

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

SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE SAC  
METALİN BÜKÜM ŞEKİLLERİNE GÖRE  
DEFORMASYONUNUN İNCELENMESİ

Erhan KARATAŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE

2009

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

SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE SAC  
METALİN BÜKÜM ŞEKİLLERİNE GÖRE  
DEFORMASYONUNUN İNCELENMESİ

Erhan KARATAŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI: Yrd. Doç. Dr. A. Zafer ŞENALP

GEBZE

2009



## YÜKSEK LİSANS TEZİ JÜRİ ONAY SAYFASI

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 02/07/2009 tarih ve 2009/15 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 17/09/2009 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Erhan KARATAŞ'IN tez çalışması Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

### JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Yrd. Doç. Dr. A. Zafer ŞENALP

ÜYE

: Yrd. Doç. Dr. İlyas KANDEMİR

ÜYE

: Yrd. Doç. Dr. Erkan ZERGEROĞLU

### ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun  
...../...../20... tarih ve ...../..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

## ÖZET

### TEZ KONU BAŞLIĞI: SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE SAC METALİN BÜKÜM ŞEKİLLERİNE GÖRE DEFORMASYONUNUN İNCELENMESİ

**YAZAR ADI: ERHAN KARATAŞ**

Günümüz teknolojisinin ulaştığı noktada sanayide kullanılan büküm makineleri, işletmelerde minimum maliyetle maksimum verim ve sac metalde yüksek ürün kalitesinin elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Büküm makineleri incelendiğinde makine çeşidi, erkek kalıp yarıçapı ve sac kalınlığının, maliyet, verimlilik ve kaliteyi etkileyen unsurlar olduğu görülmektedir.

Sac metal şekillendirme yöntemlerinde saca nasıl ve ne türlü yöntemler ile şekil verilebileceği ilk aşamada incelenmektedir. Bu şekil verme yöntemlerinden büküm ile saca şekil verme yöntemine göre sacda meydana gelen deformasyonlar, malzeme kalınlığı ve uygulanan kalıpların şekli sonlu elemanlar analizi yöntemi ile incelenmiştir. Bu analizlerin ışığı altında ulaşılan veriler ve yorumlar ile büküm yöntemi, kalıp seçimi ve sac kalınlıklarına göre sac metalin işlenmesinde metalde oluşan deformasyonlar anlaşılabilir ve üretimde sac kalınlıkları ve kalıp seçimi daha doğru yapılması sağlanacaktır.

Tez çalışması oluşturulurken, mantık sıralaması gereğince ilk olarak sac metal hakkında genel bilgi ve sac metal işleme yöntemleri incelenmiş, sonra analizi yapılacak büküm çeşitlerinden birine göre üç boyutlu model yapılmıştır. Literatür çalışmasında sonlu elemanlar yöntemi ile sacda deformasyonlar hakkında bilgi elde edilmiştir. Analiz kısmında oluşan deformasyonlara göre veriler incelenip yorum yapılmıştır. Analizlerde katı model oluşturulurken solidworks ve abaqus programları, nümerik analizler de ise yine abaqus paket programı kullanılmıştır.

Sonuç olarak sac metalde sac kalınlığının artışına, sac metaldeki büküm açısına, kullanılan erkek kalıbın yarıçapına göre kalite verimlilik ve işlenebilirlik göz önünde bulundurularak hangi tip büküm makinesinin seçilebileceği görülmektedir.

Yapılan analizlerde sac kalınlığı ve kalıp yarıçapına göre büküm çeşitleri incelenmiştir. Bunun yanı sıra farklı malzeme çeşitleri ve farklı kalıp şekillerine göre de büküm analizleri yapılarak uygun tipte büküm çeşitleri de değerlendirilebilir.

**Anahtar kelimeler:** Tasarım ve imalat aşamaları, sac metaller, sonlu elemanlar analizi, solidworks, abaqus.

## SUMMARY

**THESIS SUBJECT TITLE: FINITE ELEMENT METHOD WITH SHEET METAL SHAPE BY BENDING DEFORMATION OF THE INVESTIGATION**

**AUTHOR NAME: ERHAN KARATAŞ**

Reached at the point where today's technology is used in industrial bending machines, sheet metal business in the minimum cost and maximum efficiency allows for higher product quality is achieved. Examination of the types of machines for bending machines, punch radius and plate thickness, cost, productivity and quality as factors that affect can be seen.

Sheet metal forming methods how and what kind of sheet metal can be shaped in the first stage of the methods are examined. This method of forming with bending of the sheet metal according to the method of forming sheet metal deformations occurring in materials thickness and the shape of punch with the finite element analysis methods were investigated. This analysis and comments with a bending method, pattern selection and thickness according to the processing of sheet metal in metal deformations which can be understood and production sheet metal thickness and pattern selection will be made more accurate.

Creating a thesis, logic ranking first in accordance with general information about the sheet metal and sheet metal processing methods were examined, the analysis will be performed by bending one of the three-dimensional model variations were made. Finite element method in the literature work sheets with information about the deformation was obtained. According to the analysis of deformation at which data has been reviewed and comments were made. Solid model was created in solidworks and Abaqus analysis programs, numerical analysis is also still used Abaqus package program.

As a result of the increase in thickness of sheet metal, sheet metal bending to the angle of the user according to the radius of punch mold processability, consider the efficiency and quality which type are seen bending machine can be selected.

