil Eden Farklı Eleman Boyutları .....                           | 16       |
| Şekil 3.5. İki Yüzeyli Modelin Şematik Gösterimi .....                                    | 18       |
| Şekil 3.6. Ağ Adaptasyonu Şematik Gösterimi .....                                         | 18       |
| Şekil 3.7. Kabuk Eleman İçin .....                                                        | 20       |
| Şekil 4.1. Kare Kutu Çekme Kalıp Takımı.....                                              | 23       |
| Şekil 4.2. Kare Kutu Çekme Kalıp Takımı Ölçüleri.....                                     | 23       |
| Şekil 4.3. Deneysel Şekillendirme Kuvveti - Kalıp Stroğu Eğrisi.....                      | 24       |
| Şekil 4.4. Simetri Durumuna Göre Kuvvet - Kalıp Strok Eğrilerinin Karşılaştırılması ..... | 25       |
| Şekil 4.5. Simetri Durumuna Göre Simülasyon Sürelerinin Karşılaştırılması .....           | 26       |
| Şekil 4.6. Eleman Boyutuna Göre Kuvvet-Strok Eğrilerinin Karşılaştırılması .....          | 26       |
| Şekil 4.7. Eleman Boyutuna Göre Simülasyon Sürelerinin Karşılaştırılması .....            | 27       |
| Şekil 4.8. Kalıp Hızına Göre Kuvvet-Strok Eğrilerinin Karşılaştırılması .....             | 27       |
| Şekil 4.9. Kalıp Hızına Göre Simülasyon Sürelerinin Karşılaştırılması .....               | 28       |
| Şekil 4.10. Malzeme Modeline Göre Kuvvet-Strok Eğrilerinin Karşılaştırılması .....        | 29       |
| Şekil 4.11. Malzeme Modeline Göre Simülasyon Sürelerinin Karşılaştırılması .....          | 29       |
| Şekil 4.12. Ağ Adaptasyonuna Göre Kuvvet-Strok Eğrilerinin Karşılaştırılması .....        | 30       |
| Şekil 4.13. Ağ Adaptasyonuna Göre Simülasyon Sürelerinin Karşılaştırılması .....          | 30       |



|                                                                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 4.14.</b> Eleman Formülasyonuna Göre Kuvvet-Strok Eğrilerinin Karşılaştırılması .....                                | 31 |
| <b>Şekil 4.15.</b> Eleman Formülasyonuna Göre Simülasyon Sürelerinin Karşılaştırılması .....                                  | 31 |
| <b>Şekil 4.16.</b> İntegrasyon Nokta Sayısına Göre Kuvvet-Strok Eğrilerinin Karşılaştırılması .....                           | 32 |
| <b>Şekil 4.17.</b> İntegrasyon Nokta Sayısına Göre Simülasyon Sürelerinin Karşılaştırılması .....                             | 32 |
| <b>Şekil 4.18.</b> Zaman Adım Aralığı Ölçeğine İçin Kuvvet-Strok Eğrilerinin karşılaştırılması....                            | 33 |
| <b>Şekil 4.19.</b> Zaman Adım Aralığı Ölçeğine Göre Simülasyon Sürelerinin Karşılaştırılması ..                               | 33 |
| <b>Şekil 4.20.</b> Bilgisayar Çekirdek Sayısına Göre Simülasyon Sürelerinin Karşılaştırılması.....                            | 34 |
| <b>Şekil 5.1.</b> Başlangıç Simülasyonu ve Minimize Edilmiş Durumların Simülasyon Süresi<br>Açısından Değerlendirilmesi ..... | 37 |



## TABLÖLAR LİSTESİ

### Sayfa No

|                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tablo 4.1.</b> Kullanılan Sonlu Elemanlar Hesaplama Parametreleri ..... | 24 |
| <b>Tablo 4.2.</b> TRIP600 1.4mm Malzemesinin Mekanik Özellikleri .....     | 28 |



## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

|                          |                                                                   |
|--------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| $\sigma$                 | : Gerilme                                                         |
| $\sigma_y$               | : Akma gerilmesi                                                  |
| $\varepsilon_p$          | : Plastik gerinim                                                 |
| $n$                      | : Pekleşme üsteli                                                 |
| $K$                      | : Mukavemet Katsayısı                                             |
| $\Delta t$               | : Zaman adımı büyüklüğü                                           |
| $c$                      | : Ses hızı                                                        |
| $L$                      | : Sonlu elemanlar ağ yapısındaki en küçük elemanın kenar uzunluğu |
| $E$                      | : Elastisite modülü                                               |
| $\nu$                    | : Poisson oranı                                                   |
| $\rho_0$                 | : Malzeme yoğunluğu                                               |
| $m$                      | : Malzemenin kristal kafes yapısı                                 |
| $K_1, K_2$               | : Farklı yöndeki akma gerilmeleri                                 |
| $a, c$                   | : Anizotropi katsayılarına bağlı parametreler                     |
| $\sigma_{11}\sigma_{22}$ | : Asal gerilmeler                                                 |
| $\sigma_{12}$            | : Kayma akma gerilmeleri                                          |
| $F, G, H, N$             | : Anizotropi katsayısına ve akma gerilmelerine bağlı parametreler |
| $O$                      | : Akma yüzeyi merkez noktası                                      |
| $a^*$                    | : Akma yüzeyinin mevcut durumdaki merkezi                         |
| $a$                      | : Sınır yüzey merkezi                                             |
| $\beta$                  | : İki yüzey merkez noktaları arasındaki ilişki                    |
| $Y$                      | : Akma yüzeyi boyutu                                              |
| $R$                      | : İzotropik pekleşme ilişkisi                                     |
| TRIP                     | : Transformation induced plasticity                               |

## 1. GİRİŞ

Katı bir cismin şeklinin, başka bir şekle dönüştürmek amacıyla uygulanan ve işlem sırasında cismin malzemesinde kütle ve bileşim değişikliğine yol açmayan, kalıcı şekil değişikliğinin meydana geldiği üretim yöntemlerine plastik şekil verme yöntemleri denilmektedir (Çapan, 2010).

Metal sanayide ağırlıklı olarak kullanılan plastik şekil verme yöntemleri, genel olarak üretimde kullanılan malzemenin yüzey/hacim oranına göre kütle şekillendirme ve sac metal şekillendirme olarak iki temel türde sınıflandırılmaktadır (Demirkol, 2010:1). Sac metaller hafif olup, ağırlık/mukavemet oranları iyi olduğundan dolayı genelde otomotiv, beyaz eşya ve havacılık gibi endüstrilerde tercih edilirler. Sac metal şekillendirmede, sac malzemeye istenen formda şekil verilmesi için kalıp araçları kullanılarak plastik şekil verme işlemi uygulanır. Kalıp takımlarına preslerde uygulanan basınç, iş parçası üzerine iletilir ve malzeme yüksek gerilim altında kalıbın belirlenen sabit şeklini alarak kalıcı şekilde deformasyona uğrar ve böylece nihai ürün elde edilir (Anıl, 2016).



### Şekil 1.1. Sac Ürünlere Örnekler

**Kaynak:** (Şayan, 2010:1)

Sac metal şekillendirme yöntemleri ile üretilen ürünler endüstrinin birçok alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Çeşitli amaçlar için üretimi gerçekleştirilmiş sac ürün örnekleri Şekil 1.1.'de gösterilmektedir.

Sac metal şekillendirme işlemi, düz bir sac metali yırtılma, buruşma ya da aşırı incelme olmaksızın istenilen nihai bir şekle dönüştürme işlemidir. Sac metallerin şekillendirilebilirliği, sacın şekillendirilmesi sırasında yırtılma, bölgesel boyunlaşma ve buruşma gibi bir hasara uğramadan istenilen şekli alma kabiliyetidir (Marciniak vd, 2002:82). Düşük ağırlıklı ve yüksek

mukavemetli malzemeler olmaları nedeniyle çarpışma ve ağırlıkça kritik parçaların yer aldığı otomotiv sektörü sac metallerin ana endüstrilerinden kabul edilmektedir. Seri üretimin hakim olduğu endüstrilerde üretim hızı oldukça kritik olduğundan üretim öncesi malzeme secimi, kalıp takım yüzeylerinin geliştirilmesi ve proses tasarımı adımlarının da hızlı bir şekilde gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu süreçlerin deneme/yanılma yöntemiyle gerçekleştirilmesi gerek maliyet gerekse de zaman açısından dezavantajlı konumdadır (Wang vd, 2019:459). Bu nedenle proses tasarımı aşamasında günümüzde bilgisayar destekli mühendislik araçları kullanılmaktadır.

Bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler, şirketlerin yönetsel bölümlerinin yanı sıra üretim ve planlama alanlarında da bilgisayarların yaygın olarak kullanılmasına imkân sağlamıştır. Bilgisayar teknolojileri, üretim alanında bilgisayar destekli tasarım ve bilgisayar destekli imalat yazılımlarıyla kullanılmalarının yanı sıra işletmelerde üretim planlama gibi diğer alanlarda da aktif olarak kullanılmasıyla işletmelere kolaylıklar sağlamıştır. Bilgisayarlar ve üretimin birbirinden ayrı düşünölemeyeceğı gerçeğı, zamanla yeni terminolojilerin ve üretim sistemlerinin doğmasına sebep olmuştur (Rehg vd, 2008).

Yazılım teknolojisinin gelişmesiyle mühendislik hesaplamaları ve sayısal analizler daha hızlı ve etkin olarak uygulanabilmektedir. Bilgisayar destekli üretim sistemlerinin yaygınlaşması işletmelerin rekabet ortamında bir adım daha ileri gidebilmelerini sağlamaktadır. Ar-Ge çalışmalarında yapılan simölasyonlar ve sayısal analizler sayesinde, üzerinde çalışılan konu ile ilgili daha kısa sürede doğru yönde ilerleme sağlanabilmektedir. Ürünlerin kullanım ömürleri boyunca belirtilen koşullarda fonksiyonlarını yerine getirebilmeleri ve güvenilirlik düzeylerinin yüksek olması tüketiciler tarafından tercih edilen bir durum oluşturmaktadır (İlhan, 2018).

Yukarıda anlatılanlar ışığında sac metal şekillendirme işleminde bahsedilen problemlerin giderilmesi noktasında en sık uygulanan yöntem bilgisayar ortamında yapılan benzetimlerdir. Günümüzde üretim sürecinde nümerik yöntemlerin başında Sonlu Elemanlar (SE) gelmektedir.

Sonlu elemanlar analizi metodu, günümüzde karmaşık mühendislik problemlerinin hassas bir biçimde çözümlenmesinde etkili olarak kullanılan sayısal bir yöntemdir. Sonlu elemanlar analizi karmaşık formları basite indirgeyerek bir çözüm sunmaktadır. Gerçek ve karmaşık problemin daha basit bir probleme indirgenmiş olması sebebiyle tam sonuç yerine yaklaşık bir sonuca ulaşılmakta, ancak bu sonucun çözüm için çok fazla çaba sarf ederek

iyileştirilmesi ve tam sonuca çok yakın değerler elde edilmesi, hatta kesin sonucun tahmin edilmesi mümkün olmaktadır (Arıkan, 1999).

Sac metal şekillendirme işlemi gerçekleştirilmeden önce sonlu elamanlar analizi yazılımlarının kullanılması ile şekillendirme prosesini modelleyerek proses sırasında meydana gelebilecek problemleri tahmin etmek ve önlemler almak mümkündür. Sac şekillendirme işlemi kendi içerisinde çok karmaşık ve çözümlenmesi zor bir takım problemler barındırmaktadır. Örneğin otomotiv sektöründe kullanılan sac parçalar oldukça kompleks geometrilere sahip olduğundan bu parçalara ait form kalıp yüzeyleride karmaşıktır (Esener vd, 2018:80). Bu durum, prosesin başarılı bir şekilde gerçekleştirilmesini de zorlaştırmaktadır. Bu problemlerin giderilip hızlı bir şekilde işleme alınması seri üretim yapan işletmeler açısından oldukça önem arz etmektedir. Yapılan sonlu elemanlar analizleri ile üretiminde yapılacak olan deneme yanılma sayısı azaltılarak maliyet ve zamandan kazanç sağlanabilmektedir.

Bir sonlu elemanlar analizinin en önemli çıktısı tahmin hassasiyetidir. Tahmin hassasiyeti sonlu elemanlar sonucunda elde edilen sonuçların gerçek deneysel parçaya ne kadar yakınsadığının temsil durumudur. Bu nedenle sonlu elemanlar analizlerindeki proses koşulları gerçek koşullarla aynı tutularak simülasyonlar gerçekleştirilmektedir. Bu durumda tahmin hassasiyetine etki eden parametreler prostesten bağımsız durumda olan ve modelleme adımlarını oluşturan sonlu elemanlar hesaplama parametreleridir (Dahale vd, 2018:13291). Modelleme adımında hesaplama adımlarını oluşturan hesaplama parametreleri sınır koşulları, geometriyi temsil eden eleman bilgileri ve malzemenin plastik davranışını modelleyen plastisite modelleri olarak tanımlanabilmektedir. İlgili parametrelerin belirlenme şekli ve seçilme nedenleri simülasyon hassasiyetine doğrudan etki etmektedir. He vd. (2019), Chen vd. (2019) ve Macneal vd. (1985), simülasyon hassasiyeti üzerine yaptıkları çalışmalar göz önüne alındığında hesaplama parametrelerinin tahmin hassasiyetine etkisi açıkça görülmektedir. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde (Chun vd, 2002), (Habraken, 2004), (Xue vd, 2008) genellikle eleman boyutunun ve plastisite modellerinin etkileri üzerine yoğunlaşmıştır.

Simülasyon hassasiyetinin yanı sıra özellikle seri imalat endüstrisi açısından simülasyon çözüm süresi bir diğer kritik parametredir. Bilindiği üzere sac metal şekillendirme simülasyonları yüksek non-lineerlik barındırdığından modelleme ve çözüm aşamaları da karmaşık adımlar içermektedir. Karmaşık geometrilere gerçekleştirilen sac metal şekillendirme simülasyonları karmaşıklık derecesine bağlı olarak çokça zaman alıp hatta günler sürebilmektedir (Godest vd, 2002:274). Seri üretim açısından bu tarz simülasyonlar zaman açısından ciddi kayıplara yol açabilmektedir. Endüstride ise simülasyonlar genellikle

tecrübelere dayalı oluşturulmuş talimatlar ile gerçekleştirilmektedir. Literatürde ise simülasyon süresi açısından yapılmış çalışmalar oldukça kısıtlıdır (Swisher vd, 2000:120). Sonlu elemanlar analizlerinde verimin yükseltilebilmesi için hassasiyetten ödün vermeden minimum sürede çözümün tamamlanması gerekmektedir. Bu kapsamda hesaplama parametrelerinin iyi analiz edilip hassasiyete ve simülasyon süresine etkilerinin tespit edilmesi önem arz etmektedir.

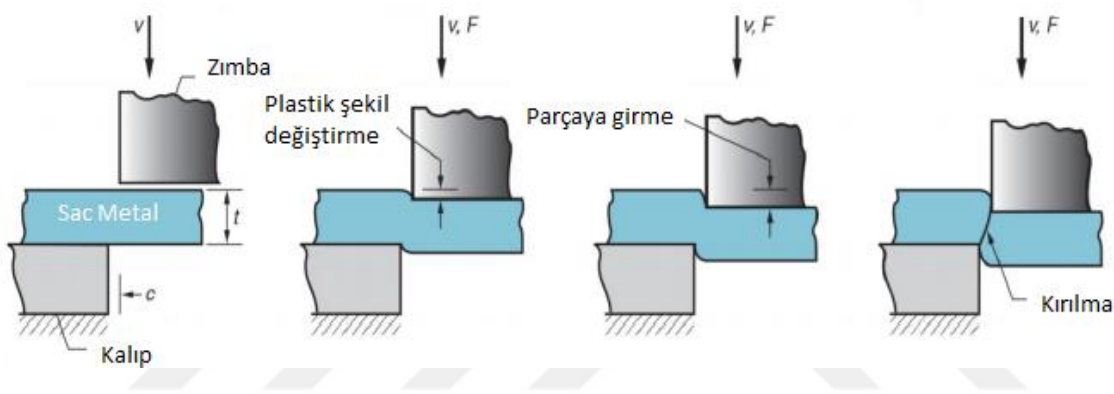
### **1.1. Tezin Amacı**

Bu tez çalışması kapsamında, sonlu elemanlar analizlerinde hesaplama parametrelerinin sonlu elemanlar hesaplama süresine ve hassasiyetine etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda non-lineer sonlu elemanlar analizlerinden sac metal şekillendirme prosesi çalışılmıştır. Sac metal şekillendirme proseslerinde şekillendirilebilirlik parametreleri hassasiyet açısından incelenmiştir. Hesaplama parametrelerinden ise integrasyon nokta sayısı, eleman boyutu, simetri koşulları, ağ adaptasyonu derecesi ve eleman formülasyonu incelenmiş, tezin çıktısı olarak hassasiyetten ödün vermeden simülasyon süresini minimize eden parametreler belirlenmiş ve önemli ölçüde zamandan kazanç sağlanmıştır.

## 2. SAC METAL ŞEKİLLENDİRME

Sac metaller ince malzemeler olup ağırlık/dayanım oranları oldukça iyidir. İnce malzemelerin (0,4-6 mm) kalıp takımları vasıtası ile plastik şekil değiştirme mantığı çerçevesinde form değiştirme işlemleri sac metal şekillendirme olarak isimlendirilmektedir. Yüksek boyutsal doğruluğa sahiptirler. Özellikle hafifliğin istendiği ve yüksek dayanımın beklendiği otomotiv endüstrisi gibi bir endüstrinin ana ürün gamını oluşturmaktadır.

Sac metaller temelde üç operasyonla form alırlar; kesme bükme ve çekme. Kalıp içerisindeki alt ve üst kısımda karşılıklı bulunan zımba takımları arasında sıkışan sac malzeme, kesme boşluğu arasında makaslama etkisi ile basınç altında Şekil 2.1.'de görüldüğü gibi kesme işlemine tabi olurlar (Groover vd, 2010).



**Şekil 2.1. Sac Kesme İşlemi**  
**Kaynak:** (Demirkol, 2010:8-3)

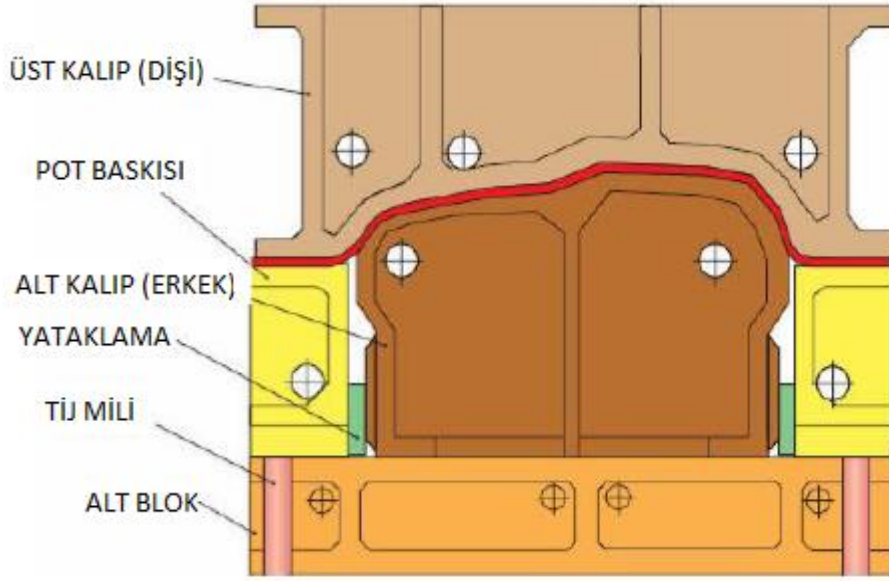
Kesme kalıplarındaki işlemlerde dikkate alınması gereken parametreler; kalıp ve zımba arası boşluk, kesilecek sac malzeme kalınlığı, kesilecek sac malzeme cinsi, mukavemeti ve kesme uzunluğudur. Kesme boşluğu; zımba ile kalıp arasındaki kesim kenarının arasında kalan boşluk mesafesidir. Kesme boşluğu yeterince verilmez ise çift kıvrılma oluşur kesme hatları iç içe geçebilir. Fazla olması durumunda ise kesme işlemi sırasında malzeme bükülerek uzar ve çapak oluşumu gözlenir (Marciniak vd, 2002).

Sac malzemeye tarafsız eksen etrafında eğilme prosesi uygulanarak şekil verilmesine bükme denir. Tarafsız eksen altında kalan bölge basmaya zorlanırken üst kısımda kalan bölgede çekilme meydana gelir. Bükme eksenini üstündeki dış kısımda plastik akma oluşur ve malzeme incelmektedir. Sac malzemeye şekil verme sırasında malzemenin et kalınlığı, büküm açısı ve büküm yarıçapı değeri gibi parametreler bükme prosesinde etkilidir (Groover vd, 2010).





belirlenen sabit şeklini alarak kalıcı şekil değişimine uğrar. Örnek bir pres form kalıp araçlarına ait şematik gösterim Şekil 2.4.'de verilmiştir.



**Şekil 2.4.** Presto Form Verme Kalıp Takım Şematiği

**Kaynak:** (Schuller, 1998:143)

Üst kalıp, presin hareketine devam etmesi ve erkek kalıp yardımıyla üst kalıp içerisine akması ile sacın son şeklini almasını sağlar. Ayrıca şekillendirme başlamadan baskı plakası ile sacı sıkıştırarak, sacın şekil alması esnasının oluşabilecek kırışıkları engellemektedir. Erkek kalıp (zımba) sacın üst kalıp içerisine akışını sağlayarak saca şeklini verir. Baskı plakası (pot baskısı), dişi kalıp ile şekillendirme öncesi sacı sıkıştırarak sacı tutar. Pres hareketine devam etmesiyle sacın dişi kalıp içerisine uygun hızda akmasına yardımcı olmaktadır. Tij milleri ise baskı plakası ile pres alt tablası arasında bağlantı görevi görür. Sacı tutmak için gerekli basıncın iletilmesini sağlamaktadır. Ayrıca, kalıp tasarımı ve pres tipine göre tij milleri yerine gazlı yaylar da kullanılmaktadır. Baskı plakası ile kalıbın alt plakası arasında çalışarak sacı gerdirilmesi için gerekli basıncı sağlar (Onur, 2013).

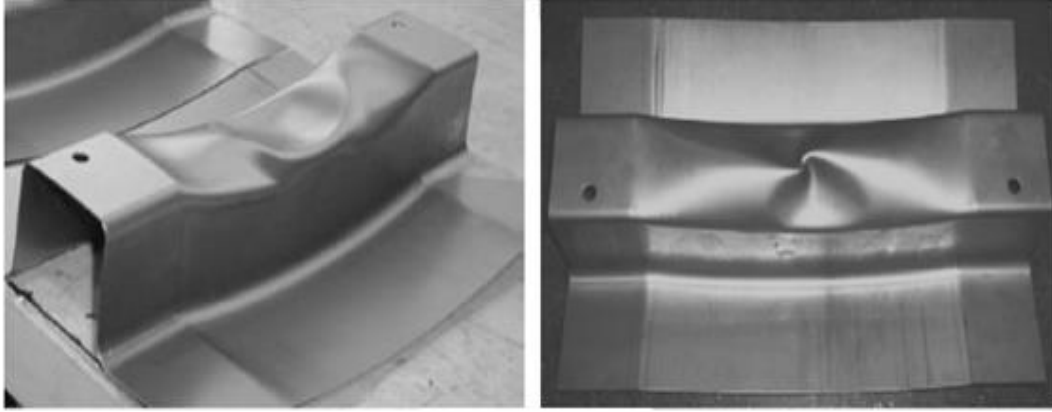
İş parçası ve kalıp ara yüzeyindeki sürtünme koşullarının metal akışı, iş parçasının yüzeyinde ve içerisinde kusur oluşumu, kalıplara etkiyen gerilmeler, şekil değişimi için gerekli olan kuvvet ve iş değeri üzerindeki rolü büyüktür. Yağlama, şekillendirme işlemi sırasında iş parçası ile kalıp yüzeyleri arasında meydana gelecek olan bu sürtünmeyi azaltarak sacın kalıp içinde akışını kolaylaştırmaktadır. Temas yüzeylerinde sürtünme katsayısını azaltarak şekillendirme için gerekli kuvveti ve kalıp aşınmalarını azaltarak kalıp ömrünü uzatmaktadır (Gürün, 2008).

[illegible]

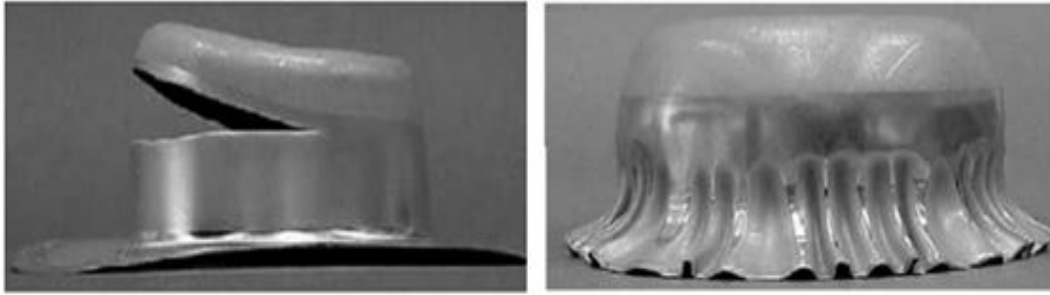
Şekillendirme işlemi sırasında kalıp radyüsleri ve süzdürme çubuklarının sacın dışı kalıp içerisine akışını önemli ölçüde etki etmektedir. Ürün geometrisine göre kalıpta belli bölgelerde sacın akışının yavaşlatılması için süzdürme bölgeleri kullanılmaktadır. Sac malzeme kalıp radyüslerden geçişi sırasında plastik deformasyona uğrayarak istenilen form içerisine akmaktadır. Radyüs miktarının gereğinden fazla verildiği durumlarda sacın hareketi sırasında rahat bir davranış sergileyerek buruşma ve üründe ölçüsel şekil bozuklukları meydana gelebilecektir. Radyüs miktarının az verilmesi durumlarda ise sacın akışı ve kuvvetin yayılımı zorlaşacaktır. Bu da sacda bölgesel incelmeler ve yırtılmalara neden olabilecektir (Simith,1990).

Kalıplarda baskı plakası basıncı genellikle pres tablasına bağlı tij milleri ya da kalıp içerisindeki gazlı yaylar ile sağlanmaktadır. Form verme işleminde dişi kalıp içerisine uygun bir akış sağlamak için şekillendirme başlamadan önce sacın yeterli miktarda gerdirilmesi gerekmektedir. Basıncın yetersiz kaldığı durumlarda sac metal malzemede kırışıklıklar (Şekil 2.6) meydana gelebilecek ya da istenilen ürün geometrisi tam olarak elde edilemeyecektir. Baskı plakası basıncının gereğinden fazla verilmesi de şekillendirme öncesi sac malzemede

gerginliği arttırarak sacın pres hızına göre akmasını engelleyerek sacda incelme ve yırtılmalara neden olacaktır (Koç, 2008).



a) Şekil Bozukluğu



b) Yırtılma

c) Buruşma

**Şekil 2.6.** Sac Metal Şekillendirmede Karşılaşılan Hatalar

**Kaynak:** (Neto vd, 2017: 246)

Ayrıca kalıbın çalışması esnasında dişi kalıp ile zımba arasında sacın uygun Şekilde akabilmesi için sac kalınlığı da dikkate alınarak belirli bir miktar boşluk bırakılmalıdır. Boşluk miktarı fazla bırakıldığında sacın akış kontrolü zorlaŐacak buruşma ve istenilen geometrinin elde edilememesine, az bırakılması da sac kalınlığında incelme ve yırtılmalara (Şekil 2.7.) neden olacaktır (AtaŐimŐek, 1971).



a) Yırtılma

b) Buruşma

**Şekil 2.7.** Sac Metal Şekillendirmede Karşılaşılan Hatalara  rnekler

**Kaynak:** (T rk z, 2009:2)

Şekil bozukluğunun birden fazla sebebi bulunmakla birlikte başka bir hata durumunda geri esneme, kalıp araçlarının formlama prosesi sonrasında malzeme üzerinden kaldırılması sonucunda parça geometrisinde şekil bozukluğuna neden olmaktadır. Formlama sürecinde, sönmüş elastik enerjinin açığa çıkmasıyla oluşan gerinimler, geometride boyutsal değişikliklere yol açmaktadır. Tam şekillendirme durumunda parça üzerinde hem temas kuvvetleri hem de iç gerilmeler mevcuttur. Kalıbın parça üzerinden kalkması ile temas kuvvetleri ortadan kalkar, parça üzerinde yeni bir iç gerilme dağılımı oluşur ve geri esneme (Şekil 2.8.) meydana gelir (Esener, 2015).



**Şekil 2.8.** Sac Metal Şekillendirmede Geri Esneme Hatası

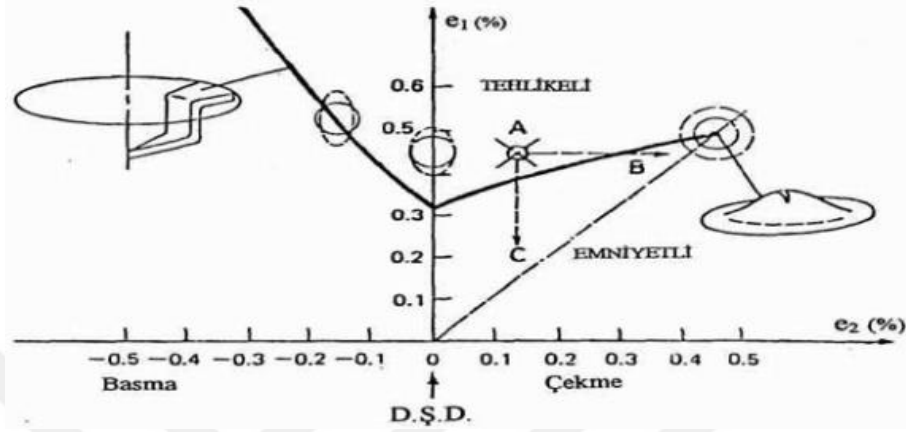
**Kaynak:** (Hsu vd, 2002:362)

Bu tarz hataların seri üretimde tasarım aşamasında önlenmesi kritiktir. Bir parçanın yukarıda bahsedilen hatalar olmaksızın şekil alabilme kabiliyetine şekillendirilebilirlik denilmektedir. Şekillendirilebilirlik, malzemenin elastisite modülü, elektrik iletkenliği ve yoğunluk gibi ayırt edici özelliklerinden biri değildir. Bunun nedeni şekillendirilebilirliğin kalıp geometrisi, yüzeyde kullanılan yağlayıcı, form işleminin yapılma yöntemi, malzeme kalınlığına bağlı olmasıdır. Kalıp ve otomotiv sektöründe olmak üzere birçok yerde farklı malzemeler, farklı kalınlıklar ve farklı geometriler kullanılarak, şekillendirilebilirliğin tespiti için çalışmalar yapılmaktadır (Wu vd. 2008), (Wang vd, 2007).

Sac malzemelerin şekillendirilebilirliğini değerlendirmek için birçok teknik kullanılmaktadır. İlk olarak 1963 yılında Keeler ve Backofen tarafından ortaya atılan Şekillendirme Sınır Diyagramları günümüzde oldukça yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Şekillendirme sınır diyagramları (ŞSD) sadece üretim esnasında karşılaşılan sorunların çözümünde değil, ayrıca kalıp tasarımında ve malzemedeki optimum yararlanma konusunda başvurulması gerekli olan bir kaynak niteliği taşımaktadırlar (Ertürk, 1979). Şekillendirme sınır diyagramları sac malzemenin üretim esnasında karşılaşılabileceği bütün deformasyonları ihtiva



etmektedir. Diyagramın sol tarafı tek eksenli çekmeden, düzlem birim şekil değişimine kadar olan bölgeyi gösterirken, sağ tarafı ise düzlem birim şekil değişiminden iki eksenli gerilme halini göstermektedir. Diyagramın üstünde kalan deformasyon değeri hasarı gösterirken, altta kalan deformasyon ise güvenli bölgeyi göstermektedir (Alper, 2003). Şekillendirme sınır diyagramı şematığı Şekil 2.9.'da gösterilmektedir.

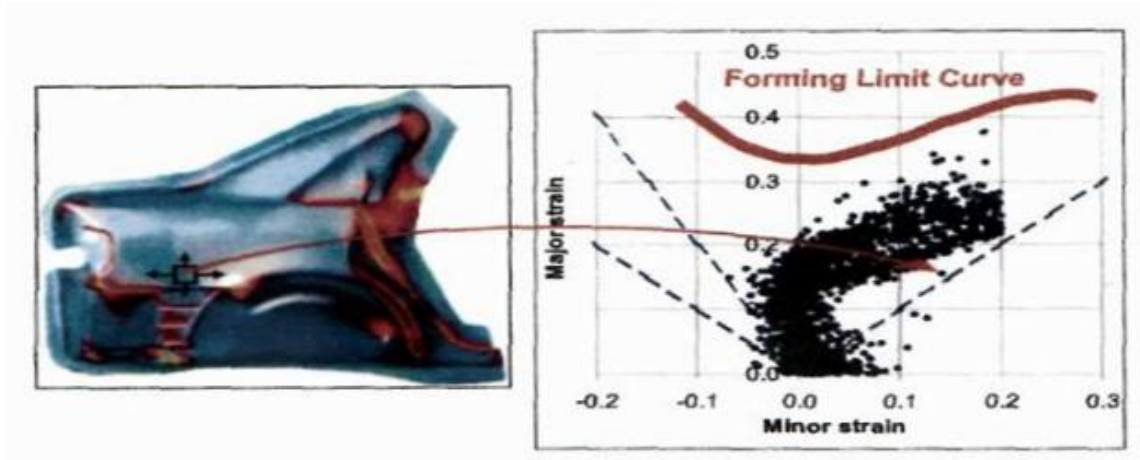


**Şekil 2.9.** Tipik Bir Şekillendirme Sınır Diyagramı Şematığı

**Kaynak:** (Şener, 2015:16)

Bu diyagramlar sayesinde, üretilecek olan parçaların kalıp takımları hazırlanırken yapılan ön simülasyonlarda sacın ilgili şekli alıp, alamayacağı veya karşılaşılabilecek sac şekillendirme hatalarına önceden yanıt verilebilmektedir.

Örnek olarak Şekil 2.10. 'da bir kapı sacı ele alındığında simülasyon işlemi gerçekleştirildikten sonra, şekillendirilmiş sacın her noktasında meydana gelen deformasyonlar, diyagrama göre kontrol edilerek, gerekli değişiklikler tasarım esnasında yapılmaktadır.



**Şekil 2.10.** Şekillendirilmiş Örnek Bir Sacın ŞSD'da İncelenmesi

**Kaynak:** (Şener, 2015:17)

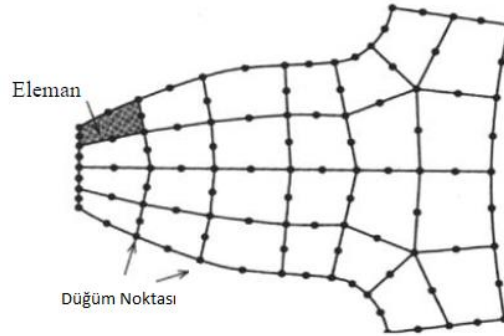
Özet olarak sac metal şekillendirme yöntemleri karmaşık yöntemler olup içerisinde birçok hata barındırmakla birlikte özellikle otomotiv endüstrisi açısında vazgeçilemeyen bir yöntem olduğundan dolayı bu yöntem üzerindeki problemlere karşı iyileştirilmelerin yapılması gerekmektedir. Deneme yanılma yöntemleri çok pahalı olduğundan yapılacak olan iyileştirmelerin tasarım aşamasında gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Tasarım aşamasında da genellikle sonlu elemanlar analizleri ile bu işlemler yürütülmektedir.



### 3. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Modern sonlu elemanlar metodunun kaynağı 1900’lü yıllara kadar uzanır, bazı araştırmacıların farklı eşitliklerdeki elastik çubukları modellemesiyle başlar. Tarihsel olarak sonlu elemanlar metodu hakkında ilk kitap Courant tarafından 1943’te yayımlanmış ve Courant bu metodu geliştiren kişi unvanını almıştır. 1960’lara varmadan Clough isimli araştırmacı “Sonlu Elemanlar” terimini popüler hale getirmiştir (Özdemir, 2013:9). 1960’lı yıllarda araştırmacılar akışkanlar mekaniği, ısı transferi gibi mühendislik alanlarında sonlu elemanlar metodu kullanmaya başlamıştır. Sonlu elemanlar analizleri sac metal formlama proseslerinde 1970’li yıllarda kullanılmaya başlanılmıştır (Banabic, 2010). Büyük deformasyona sahip bir problemin sonlu elemanlarla çözümü ilk kez Hibbit ve diğerleri (Belytschko vd, 2000) tarafından sunulmuştur. İlk üç boyutlu sac metal formlama analizi ise 1978 yılında Wand ve Budionsky tarafından önerilmiştir. Günümüzde yazılım ve bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle paralel olarak sonlu elemanlar yöntemi kendisini her geçen gün geliştirmeye devam etmektedir. Sonlu elemanlar yönteminin temel prensibi çözümü zor ve yapı itibarıyla karmaşık olan parçaları basit elemanlara bölerek her bir elemana ait problemi kendi içinde çözüme kavuşturarak tam çözüme ulaşılmasıdır.

Yapılan sonlu elemanlar analizinde CAD ortamından alınan geometrilere uygulanan ilk işlem genelde ağ yapısının oluşturulmasıdır. Bir sonlu elemanlar ağ yapısı, eleman ve düğüm noktalarından meydana gelmektedir. Burada, eleman geometriyi temsil eden sonlu parçacıkları, düğüm noktası ise bu parçacıkların köşe noktalarını temsil etmektedir (Şekil 3.1.). Sonlu elemanlar analizlerinde kullanılabilecek eleman tipleri genellikle 1-Boyutlu kiriş elemanlar, 2-Boyutlu kabuk ya da membran elemanlar ve 3-Boyutlu kübik elemanlardır. Sac metal şekillendirme prosesleri bir düzlem gerilme problemi olduğundan ve kalıp takımlarının yalnızca form verme yüzeylerinin kritik olmasından ötürü geometriler yüzey olarak modellenir. Bu nedenle sac metal şekillendirme işlemlerinde eleman tipi olarak çoğunlukla kabuk eleman kullanılmaktadır (Wang vd, 2004).

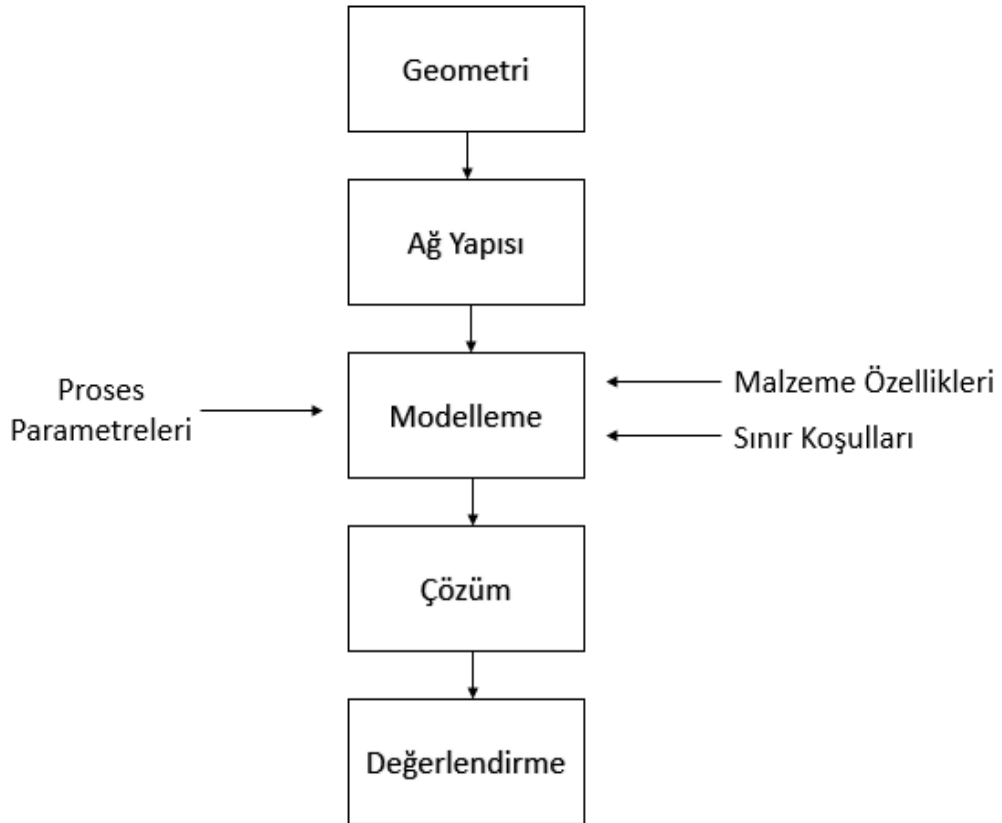


**Şekil 3.1.** Sonlu Elemanlar Modelinde Elemanlar ve Düğüm Noktaları

**Kaynak:** (Özdemir, 2009:4)



Sonlu elemanlar analizlerinin karmaşıklığını belirleyen durumlar deformasyon miktarının büyüklüğü ve temas durumunun olup olmamasıdır. Sac metal şekillendirme yöntemlerinde hem büyük deformasyon miktarları hem de temas olduğundan dolayı bunlar karmaşık non-lineer sonlu elemanlar analizleridir. Bu kapsamda içerisinde birçok parametre barındırmaktadırlar. Bu parametreler, prosesi tanımlayan parametreler ve hesaplama parametreleri olmak üzere iki ana başlıkta değerlendirilebilir. Prosesi tanımlayan parametreler genellikle şekillendirmenin hızı, şekillendirmede kullanılan kalıp araçlarının geometrisi, sürtünme koşulları, parça tutucu kuvvet vb. hepsi proses parametreleridir ve bu parametrelerin değerini yani şiddetini belirleyen durum prostestir. Fakat hesaplama parametreleri sonlu elemanlar analizinin modelleme ve çözüm aşamalarında kullanılan parametrelerdir. Genellikle kullanılan yönteme ve yazılıma bağlı olmak üzere değişkenlik gösterir. Fakat bu değişim simülasyonun hassasiyetini etkilemektedir. Simülasyonlarda öncelik doğru tahmin olduğundan dolayı hassasiyetten ödün vermemek adına uygun parametrelerde çalışılması oldukça kritiktir. Bu parametreler hassasiyetin yanında simülasyon süresinde etki etmektedir. Hassasiyete olumsuz yönde etki yapmayan parametrelerden simülasyonu en kısa sürede çözüme kavuşturan parametrelerin tercih edilmesi tasarım aşamasında beklenen zaman kazancını sağlamaktadır. Genel bir sonlu elemanlar analizine ait iş akış şeması Şekil 3.2. de görülmektedir.



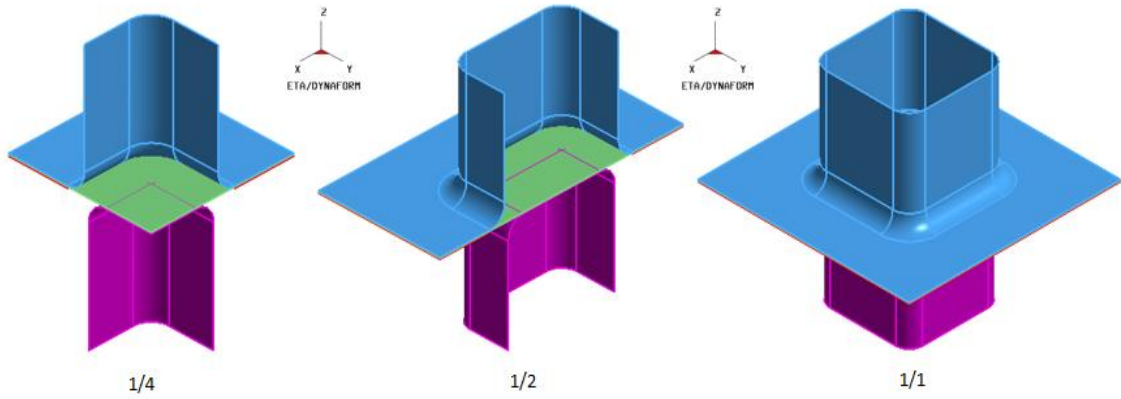
Şekil 3.2. İş Akış Şeması

### 3.1 Hesaplama Parametreleri

Sonlu elemanlar hesaplama parametreleri çözüm aşamasında ve modelleme aşamasında prosesten bağımsız hesaplama temelli parametrelerdir.

#### 3.1.1 Simetri Durumu

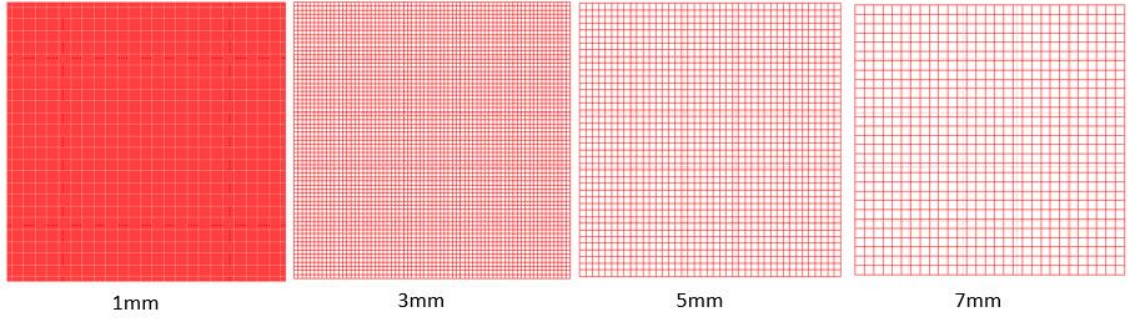
Sonlu elemanlar analizlerinin çözüm süresini kısaltmak adına geometrisinde simetri bulunan kalıp takımları yarı model ya da çeyrek model olarak tasarlanabilirler. Bunun için simetri sınır koşullarının tanımlanması gerekmektedir. Simetrinin sağlandığı eksen üzerindeki düğüm noktalarının uzaydaki serbestlik derecelerinin kısıtlanması ile simetri davranışı modellenebilmektedir.



Şekil 3.3. Çeyrek, Yarı ve Tam Model Simetri Durumları

#### 3.1.2 Eleman Boyutu

Simülasyonlarda geometrileri temsil eden elemanların bir diğer önemli özelliği ise eleman boyutudur. Sistemi temsil eden eleman sayısının artması çözülecek diferansiyel denklem sayısını arttırdığından bu durumun paralelinde çözüm süresini de arttırmaktadır. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde eleman boyutunun küçülmesi çözüm hassasiyeti açısından genellikle olumlu bir etki meydana getirmektedir (Parthasarathy vd, 1991), (Crawford, vd, 2003). Özellikle geometrilerin eğrisel bölgelerinin temsili açısından bu bölgelerde eleman boyutunun düzlemsel bölgelere göre daha küçük seçilmesi gerekmektedir.



**Şekil 3.4.** Geometriyi Temsil Eden Farklı Eleman Boyutları

### 3.1.3 Kalıp Hızı

Çözüm süresine etki eden bir diğer parametre de deformasyon hızıdır. Bu kapsamda şekillendirme sırasında kalıp hızının etkisi hem simülasyon süresine hem de simülasyon tahmin hassasiyetine doğrudan etki etmektedir.

### 3.1.4 Malzeme Modeli

Hesaplama parametreleri açısından malzemenin plastik davranışını modelleyen plastisite modelleri hesaplama adımıda hassasiyete doğrudan etki eden bir parametredir. Bunun paralelinde her bir plastisite modelinin çözüm adımları farklı olduğundan çözüm süresi de etkilenmektedir. Plastisite modelleri genellikle yaptıkları kabullere göre gruplandırılırlar. Bu gruplar, izotropik malzeme-izotropik pekleşme, anizotropik malzeme-izotropik pekleşme ve anizotropik malzeme-kinematik pekleşme olarak isimlendirilmektedir. Tez çalışması kapsamında izotropik malzeme-izotropik pekleşme grubundan Holloman (Holloman, 1945, 268-290) denklemi temelli Power law plastisite modeli, anizotropik malzeme-izotropik pekleşme grubundan Hill-48 (Hill, 1948) ve Barlat-89 (Barlat vd, 1989) plastisite modelleri ve anizotropik malzeme-kinematik pekleşme grubundan Yoshida-Uemori (Yoshida vd, 2002) plastisite modelleri kullanılmıştır. Bu açıdan plastisite modelleri değerlendirildiğinde;

Power law plastisite modeli için Holloman ifadesinde gerilme ve plastik gerinim arasındaki ilişki Denklem (3.1.)'teki şekilde yazılabilir.

$$\sigma = K \cdot \varepsilon_p^n \quad (3.1)$$

Burada K, mukavemet katsayısını ve n, pekleşme üstelini temsil etmektedir. Bu modellerden farklı olarak malzeme davranışını anizotropik olarak kabul eden, izotropik pekleşme temelli ve en sık kullanılan malzeme modelleri Barlat-89 ve Hill-48 modelleridir. Barlat-89 modeli akma yüzeyi malzemenin anizotropik parametrelerine bağlı olarak elde etmektedir. Düzlem gerilme problemleri için model şu şekilde yazılabilir.

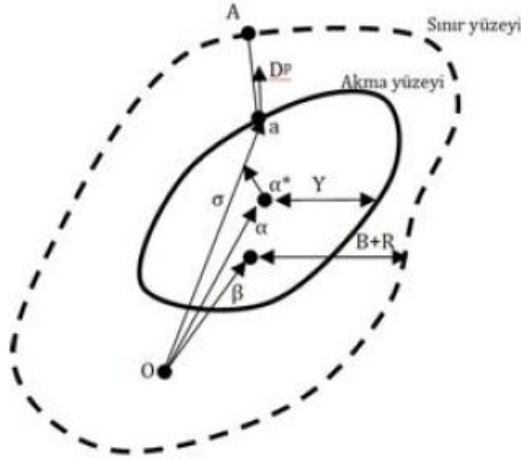
$$2\sigma_y^m = a|K_1 + K_2|^m + a|K_1 - K_2|^m + c|K_2|^m \quad (3.2)$$

Burada  $\sigma_y$  akma gerilmesi olup  $K_1$  ve  $K_2$  farklı yönlerdeki akma gerilmelerine,  $a$  ve  $c$  ise anizotropi katsayılarına bağlı parametrelerdir. Yine bu denklemden yer alan  $m$  üsteli ise malzemenin kristal kafes yapısı ile ilişkili olup yüzey merkezli kübik malzemeler için 8, hacim merkezli kübik malzemeler için ise 6 olarak kullanılması tavsiye edilmektedir (Barlat vd, 1989). Barlat dışında malzemeyi anizotropik olarak kabul eden ve günümüzde hala en sık kullanılan plastisite modeli Hill-48'dir. Bu model, düzlem gerilme için şu şekilde yazılabilmektedir.

$$f(\sigma_{ij}) = (G + H)\sigma_{11}^2 - 2H\sigma_{11}\sigma_{22} + (H + F)\sigma_{22}^2 + 2N\sigma_{12}^2 = 1 \quad (3.3)$$

Burada  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$  asal gerilmeleri ve  $\sigma_{12}$  ise kayma akma gerilmeleridir.  $F$ ,  $G$ ,  $H$  ve  $N$  sabitleri ise malzemenin anizotropi katsayılarına ve/veya akma gerilmelerine bağlı parametrelerdir.

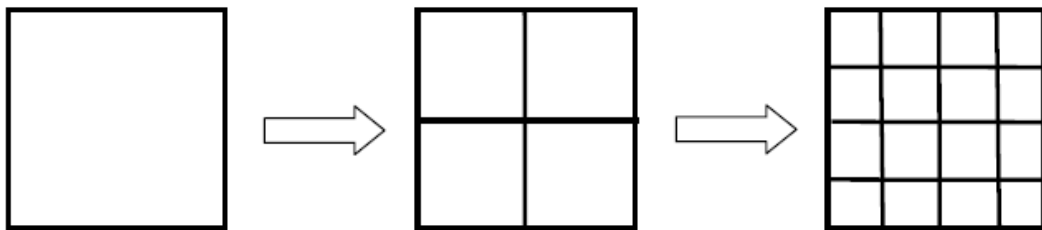
Çalışmada incelenilen üçüncü grup plastisite modeli olarak ise kinematik pekleşme kabulü yapan modellerden günümüzde en sık kullanılan Yoshida-Uemori (Yoshida vd, 2002) kinematik pekleşme modeli tercih edilmiştir. Pekleşmeyi temsil edebilmek adına bu model, akma yüzeyi ve sınır yüzey olmak üzere iki yüzeye ihtiyaç duymaktadır. Şekillendirme prosesinde, akma yüzeyi boyut olarak değişmez fakat deformasyonla akma yüzeyinin merkez noktası hareket eder, sınır yüzeyi ise hem şekil olarak hem de konum olarak değişir. Şekil 3.5.'te iki yüzeyli kinematik modelin şematik gösterimi görülmektedir. Burada, "O" akma yüzeyinin merkez noktasıdır,  $a^*$  akma yüzeyinin mevcut durumdaki merkezidir ve  $a$  ise sınır yüzeyinin merkezidir.  $\beta$ , iki yüzey merkez noktaları arasındaki ilişkiyi temsil etmektedir.  $Y$ , akma yüzeyinin boyutudur ve deformasyon süresince değişmemektedir.  $B+R$ , sınır yüzeyinin boyutunu temsil etmektedir,  $R$  izotropik pekleşme ile ilişkilidir. Yoshida nonlinear pekleşme modeli Bauschinger etkisini ve sac metal şekillendirme proseslerindeki malzeme davranışını tanımlamakta başarılı bir modeldir. Yeni nesil yüksek mukavemetli çelikler için de başarılı sonuçlar verebilmektedir. Şekil 3.5.'te Yoshida kinematik pekleşme modeli ile tahmin edilen bir malzeme davranışı gerilme-gerinim eğrisi üzerinde gösterilmiştir.



**Şekil 3.5.** İki Yüzeyle Modelin Şematik Gösterimi  
**Kaynak:** (Yoshida vd, 2002:669)

### 3.1.5 Adaptiv Ağ Yapısı Derecesi

Sonlu elemanlar analizlerinde eleman boyutu etkisinin bir diğer değerlendirme şekli ise ağ adaptasyonudur. Bu durum adaptivite olarak değerlendirilir ve sonlu elemanlar hesaplama parametresi olarak adaptivite derecesi kullanılır. Ağ adaptasyonunda temel mantık, özellikle eğilme deformasyonuna uğrayan bölgelerde (radyüs, süzdürme çubuğu vb.) çözüm sırasında başlangıç ağ yapısının küçültülerek daha hassas sonuçların alınmasıdır. Bu kapsamda örneğin bir dörtgen eleman birinci adaptasyon seviyesinde dörde bölünür ve her seviyede bu durum kendi içinde bölünmelerle devam eder. Çözüm sonrasında başlangıç ağ yapısının ağ adaptasyonu sonrasında değiştiği gözlemlenmektedir. Ağ adaptasyonunun şematik gösterimi Şekil 3.6. görülmektedir.



**Şekil 3.6.** Ağ Adaptasyonu Şematik Gösterimi

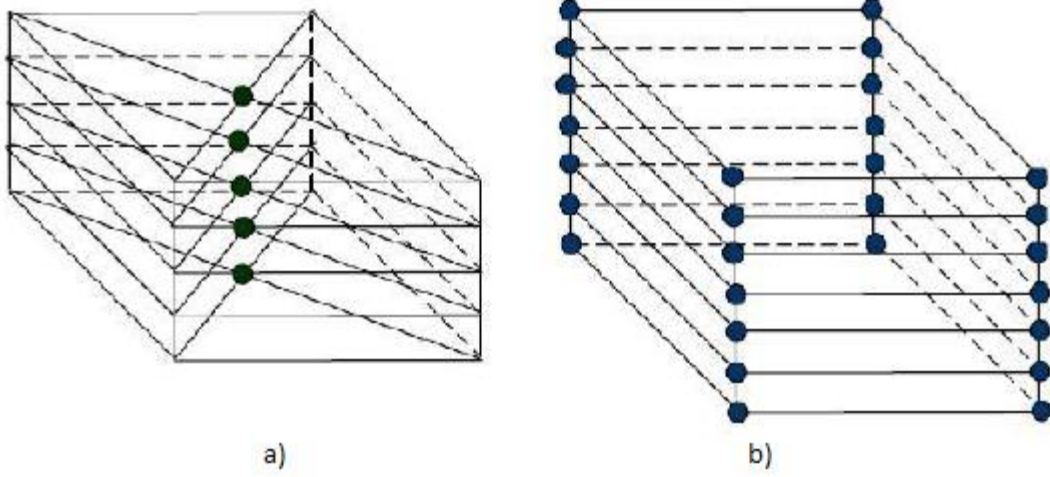
### 3.1.6 Eleman Formülasyonu

Eleman açısından bir diğer önemli özellik ise elemanın çözüm şeklini belirleyen eleman formülasyonudur. Kabuk elemanlar genellikle Hughes-Liu (HL), Belytschko-Tsay (BT) ve Tam integrasyonlu eleman formülasyonları ile modellenmektedirler (Elmarakbi vd, 2009). Bu formülasyonlardan en eskisi 1981 yılında ortaya atılan Hughes-Liu (Hughes vd, 1981)

formülasyonudur. HL kabuk elemanlarda, eleman yapısı rijit hareketlerde gerinim üretmediği için birçok uygulamada sonlu gerinim hesaplaması rahatlıkla yapılabilmektedir. Ayrıca basit yapısından dolayı hesaplanma kolaylığı sağlamaktadır ve sonlu enine kayma gerinimlerini üzerinde barındırmaktadır Bunun yanı sıra kabuk elemanlarda kalınlık yönünde incelme hesabı yapılabilmesine olanak sağlamaktadır. Belytschko-Tsay kabuk eleman formülasyonu ise 1984 yılında ortaya atılmıştır. BT kabuk elemanı, HL kabuk elemanına göre daha avantajlıdır. Bunun nedeni BT kabuk elemanlar HL kabuk elemanlara göre daha az sayıda işleme gereksinim duymaktadır ve dolayısı ile çözüm süresini oldukça kısaltmaktadır ve hesaplama maliyetini düşürmektedir. Örneğin 5 integrasyon noktalı bir kabuk eleman için Hughes-Liu 4050 matematiksel operasyona ihtiyaç duyarken aynı durumda Belytschko-Tsay formülasyonu 725 matematiksel operasyona ihtiyaç duymaktadır (Ls-Dyna Theoretical Manual, 1998). BT kabuk elemanı dönel koordinat sistemi üzerine oturtulmuş hız-gerinim hesaplama metodunu kullanan bir elemandır. Eleman koordinat sistemi kullanılması lineer olmayan hesaplama karmaşasında hesaplama kolaylığı sağlarken hıza bağlı gerinim özelliğinin olması Cauchy gerilmesiyle benzerlikler göstermektedir. Tam integrasyonlu kabuk elemanlar ise, kilitlenme problemlerini azaltmak ve düzlemsel eğme davranışını arttırmak için gerinim interpolasyonu kabulü yapar. Lokal koordinat sistemi kullanır. Bu koordinat sistemi malzemedeki rijit cisim hareketini tanımlayabilmek için malzeme ile birlikte dönmektedir. Lokal koordinat sistemi BT kabuk elemaninkine benzerdir. İki temel vektör eleman merkezindeki kabuk yüzeyine teğet, üçüncü vektör ise bu yüzeye normal durumundadır. Tam integrasyonlu kabuk elemanlar, BT kabuk elemanları gibi hızlı çözüm yapabilen bir eleman formülasyonudur.

### **3.1.7 İntegrasyon Nokta Sayısı**

Kabuk elemanlar düzlem gerilme problemlerini modelleme amaçlı olduklarından temsil ettikleri geometriler yüzey modelleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Sac metal şekillendirme proseslerinde incelme oldukça kritik bir parametre olduğundan kalınlık yönündeki gerilme dağılımına ihtiyaç duyulmaktadır. Kabuk eleman formülasyonları kalınlık yönündeki gerilme dağılımlarını integrasyon nokta sayısı ile hesaplamaktadır. İntegrasyon nokta sayısı kabuk elemanın kalınlık yönünde kaç katmanda incelendiğinin temsilidir. İntegrasyon nokta sayısının bir eleman üzerinden gösterimi Şekil 3.7.'de görülmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere gerilme hesapları kalınlık yönündeki integrasyon noktaları kullanılarak gerçekleştirilmektedir.



**Şekil 3.7.** Kabuk Eleman İçin **a)** 5 Katmanda Sadeleştirilmiş **b)** 7 Katmanda Tam Çözüm İçin Hesaplama Noktaları **Kaynak:** (Mete, 2007:15)

### 3.1.8 Zaman Adım Aralığı

Bir diğer sonlu elemanlar parametresi ise zaman adımı büyüklüğüdür. Zaman adımı büyüklüğü şu şekilde hesaplanabilir,

$$\Delta t = \frac{L}{c} \quad (3.4)$$

Burada,  $\Delta t$  zaman adımı büyüklüğü,  $L$  sonlu elemanlar ağ yapısındaki en küçük elemanın kenar uzunluğunu,  $c$  ise ses hızını temsil etmektedir. Ses hızı ise şu şekilde hesaplanabilir,

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho_0(1-\nu^2)}} \quad (3.5)$$

Burada,  $E$  Elastisite modülünü,  $\rho_0$  malzeme yoğunluğunu,  $\nu$  ise Poisson oranını temsil etmektedir. Zaman adımı büyüklüğü toplam zaman adımının bulunmasında kullanılır ve sonlu elemanlar analizlerinin çözüm süresini etkileyen önemli bir parametredir.

### 3.2 Bölüm Değerlendirmesi

Özet olarak, tahmin hassasiyetine etki eden parametreler procesten bağımsız durumda olan ve modelleme adımlarını oluşturan yukarıda da bahsedilen sonlu elemanlar hesaplama parametreleridir. Modelleme adımıda hesaplama adımlarını oluşturan hesaplama parametreleri sınır koşulları, geometriyi temsil eden eleman bilgileri ve malzemenin plastik davranışını modelleyen plastisite modelleri olarak tanımlanabilmektedir. İlgili parametrelerin

belirlenme şekli ve seçilme nedenleri simülasyon hassasiyetine doğrudan etki etmektedir. Simülasyon hassasiyeti üzerine yapılan çalışmalar göz önüne alındığında hesaplama parametrelerinin tahmin hassasiyetine etkisi açıkça görülmektedir. Bu nedenle hesaplama parametrelerinin doğru seçimi süre ve hassasiyet açısından oldukça kritiktir.



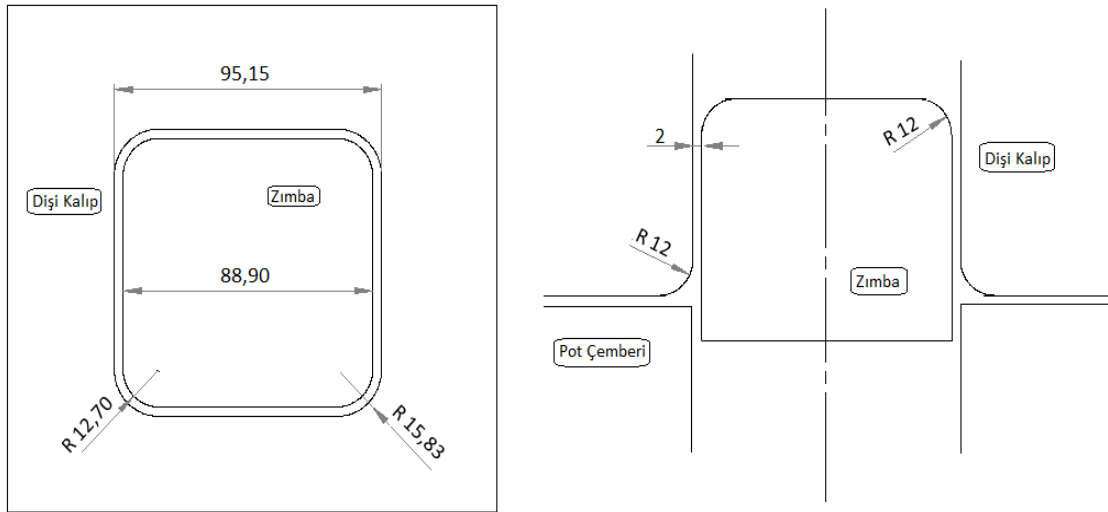
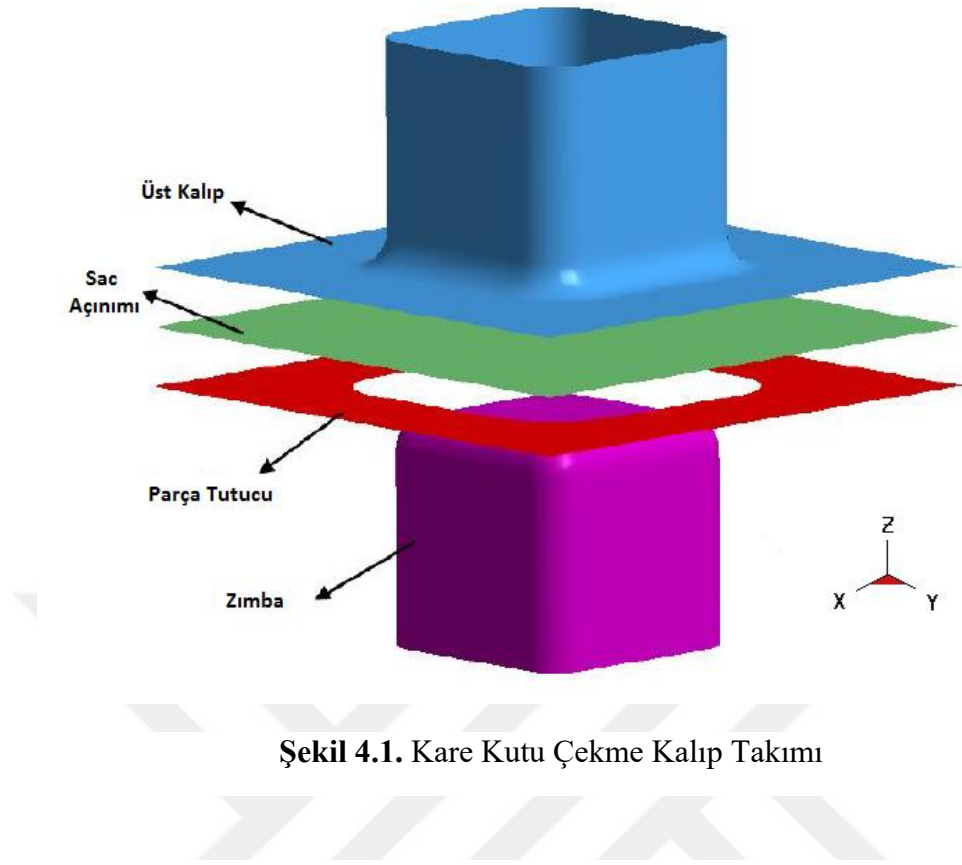


#### 4. UYGULAMA ÇALIŞMASI

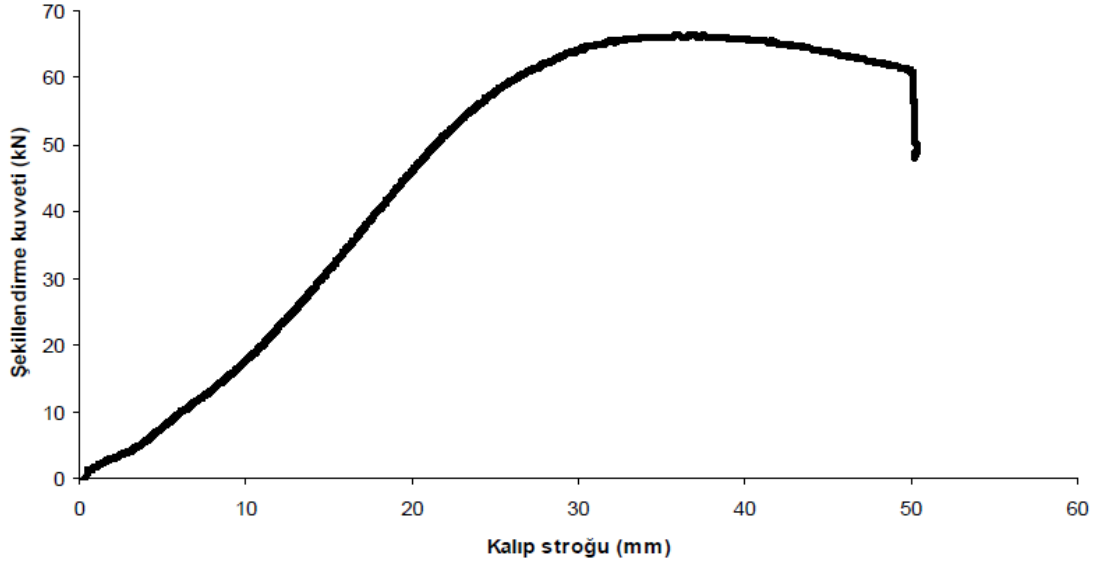
Yapılan bu tez çalışmasında sac metal şekillendirme sonlu elemanlar analizlerinin simülasyon sürelerinin analizi aşamasında uygulama olarak malzemelerin şekillendirilebilirliği nin etkin bir şekilde değerlendirilebildiği kare kutu çekme prosesi kullanılmıştır. Sac metal malzemesi olarak gelişmiş yüksek mukavemetli çelik grubundan TRIP600 çeliği incelenmiştir. Tez çalışması simülasyon süresi ile ilgili olup malzemeden bağımsız bir çalışma olduğundan seçilen malzemenin çalışmanın değerlendirilmesi adımı bir önemi bulunmamaktadır.

Kare kutu çekmede kullanılan kalıp takımının geometrisi zımba, tutucu ve kalıp olmak üzere üç ana parçadan meydana gelmektedir. İlk olarak üst kısımda zımba, ortada sac açınım, sac açınım altında sacı tutan tutucu ve şekillendirmeyi sağlayan zımba bulunmaktadır. Temel şekillendirme elemanları zımba ile kalıptır. Kalıp harekete başladığı anda tutucu alttan devreye girer ve sac açınımı belirli kuvvette tutar. Bu işlem kısa bir zaman diliminde gerçekleşir. Kalıp ve tutucu arasındaki sac, zımba yüzeyine temas eder ve çekme işlemi başlar. Belirli bir çekme miktarından sonra işlem sona ermektedir. Buradaki çekme miktarı sacın boyun verdiği ya da yırtılma anındaki strok mesafesidir.

Kare kutu çekme işlemine ait kalıp takım geometrileri ve ölçüleri sırası ile Şekil 4.1 ve Şekil 4.2.'de verilmiştir. Kare kutu çekme için kullanılan sac açınımı ölçüleri 203.2 x 203.2 mm'dir. Bu prosesin TRIP600 için deneysel bazda gerçekleştirildiği (Akpınar vd, 2012) çalışmasında deneysel sonuç olarak "Şekillendirme kuvveti-Kalıp stroğu" eğrisi verilmiştir. Yapılan simülasyonların hassasiyet açısından doğrulanması bu eğri referans alınarak yapılmıştır. Çalışma için referans alınan deneysel eğri Şekil 4.3.'de görülmektedir. Bu proses üzerinden sonlu elemanlar hesaplama parametreleri incelenmiştir. Prosese ait parametreler deney koşulları ile aynı olacak şekilde sonlu elemanlar modellerinin tamamında tanımlanmıştır. Proses parametreleri olarak parça tutucu kuvvet 94 kN ve sürtünme katsayısı 0,125 olarak kullanılmıştır.



**Şekil 4.2.** Kare Kutu Çekme Kalıp Takımı Ölçüleri



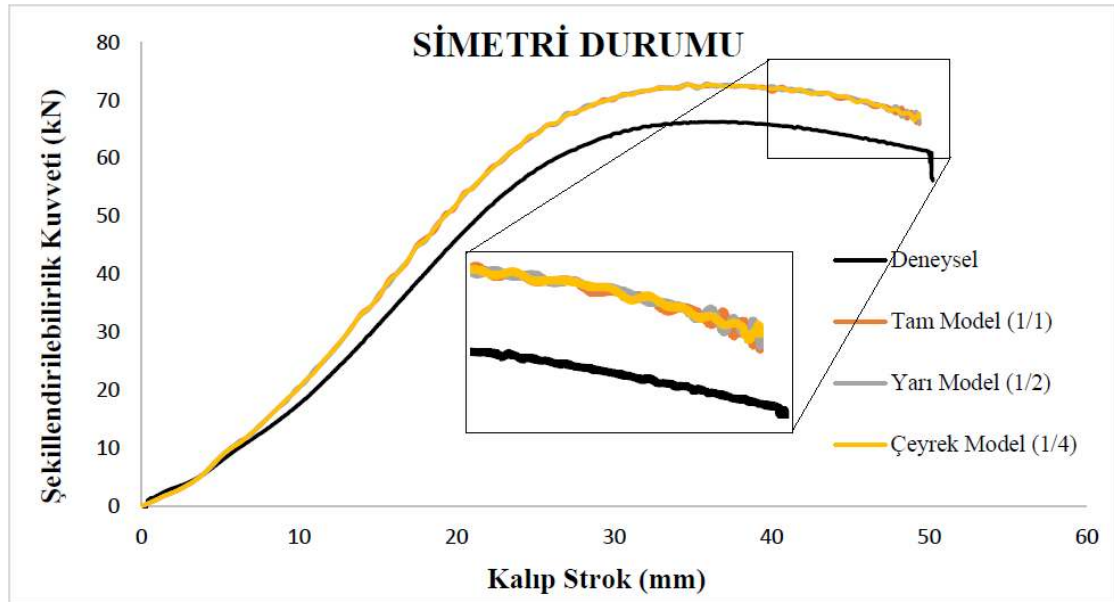
**Şekil 4.3.** Deneysel Şekillendirme Kuvveti - Kalıp Stroğu Eğrisi

Tezin bir önceki sonlu elemanlar analizi konu başlıklı bölümünde anlatılan sonlu elemanlar hesaplama parametreleri kullanılarak kare kutu çekme prosesine ait modelleme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada hesaplama parametreleri geniş bir küme içerisinde değerlendirilmiş olup kullanılan parametreler ve bu parametrelere ait değerler Tablo 4.1.'de verilmiştir. Tez çalışma kapsamında yapılan sonlu elemanlar analizlerinin tamamı Ls-Dyna ticari yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

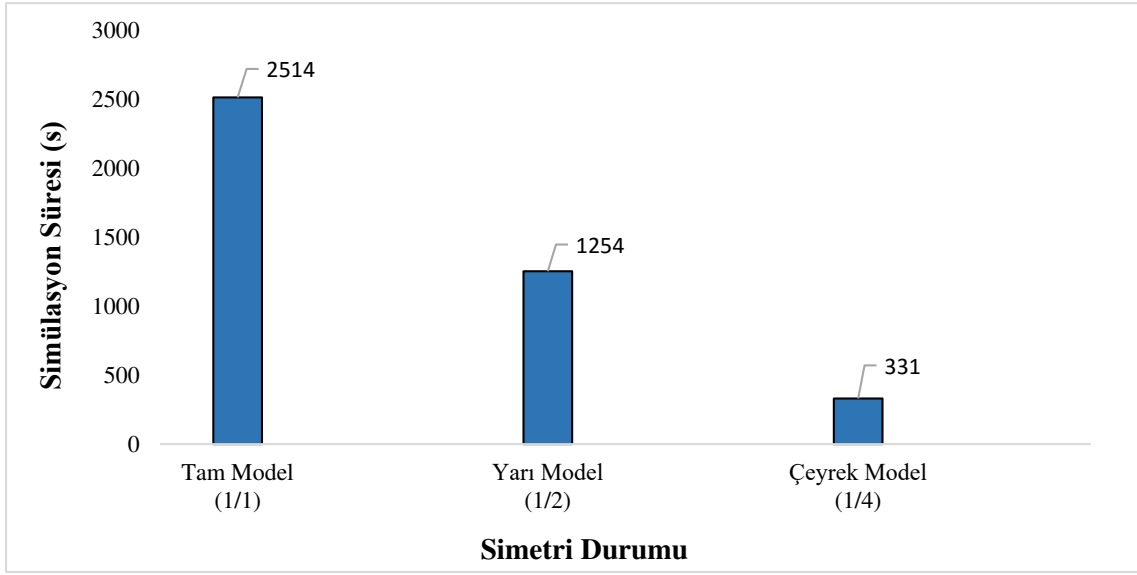
**Tablo 4.1.** Kullanılan Sonlu Elemanlar Hesaplama Parametreleri

| Parametre                  | Değer                 |      |                 |      |                  |      |                |
|----------------------------|-----------------------|------|-----------------|------|------------------|------|----------------|
| Simetri Durumu             | 1/4                   |      | 1/2             |      | 1/1              |      |                |
| Çekirdek Sayısı            | 4                     |      |                 | 8    |                  |      |                |
| Adaptiv Ağ Yapısı Derecesi | 0<br>(Adaptivite Yok) | 1    | 2               | 3    | 4                | 5    |                |
| Eleman Boyutu (mm)         | 1                     | 3    |                 | 5    |                  | 7    |                |
| İntegrasyon Nokta Sayısı   | 3                     | 5    |                 | 7    |                  | 9    |                |
| Eleman Formülasyonu        | Hughes-Liu            |      | Belytchsko-Tsay |      | Fully Ingetrated |      |                |
| Kalıp Hızı (mm/s)          | 500                   | 1000 |                 | 2000 |                  | 3000 | 5000           |
| Zaman Adım Aralığı Ölçeği  | 1/1                   |      | 1/5             |      | x10              |      |                |
| Malzeme Modeli             | Power Law             |      | Hill-48         |      | Barlat-89        |      | Yoshida-Uemori |

Çalışmada ilk olarak simetri durumu incelenmiş olup kare kutu çekme prosesi eksenel simetriye sahip olduğundan modelleme adımları tam model, yarı model ve çeyrek model olmak üzere üç adımda yapılmıştır. Gerçekleştirilen simülasyonlar sonrasında şekillendirme kuvveti-kalıp stroğu eğrileri elde edilmiş ve deneysel sonuçlar ile kıyaslanmıştır. Karşılaştırma sonuçları Şekil 4.4.'de görülmektedir. Simetri koşulları değerlendirildiğinde tahmin performanslarının oldukça benzer oldukları görülmektedir. Sonuç olarak simetri koşulunun simülasyon hassasiyetini efektif bir şekilde etkilemediği tespit edilmiştir. Simülasyon sonuçları karşılaştırıldığında simetri koşulunun etkisi açıkça görülmektedir. Sonlu elemanlar analizi sürelerinin karşılaştırılması Şekil 4.5.'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere çeyrek modelli simülasyon oldukça avantajlı olarak öne çıkmaktadır. Bu nedenle modelleme çalışmanın sonraki adımlarında çeyrek model kullanılmıştır.

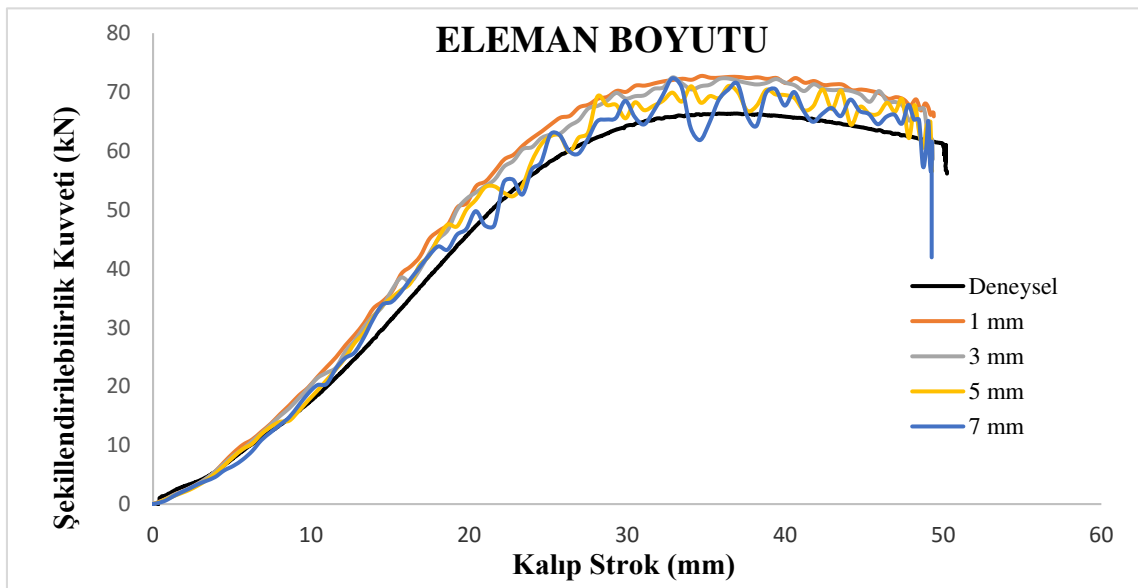


Şekil 4.4. Simetri Durumuna Göre Kuvvet - Kalıp Strok Eğrilerinin Karşılaştırılması

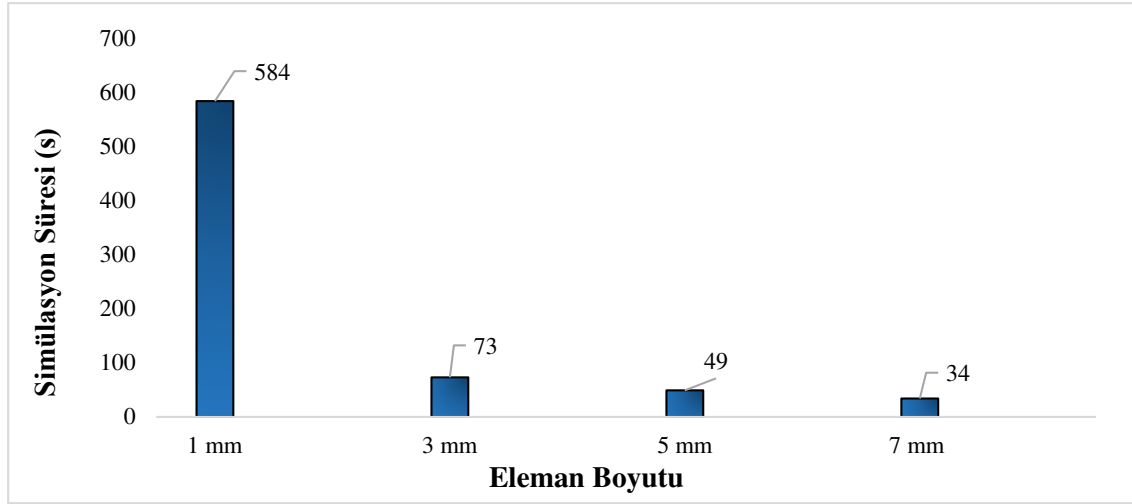


**Şekil 4.5.** Simetri Durumuna Göre Simülasyon Sürelerinin Karşılaştırılması

Tez çalışmasının ikinci adımında eleman boyutunun etkisi incelenmiştir. Sac açınımına ait eleman boyutları 1, 3, 5 ve 7 mm olarak kullanılmış ve sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Kuvvet-strok eğrilerinin deneysel sonuçla kıyaslanması Şekil 4.6.'da, simülasyon sürelerinin durumu ise Şekil 4.7.'de görülmektedir. Şekillerden görüldüğü üzere eleman boyutunun büyümesi simülasyon süresini belirgin bir şekilde düşürmektedir fakat hassasiyet açısından bakıldığında eleman boyutunun büyümesi hassasiyeti negatif şekilde etkilemektedir. Tercih önceliği tahmin hassasiyeti olduğundan sonraki simülasyonlar için 1 mm eleman boyutu tercih edilmiştir.

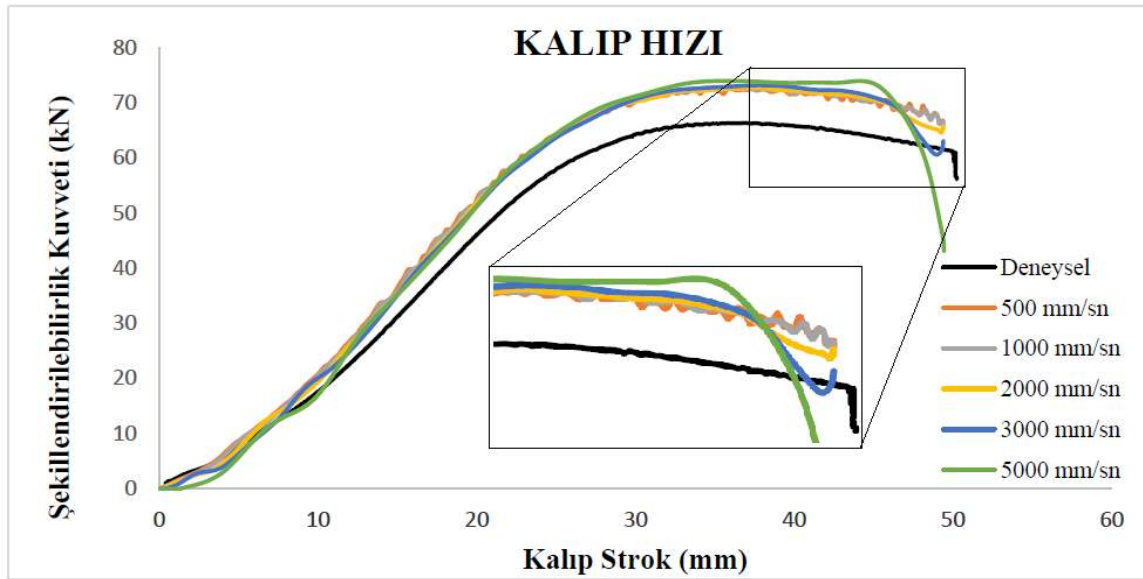


**Şekil 4.6.** Eleman Boyutuna Göre Kuvvet-Strok Eğrilerinin Karşılaştırılması

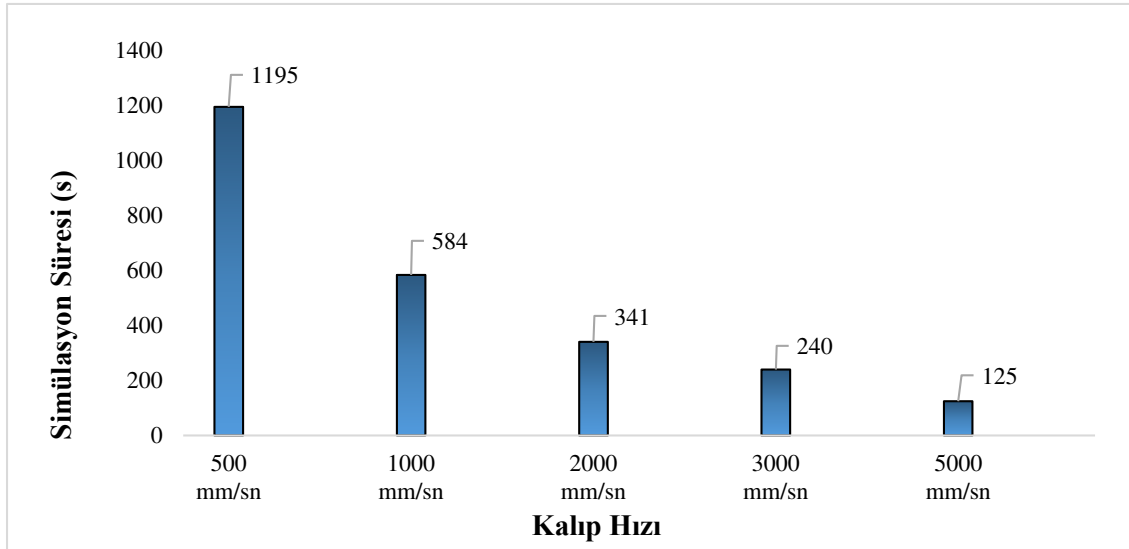


**Şekil 4.7.** Eleman Boyutuna Göre Simülasyon Sürelerinin Karşılaştırılması

Çalışmanın bir diğer adımında deformasyon hızının etkisi incelenmiş olup bu kapsamda kalıp ilerleme hızı hesaplama parametresi olarak kullanılmıştır. Şekillendirme hızı değerleri 500, 1000, 2000, 3000 ve 5000 mm/s olarak belirlenmiş ve simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Simülasyonların hassasiyet karşılaştırması Şekil 4.8.'de, sürelerinin karşılaştırması ise Şekil 4.9.'da verilmiştir. Deneysel sonuçlarla kıyaslamalar incelendiğinde 5000 mm/s hız değerinin deneysel eğriden uzak tahminde bulunduğu, diğer hız değerlerinin ise birbirlerine yakın sonuç verdikleri tespit edilmiştir. Süre açısından parametreler incelendiğinde 2000 mm/s hız değerinin hem süreden hem de hassasiyet açısından en uygun değer olduğu tespit edilmiştir.



**Şekil 4.8.** Kalıp Hızına Göre Kuvvet-Strok Eğrilerinin Karşılaştırılması



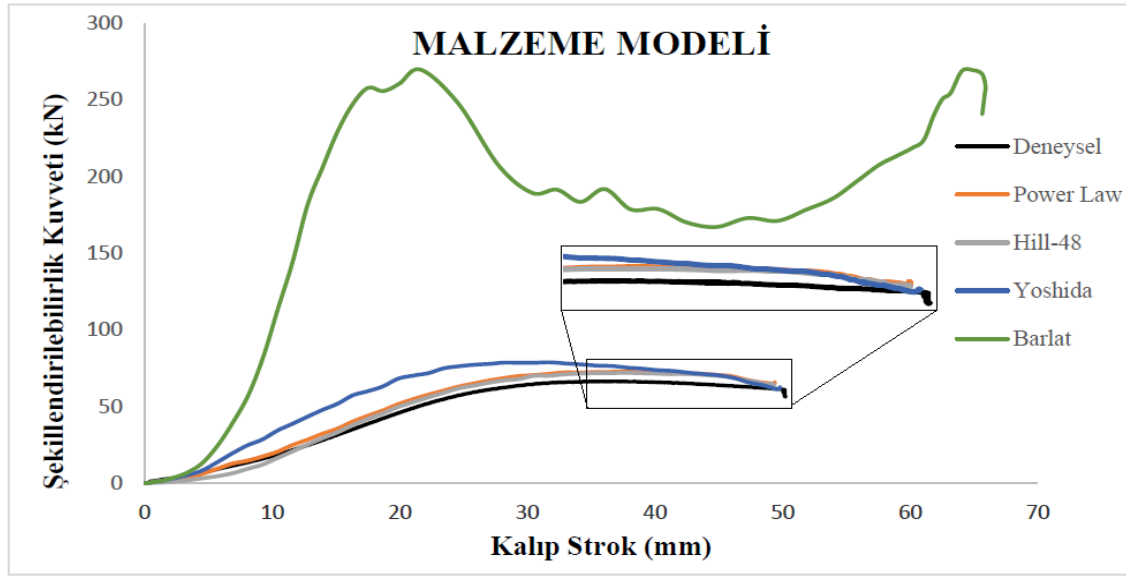
**Şekil 4.9.** Kalıp Hızına Göre Simülasyon Sürelerinin Karşılaştırılması

Tez çalışmasının 3.1.4 Malzeme Modeli başlıklı bölümünde detaylı bilgileri verilen Power Law, Hill-48, Yoshida ve Barlat malzeme modelleri ve Tablo 4.2.'de verilen mekanik özellikler referans alınarak plastise modelleri kullanılmıştır.

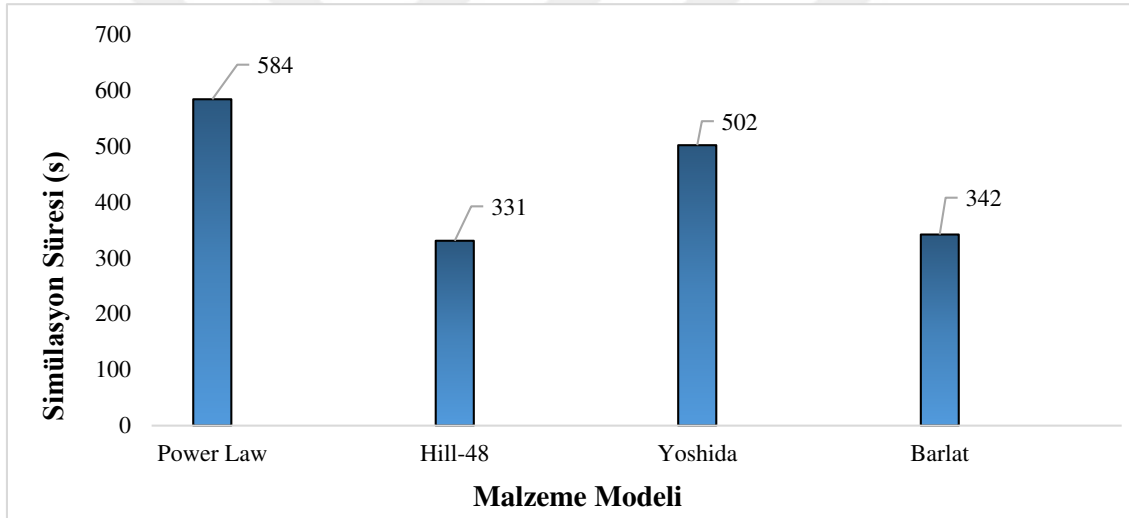
**Tablo 4.2.** TRIP600 1.4mm Malzemesinin Mekanik Özellikleri

|                                  |         |
|----------------------------------|---------|
| Akma Mukavemeti (MPa)            | 439     |
| Mukavemet Katsayısı (MPa)        | 1196,18 |
| Pekleşme Üssü (n)                | 0,2242  |
| Ortalama Anizotropik Katsayı (R) | 0,930   |
| Poisson Oranı (PR)               | 0,28    |
| Elastisite Modülü (E) (GPa)      | 207     |

Yapılan simülasyonlar sonrasında karşılaştırma sonuçları hassasiyet açısından Şekil 4.10.'da, süre açısından ise Şekil 4.11.'de verilmiştir. Barlat-89 modelinin gerçekten oldukça uzak bir sonuç verdiği görülmektedir. Bu durum Barlat-89 modelinin yeni nesil çelikler için çok uygun olmadığını göstermektedir. Diğer malzeme modelleri ile yapılan karşılaştırma sonucunda hem hassasiyet hem de süre açısından Hill-48 malzeme modelinin en uygun plastisite modeli olduğu tespit edilmiştir.



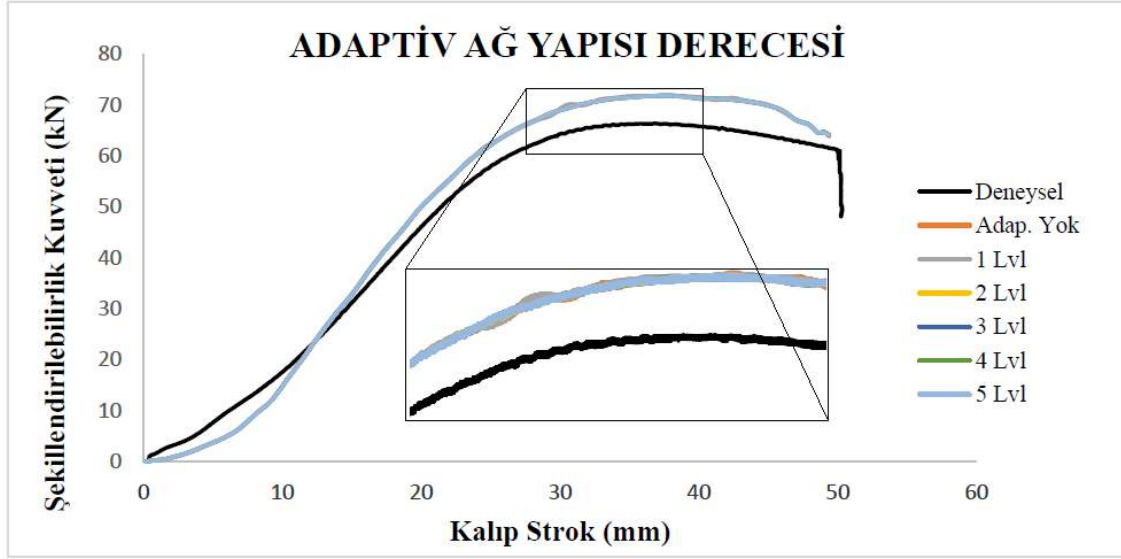
**Şekil 4.10.** Malzeme Modeline Göre Kuvvet-Strok Eğrilerinin Karşılaştırılması



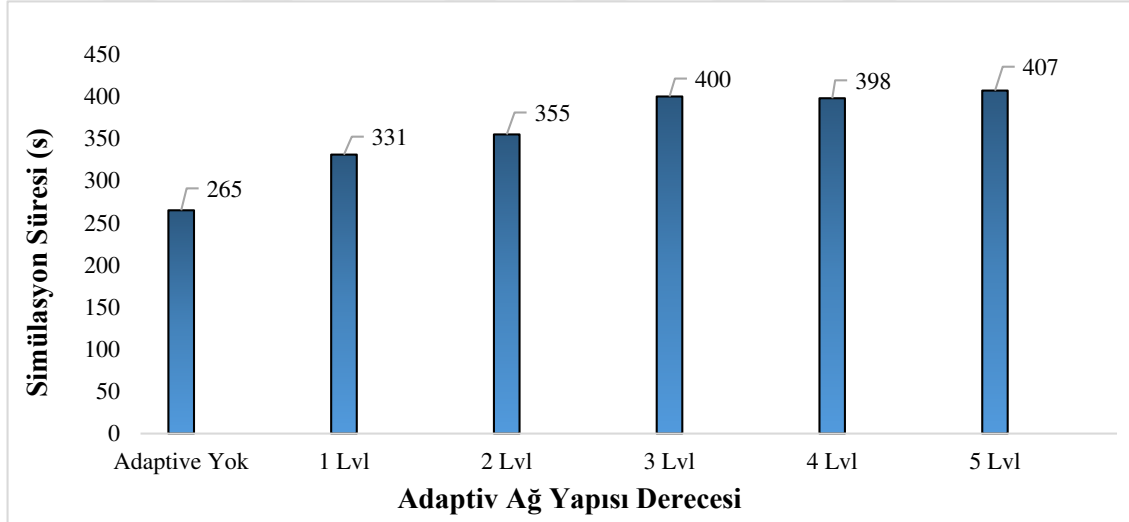
**Şekil 4.11.** Malzeme Modeline Göre Simülasyon Sürelerinin Karşılaştırılması

Tez çalışmasının sonraki adımında ağ yapısı adaptivitesi incelenmiştir. Bu kapsamda ilk olarak ağ adaptasyonu kullanılmadan sac açınının başlangıç ağ yapısı korunarak simülasyon gerçekleştirilmiştir. Diğer durumlarda ise ağ adaptasyon seviyesi 1, 2, 3, 4 ve 5 olarak kullanılmıştır. Hassasiyet açısından sonuçların değerlendirilmesi Şekil 4.12.'de verilmiştir. Görüldüğü üzere ağ adaptasyonunda da etkin bir hassasiyet değişimi tespit edilmemiştir. Bu durumda simülasyon süreleri karşılaştırılmıştır (Şekil 4.13.). En kısa sürede çözüme ulaşan durum ağ adaptasyonunun bulunmadığı durum olarak tespit edilmiştir. Bu nedenle, çalışmanın sonraki simülasyonlarında ağ adaptasyonu kullanılmamıştır.



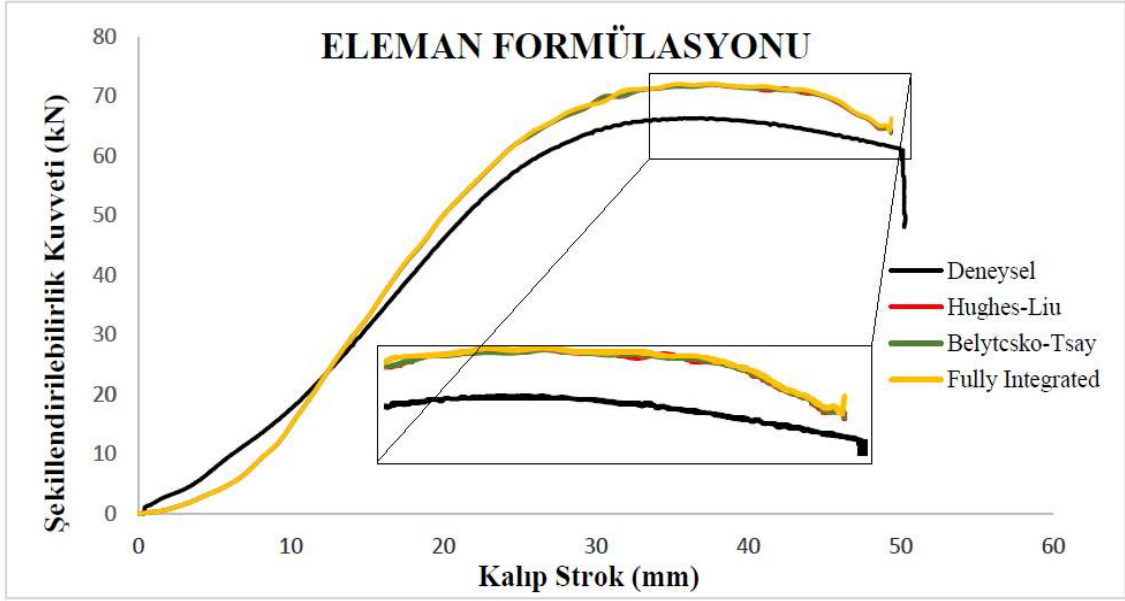


**Şekil 4.12.** Ağ Adaptasyonuna Göre Kuvvet-Strok Eğrilerinin Karşılaştırılması

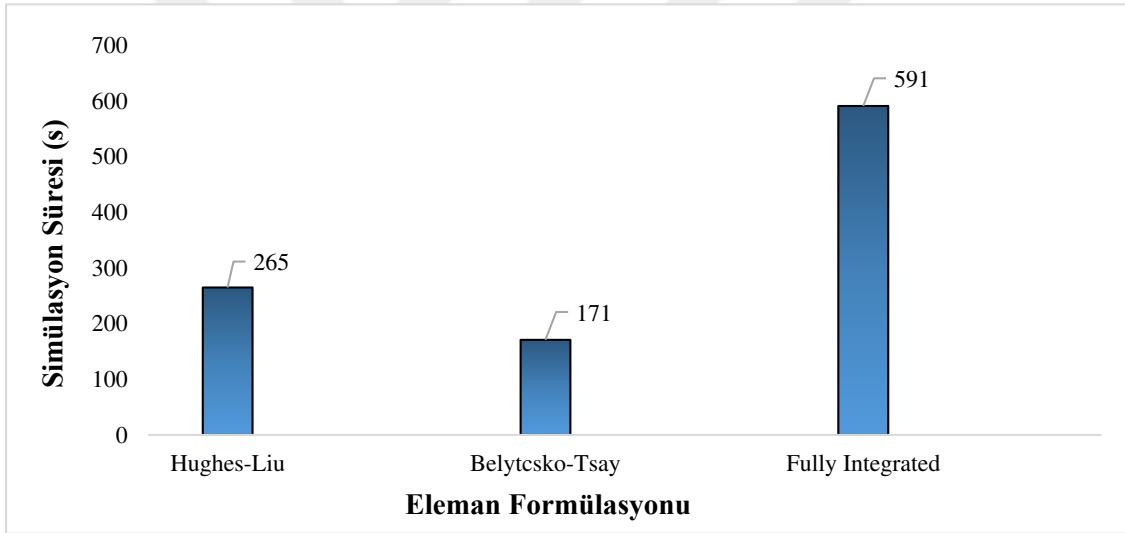


**Şekil 4.13.** Ağ Adaptasyonuna Göre Simülasyon Sürelerinin Karşılaştırılması

Bir diğer parametre olarak eleman formülasyonunun etkisi incelenmiştir. Eleman formülasyonu olarak Hughes-Liu, Belytschko-Tsay ve Tam integrasyonlu kabuk elemanlar kullanılmıştır. Simülasyonların gerçekleştirilmesi sonucunda elde edilen kuvvet-strok eğrilerinin deneysel sonuçla kıyaslanması Şekil 4.14. 'de görülmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere eleman formülasyonunun tahmin hassasiyetine belirgin bir etkisi tespit edilmemiştir. Simülasyon süreleri karşılaştırıldığında, simülasyon sürelerinin durumu ise Şekil 4.15. 'de görülmektedir. En kısada çözümün gerçekleştirildiği parametre olarak Belytschko-Tsay tespit edilmiş olup, sonraki simülasyonlar bu formülasyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

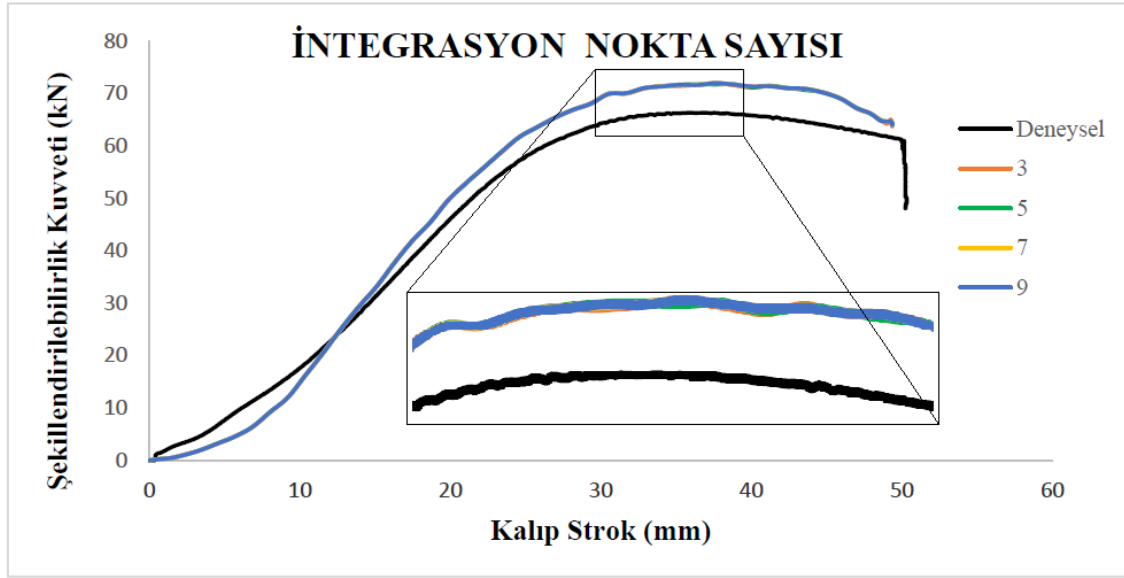


Şekil 4.14. Eleman Formülasyonuna Göre Kuvvet-Strok Eğrilerinin Karşılaştırılması

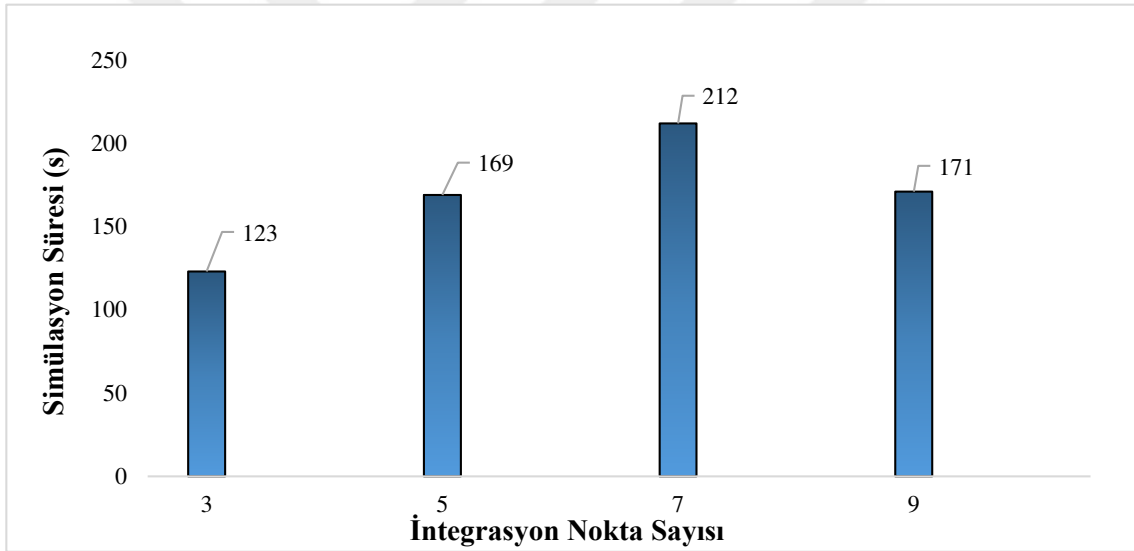


Şekil 4.15. Eleman Formülasyonuna Göre Simülasyon Sürelerinin Karşılaştırılması

Çalışmanın bir sonraki adımında hesaplama parametresi olarak integrasyon nokta sayısı incelenmiş olup bu kapsamda kalınlık yönünde 3, 5, 7 ve 9 adet integrasyon noktası kullanılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçların deneysel sonuçla doğrulanması Şekil 4.16. 'da verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere integrasyon nokta sayısının da hassasiyete belirgin bir etkisi tespit edilmemiştir. Bu nedenle simülasyon süreleri karşılaştırılmıştır ve karşılaştırma sonuçları Şekil 4.17. 'de verilmiştir. Görüldüğü üzere simülasyon süresinde iyileştirme sağlayan integrasyon nokta sayısı 3 olarak belirlenmiştir.



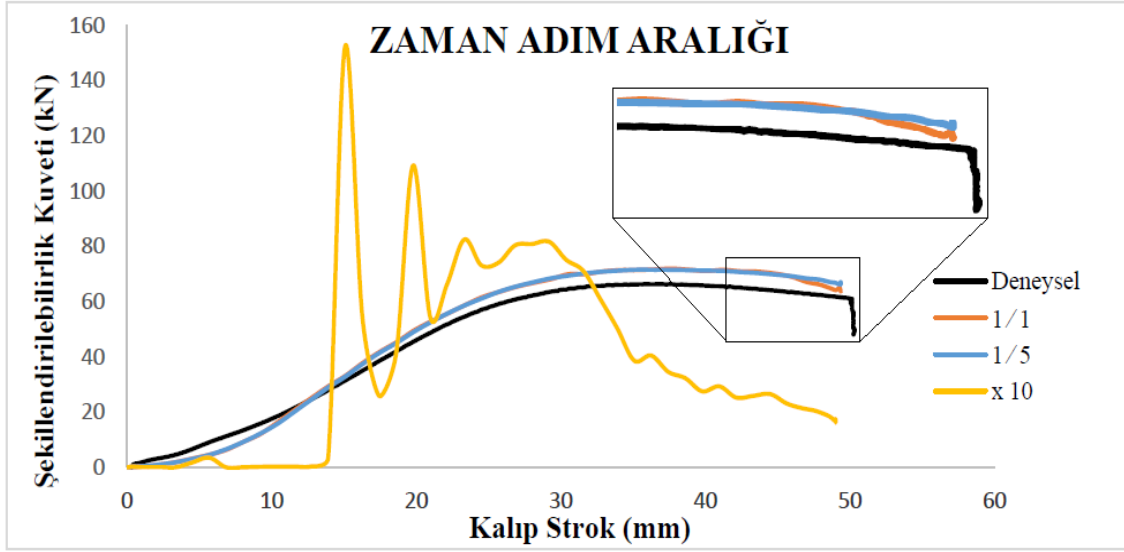
**Şekil 4.16.** İntegrasyon Nokta Sayısına Göre Kuvvet-Strok Eğrilerinin Karşılaştırılması



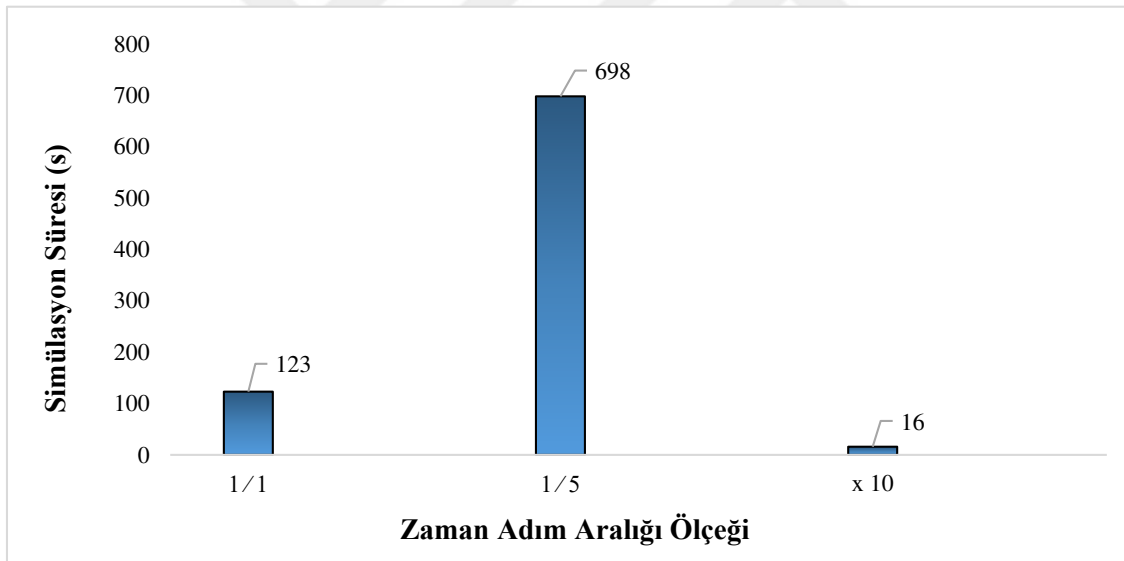
**Şekil 4.17.** İntegrasyon Nokta Sayısına Göre Simülasyon Sürelerinin Karşılaştırılması

Bir sonraki adımda zaman adım aralığının etkisi incelenmiştir. Zaman adım aralığı üç farklı parametre değerinde kullanılmıştır. Bunların ilki Denklem (3.4)'de verildiği şekilde hesaplanan değer (1/1 ölçekli) olarak kullanılan durumdur. Diğer parametreler ise bu değer 1/5'i ve 10 katı olmak üzere seçilmiştir. Gerçekleştirilen simülasyonlara ait hassasiyet ve süreler ait sonuçlar sırasıyla Şekil 4.18. ve Şekil 4.19.'da verilmiştir. Şekillerden görüldüğü üzere zaman adım aralığının yükselmesi hassasiyetten uzak sonuçlar vermektedir. Bunun nedeni zaman adım aralığının büyümesi ile kütle orantısal olarak çözümde artırılmaktadır. Bu nedenle de deneysel sonuçlar yakalanamamaktadır. Hesaplanan değer ve 1/5 ölçeği sonuçlarında ise hassasiyet açısından belirgin bir fark gözlemlenmemiştir. Bu nedenler

sürelerin incelenmesi sonucunda zaman adım aralığının hesaplandığı şekilde 1/1 ölçeğinde kullanılmasına karar verilmiştir.

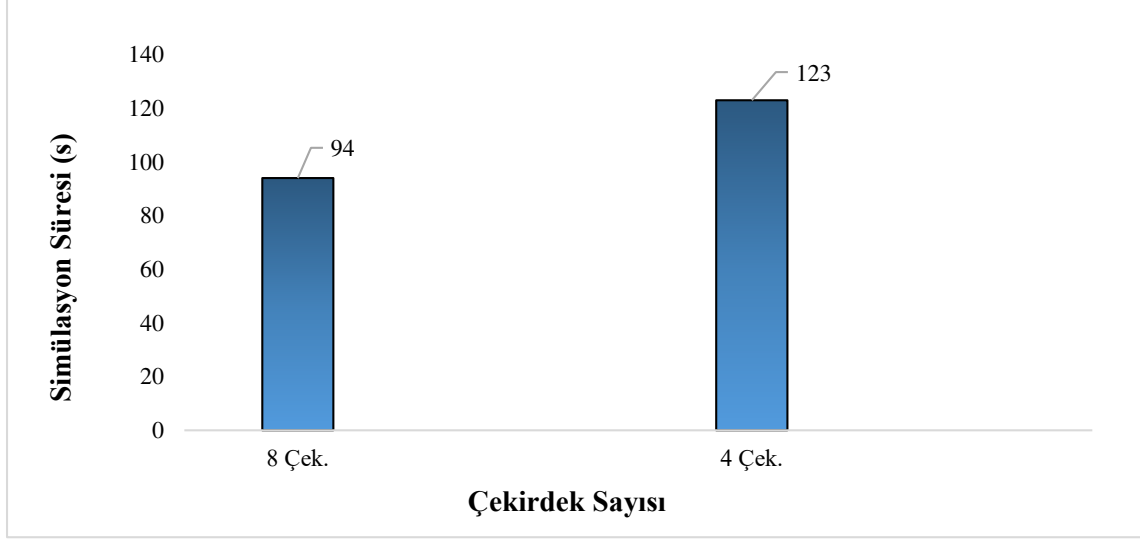


Şekil 4.18. Zaman Adım Aralığı Ölçeğine İçin Kuvvet-Strok Eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 4.19. Zaman Adım Aralığı Ölçeğine Göre Simülasyon Sürelerinin Karşılaştırılması

Yapılan iyileştirmeler sonrasında simülasyon süresinin 123 saniyeye kadar indirildiği ve hassasiyetin değişmediği görülmektedir. Çalışmada son adım olarak bilgisayar gücünün etkisini irdelemek adına süresi minimize edilmiş simülasyon bir de 8 çekirdekli bir bilgisayarda çözülmüştür. Her iki durum için süre karşılaştırması Şekil 4.20.'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere çekirdek sayısının artması ile birlikte simülasyon süresi 94 saniye seviyesine indirilmiştir.



**Şekil 4.20.** Bilgisayar Çekirdek Sayısına Göre Simülasyon Sürelerinin Karşılaştırılması

Yapılan çalışmalarda da görüldüğü üzere belirtilen her bir sonlu elemanlar hesaplama parametrelerinin simülasyon sonuçlarında hem hassasiyet açısından hem de simülasyon süresi açısından etkisi oldukça belirgindir. Bu aşamada yapılan simülasyonlar doğrultusunda en optimum değerlere ulaşılan ve referans olarak alınan proses hassasiyetinden ödün verilmeden en uygun olan hesaplama parametreleri seçilmiştir.

## 5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında sac metal sonlu elemanlar analizlerinde hassasiyet ve simülasyon süresine hesaplama parametrelerinin etkisi incelenmiştir. Bu amaç doğrultusunda, sac metal şekillendirme proseslerinden kare kutu çekme prosesi analiz edilmiş olup malzeme olarak gelişmiş yüksek mukavemetli çeliklerden Trip600 çeliği kullanılmıştır. Kare kutu çekme prosesinde deneysel şekillendirme kuvveti-kalıp stroğu eğrisi referans alınarak hesaplama parametrelerinin tahmin hassasiyeti üzerine etkileri irdelenmiştir. Hassasiyetten ödün vermeden simülasyon süresini kısaltmak amacı ile simülasyon süreleri de inceleme kapsamına alınarak aynı hassasiyette daha kısa sürede çözüm veren parametreler tespit edilmiştir.

Sonlu elemanlar hesaplama parametresi olarak, simetri durumu, eleman boyutu, şekillendirme hızı, malzeme modeli, ağ adaptasyon derecesi, eleman formülasyonu, integrasyon nokta sayısı, zaman adım aralığı ve sonlu elemanlar analizlerinin gerçekleştirildiği bilgisayar çekirdek sayısı kullanılmıştır. Her bir hesaplama parametresi için bir değer kümesi belirlenmiş ve her bir değer için simülasyonlar gerçekleştirilerek hassasiyet ve süre açısından etkileri incelenmiştir.

İlk parametre olarak kalıp takımının simetri durumu incelendiğinde hassasiyet açısından simetri durumunun bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. Süre açısından bakıldığında ise en etkin parametrenin simetri durumu olduğu belirlenmiştir. Bu kapsamda tam model, yarı model ve çeyrek model seçeneklerinden en kısa sürede çözüm veren çeyrek model tercih edilmiştir.

Eleman boyutu açısından sonuçlar değerlendirildiğinde eleman boyutundaki artışın simülasyon süresini kısalttığı fakat hassasiyete negatif etki ettiği görülmüştür. Bu nedenle eleman boyutu hassasiyet açısından kritik bulunmuş ve 1 mm olarak belirlenmiştir.

Hesaplama parametrelerinden şekillendirme hızına bakıldığında yüksek hızlarda çözümün süre açısından kısaldığı fakat 5000 mm/s seviyelerinde tahmin açısından deneysel sonuçlardan uzaklaşıldığı görülmüştür. Bu nedenle deneysel sonuca en fazla yaklaşan ve en kısa sürede çözüm veren 2000 mm/s değeri şekillendirme hızı olarak seçilmiştir.

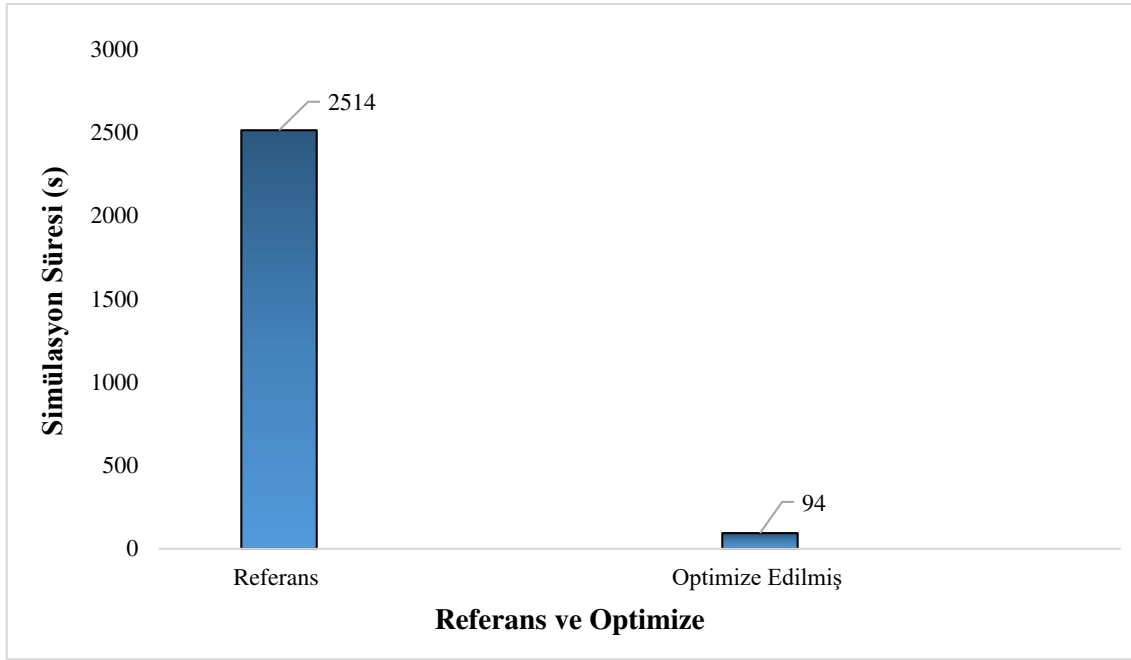
Sonraki adımda malzemenin plastik davranışını tanımlayan malzeme modelleri incelenmiş bu kapsamda da Power Law, Hill-48, Barlat-89 ve Yoshida-Uemori modelleri kullanılmıştır. Bu modellerden Barlat-89 modeli başarılı bir tahmin gerçekleştirememiştir. Barlat-89 modelinin alüminyum malzemeler için daha başarılı tahminler gerçekleştirdiği literatürdeki çalışmalardan bilinmektedir (Harpell vd, 2000). TRIP600 gibi gelişmiş yüksek mukavemetli çelikler açısından etkin bir tahmin sağlanamamıştır. Yoshida-Uemori modelinde ise deneysel sonucun maksimum kuvvet değerine en yakın tahmin gerçekleştirilse de zamana

bağlı değişim açısından deneysel sonuçlarla aynı eğim yakalanamamıştır. Bu nedenle malzeme modeli olarak en hassas ve en kısa sürede sonucun elde edildiği Hill-48 modelinin kullanımı tercih edilmiştir.

Bir diğer parametre olarak ağ adaptasyon derecesi incelendiğinde ağ adaptasyon seviyesinin hassasiyet açısından belirgin bir avantajının bulunmadığı görülmüş olup, süre açısından en optimum yaklaşımı veren durumun ağ adaptasyonunun kullanılmadığı durum olduğu tespit edilmiştir. Elemanların hesaplama tekniğini temsil eden eleman formülasyonu ve integrasyon nokta sayıları açısından bir değerlendirme yapıldığında her iki parametredeki değişimin hassasiyete belirgin bir etkisi görülmemiştir. Bu nedenle bu parametrelerden süre açısından avantaj sağlayan değerlerin kullanımı tercih edilmiştir. Bu nedenle eleman formülasyonu olarak Belytschko-Tsay ve integrasyon nokta sayısı olarak 3 seçilmiştir.

Bir diğer önemli parametre olarak zaman adım aralığının etkisi irdelenmiştir. Bu kapsamda zaman adım aralığının artmasının simülasyon süresini oldukça kısalttığı görülmüştür. Fakat hassasiyet açısından deneysel sonuçlardan oldukça uzak tahminler gerçekleştirilmiştir. Bunun nedeni zaman adım aralığının artışına paralel olarak sistemde sac metal kütlelerinin artırılmasıdır. Son olarak çözümlerin gerçekleştirildiği bilgisayarın çekirdek sayısı incelenmiştir. Bu kapsamda belirlenen parametrelerle 4 çekirdekli ve 8 çekirdekli bilgisayarlarda çözümler gerçekleştirilmiştir. Bu durumda ise yaklaşık %25 oranında bir süre kazancı sağlanmıştır.

Sonuç olarak genel tablonun değerlendirilmesinin yapılabilmesi adına başlangıçta gerçekleştirilen simülasyon süresi ile hesaplama parametrelerinin değerlendirilmesi sonrasında elde edilen minimize edilmiş durumun arasında 2420 saniye kadar süreden kazanç sağlanmıştır. Bu durumun karşılaştırması Şekil 5.1. 'de görülmektedir.



**Şekil 5.1.** Başlangıç Simülasyonu ve Minimize Edilmiş Durumların Simülasyon Süresi Açısından Değerlendirilmesi

Şekilden de görüldüğü üzere hesaplama parametrelerinin simülasyon süresi üzerine belirgin bir etkisi mevcuttur. Bu nedenle doğru parametrelerle çalışılması simülasyon hassasiyetinden ödün vermeden simülasyon süresinin verimli bir şekilde azaltılmasına imkan sağlamaktadır. Özellikle seri imalatın hakim olduğu endüstriler açısından simülasyon sürelerinin verimli kullanılması oldukça önemlidir.



## KAYNAKLAR

**Akpınar, M., Esener, E., Ercan, S., Özsoy, M., & Fırat, M.** (2012). Trip600 Çeliğinin Kare Kesit Çekilebilirliğinin Sonlu Elemanlar Tahmini. In proceedings of International Iron & Steel Symposium, Karabuk, Turkey.

**Alper G.**(2003), Alüminyum Sürekli Döküm Yöntemiyle Üretilmiş 5052-5182 ,Alüminyum Alaşımlarının Şekillendirilebilirlik Kabiliyetlerinin Belirlenmesi İ.T.Ü., F.B.E Yüksek Lisans Tezi , İstanbul.

**Aluminium Automotive Manual** (2011), European Aluminium Association, Ch. 5, 15.

**Anıl H.** (2016), Sac Bükmede Geri Yaylanmanın Sonlu Eleman Yöntemi İle İncelenmesi, Hitit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi.

**Arıkan, A.S.**(1999). Sonlu elemanlar Metodunun Mühendislikte Uygulamaları. Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye.

**Ataşımşek, S.** (1971); “Sac Kalıpları”, 401- 570.

**Ay İ.** (2018), İmalat Yöntemleri, Balıkesir Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, Ders Notları.

**Banabic, D.**, (2010). Sheet Metal Forming Processes -Constitutive Modelling and Numerical Simulation, Springer, Heidelberg.

**Barlat, F., Lian, J.** (1989). Plastic behaviour and stretchability of sheet metals (Part I): A yield function for orthotropic sheet under plane stress conditions, International Journal of Plasticity, 5:51–56.

**Belytschko, T., Lin, J. I., & Chen-Shyh, T.** (1984). Explicit algorithms for the nonlinear dynamics of shells. Computer methods in applied mechanics and engineering, 42(2), 225-251.

**Belytschko, T., Liu, WK., Moran, B.**(2000), Nonlinear Finite Elements for continua and Structures, John Wiley & Sons Ltd, Chichester.

**Chen, K., Ma, H., Che, L., Li, Z., & Wen, B.** (2019). Comparison of meshing characteristics of helical gears with spalling fault using analytical and finite-element methods. Mechanical Systems and Signal Processing, 121, 279-298.

**Chun, B. K., Jinn, J. T., & Lee, J. K.** (2002). Modeling the Bauschinger effect for sheet metals, part I: theory. International Journal of Plasticity, 18(5-6), 571-595.

**Crawford, R. P., Rosenberg, W. S., & Keaveny, T. M.** (2003). Quantitative computed tomography-based finite element models of the human lumbar vertebral body: effect of element size on stiffness, damage, and fracture strength predictions. Journal of biomechanical engineering, 125(4), 434-438.

**Çapan, L.** (2010). Metallerde Plastik Şekil Verme. Çağlayan Kitabevi, İstanbul,442.

## KAYNAKLAR (Devam Ediyor)

**D.M. Neto, M.C. Oliveira, A.D. Santos, J.L. Alves, L.F. Menezes,** (2017). Influence of boundary conditions on the prediction of springback and wrinkling in sheet metal forming. *International Journal of Mechanical Sciences* 122 244–254.

**Dahale, P. S., Pawar, P. D., & Patil, V. G.** (2018), Assessment of Boundary Conditions for FEA of Mounting Bracket Using Corelation with Experimental Results. *Materials Today: Proceedings*, 5(5), 13290-13300.

**Demirkol M.** (2010), Plastik Şekil Verme Teknolojisi, İTÜ Makine Mühendisliği Bölümü, Ders Notları.

**Elmarakbi, A. M., Hu, N., & Fukunaga, H.** (2009). Finite element simulation of delamination growth in composite materials using LS-DYNA. *Composites Science and Technology*, 69(14), 2383-2391.

**Ertürk T.**(1979) ,Kütle Deformasyon ve Levha Biçimlendirme İşlemlerinde Deformasyon Sınırları ve Biçimlendirilebilme Analizi. , III. Metalürji Kongresi.

**Esener E.** (2015), Plastik Şekil Verme Proseslerinde Form ve Şekillendirme Hatalarının Telafi Edilmesi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği, Doktora Tezi, Sakarya.

**Esener E., Sönmez E., Fırat M.** (2018), Metal Şekillendirme Proseslerinde Sac Açınım Geometrisinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Geliştirilmesi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım Ve Teknoloji, 6(1): 79-89.

**Godest, A. C., Beaugonin, M., Haug, E., Taylor, M., & Gregson, P. J.** (2002). Simulation of a knee joint replacement during a gait cycle using explicit finite element analysis. *Journal of biomechanics*, 35(2), 267-275.

**Groover, Mikell P.**(2010), *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems*, 4th ed., Lehigh University, 978-0470-467002.

**Gürün H.** (2008), “Derin çekme kalıplarındaki parametrelerin deneysel olarak incelenmesi ve bulanık mantık ile tahmini”, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

**Habraken, A. M.** (2004). Modelling the plastic anisotropy of metals. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 11(1), 3-96.

**Harpell, E. T., Worswick, M. J., Finn, M., Jain, M., & Martin, P.** (2000). Numerical prediction of the limiting draw ratio for aluminum alloy sheet. *Journal of Materials Processing Technology*, 100(1-3), 131-141.

**He, B., Yang, W., & Liu, F.** (2019). The material parameter design and finite element simulation of the quadrilateral thermal cloak device. *Applied Mathematics Letters*, 94, 99-104.

## KAYNAKLAR (Devam Ediyor)

**Hill, R.** (1948). A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals, Proc. Roy. Soc. London, 281-297.

**Holloman, J. H.** (1945). Tensile Deformation, Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, 162:268-290.

**Hsu, C.W., Ulsoy, A.G., Demeri M.Y.** (2002), Development of Process Control in Sheet Metal Forming, Journal of Materials Processing Technology, 127, pp. 361-368.

**Hughes, T. J., Liu, W. K., & Zimmermann, T. K.** (1981). Lagrangian-Eulerian finite element formulation for incompressible viscous flows. Computer methods in applied mechanics and engineering, 29(3), 329-349.

**İlhan, A.** (2018). Sac metal şekillendirmede mukavemet artırıcı parametrelerin optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

**Koç, M.**(2008); “Hydroforming for advanced manufacturing”, Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC, Cambridge, 1-28, 216-237.

**Ls-Dyna Theoretical Manual.** (1998). Livermore Software Technology Corporation.

**Macneal, R. H., & Harder, R. L.** (1985). A proposed standard set of problems to test finite element accuracy. Finite elements in analysis and design, 1(1), 3-20.

**Marciniak Z., Duncan J.L., Hu, S.J.** (2002), Mechanics of Sheet Metal Forming. Butterworth Heinemann, Oxford, 82-107.

**Marciniak, Z., Hu, S.J., Duncan, J.L.,** (2002), Mechanics of Sheet Metal Forming, Butterworth-Heinemann, London.

**Mete, O. H.** (2007). Sac levhaların şekillendirilebilirliğine etki eden değişkenliklerin incelenmesi. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi.

**Onur Ç.** (2013), ”Sac Metal Şekillendirme İşlemlerinde Pres Hızı Ve Malzemenin Şekillendirmeye Etkilerinin Deneysel Ve Teorik Olarak İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Eğitimi.

**Özdemir T.** (2013), Motor Biyel Kolunun Baş Kısımının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Nümerik Analizi Üzerine Bir Çalışma, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi, Balıkesir.

**Özdemir N.** (2009), Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Yorulma Mekaniği ve Uygulamaları, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bitirme Çalışması, Trabzon.

**Parthasarathy, V. N., & Kodiyalam, S.** (1991). A constrained optimization approach to finite element mesh smoothing. Finite Elements in Analysis and Design, 9(4), 309-320.

## KAYNAKLAR (Devam Ediyor)

**Rehg, A. J., Kraebber, W. H.** (2008). Bilgisayar Bütünleşik İmalat. ISBN: 978-605-4031-01-6, Değişim Yayınları, İstanbul.

**Schuller** (1998), Metal Forming Handbook, Stuttgart S.143.

**Simith, A.D.**(1990) , “Die Design Handbook”, Society of Manufacturing Engineers, Michigan, 10.1-10.30, 11.1-11.35, 12.1-12.44.

**Swisher, J. R., Hyden, P. D., Jacobson, S. H., & Schruben, L. W.** (2000). A survey of simulation optimization techniques and procedures. In 2000 Winter Simulation Conference Proceedings (Cat. No. 00CH37165) (Vol. 1, pp. 119-128). IEEE.

**Şanay, B.** (2010). Prediction Of Plastic Instability And Forming Limits In Sheet Metal Forming, The Graduate School Of Natural And Applied Sciences Of Middle East Technical University.

**Şener B.** (2015), Otomotiv Sektöründe Kullanılan Derin Çekme Saclarının Şekillendirilebilirlik Analizi, Y.T.Ü., Otomotiv Sektörünün Sorunları, İstanbul.

**Türköz M.** (2009), Al 2024 ve Al 5754 Alaşımli Alüminyum Sacların Şekillendirilebilme Kabiliyetinin Araştırılması, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi.

**Wang Z., Li Y., Liu J., Zhang Y.** (2007) , Evaluation of forming limit in viscous pressure forming of automotive alüminium alloy 6k21-T4 sheet, Trans. Nonferrous Met. Soc., China, 17, 1169-1174.

**Wang, C., Zhang, X., Shen, G., & Wang, Y.** (2019). One-step inverse isogeometric analysis for the simulation of sheet metal forming. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 458-476.

**Wang, L., Basu, P. K., & Leiva, J. P.** (2004). Automobile body reinforcement by finite element optimization. Finite Elements in Analysis and Design, 40(8), 879-893.

**Wu H.Y., Zhou G.Z., Gao Z.W., Chiu C.H.** (2008), Mechanical properties and formability of an Mg-6%Li-1%Zn alloy thin sheet at elevated temperatures, Journal of Materials Processing Technology, 206. 419-424

**Xue, L., & Wierzbicki, T.** (2008). Ductile fracture initiation and propagation modeling using damage plasticity theory. Engineering Fracture Mechanics, 75(11), 3276-3293.

**Yoshida, F., & Uemori, T.** (2002). A model of large-strain cyclic plasticity describing the Bauschinger effect and workhardening stagnation. International journal of plasticity.