Analysis according to the thickness and bending radius of mold types were investigated. In addition to these kinds of different materials and different shapes according to pattern analysis was performed, the appropriate type of bending twisting variations can be assessed.

**Keywords:** Design and manufacturing stage, sheet metal bending, finite element analyses, solidworks, abaqus.

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmamdaki katkılarından dolayı, değerli zamanını benden esirgemeyen tez danışmanım sayın Yrd. Doç. Dr. A. Zafer ŞENALP'e ve arkadaşlarım Yaşar TOPRAK ile Murat DEMİREL'e teşekkürlerimi sunarım.

Gebze , EYLÜL 2009

Erhan KARATAŞ

## İÇİNDEKİLER DİZİNİ

|                                                                                             | Sayfa No |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| 1. GİRİŞ                                                                                    | 1        |
| 1.1 Konunun Amacı ve Kapsamı                                                                | 1        |
| 2. SAC METAL (SHEET METAL)                                                                  | 2        |
| 3. SAC METAL ÜRETİM SÜREÇLERİ                                                               | 10       |
| 3.1 Kesme İşlemi                                                                            | 10       |
| 3.2 Punchlama (Zımbalama)                                                                   | 13       |
| 3.3 Form Verme (Kabartı Oluşturma)                                                          | 14       |
| 3.4 Diğer Sac İşleme Yöntemleri                                                             | 15       |
| 3.5 Sac Metal Bükme                                                                         | 17       |
| 3.5.1 V-Büküm                                                                               | 18       |
| 3.5.2 Kenar Büküm                                                                           | 20       |
| 3.6 Amaca Uygun Özel Abkant Kenar Büküm Makinesi Modellenmesi                               | 23       |
| 4. LİTERATÜR TARAMASI                                                                       | 28       |
| 5. SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİ                                                                  | 36       |
| 5.1 Sonlu Elemanlar Teorisi                                                                 | 36       |
| 6. SONLU ELEMENLAR ANALİZİ YÖNTEMİ İLE SAC METALİN BÜKÜM ÇEŞİTLERİNE GÖRE ANALİZİ           | 40       |
| 6.1 Geometri ve Model                                                                       | 40       |
| 6.2 Malzeme Tanımı                                                                          | 42       |
| 6.3 Bağlantı Tanımlamaları                                                                  | 44       |
| 6.4 Sınır Koşulları                                                                         | 45       |
| 6.5 V-Tipi Büküm Yöntemi İle Analiz Sonuçları ve Değerlendirilmesi                          | 45       |
| 6.5.1 V-Tipi Bükümde Erkek Kalıp Çapı R5 İçin Farklı Sac Kalıklarına Göre Analiz            | 45       |
| 6.5.2 V-Tipi Bükümde Erkek Kalıp Çapı R7,5 İçin Farklı Sac Kalıklarına Göre Analiz          | 50       |
| 6.5.3 V-Tipi Bükümde Erkek Kalıp Çapı R10 İçin Farklı Sac Kalıklarına Göre Analiz           | 51       |
| 6.5.4 V-Tipi Bükümde Erkek Kalıp Çapı R12,5 İçin Farklı Sac Kalıklarına Göre Analiz         | 52       |
| 6.6 Kenar Büküm Yöntemi İle Analiz Sonuçları ve Değerlendirilmesi                           | 54       |
| 6.6.1 Kenar Büküm Yönteminde Erkek Kalıp Kenarı 90° İçin Farklı Sac Kalıklarına Göre Analiz | 54       |
| 6.6.2 Kenar Bükümde Erkek Kalıp Çapı R5mm İçin Farklı Sac Kalıklarına Göre Analiz.          | 58       |
| 6.6.3 Kenar Bükümde Erkek Kalıp Çapı R7,5mm İçin Farklı Sac Kalıklarına Göre Analiz.        | 60       |
| 6.6.4 Kenar Bükümde Erkek Kalıp Çapı R10mm İçin Farklı Sac Kalıklarına Göre Analiz          | 61       |
| 6.6.5 Kenar Bükümde Erkek Kalıp Çapı R12,5mm İçin Farklı Sac Kalıklarına Göre Analiz.       | 63       |

|       |                                                                                                       |    |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 6.6.6 | Kenar Bükümde Ters Yönde Erkek Kalıbın Hareketine Göre Analizin R10mm Kalıbına Göre Yeniden Yapılması | 64 |
| 6.7   | Sac Kalınlıklarına Göre Analiz Sonuçları ve Değerlendirmesi                                           | 66 |
| 6.7.1 | 0,6mm Sac Metale Göre Analiz sonuçları ve Değerlendirmesi                                             | 66 |
| 6.7.2 | 0,8mm Sac Metale Göre Analiz Sonuçları Ve Değerlendirmesi                                             | 69 |
| 6.7.3 | 1mm Sac Metale Göre Analiz Sonuçları Ve Değerlendirmesi                                               | 71 |
| 6.7.4 | 1.2mm Sac Metale Göre Analiz Sonuçları Ve Değerlendirmesi                                             | 73 |
| 7.    | SONUÇ                                                                                                 | 75 |
| 8.    | DEĞERLENDİRMELER                                                                                      | 76 |

## ŞEKİL DİZİNİ

| Şekil No                                                                                                   | Sayfa No |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| 3.1.1 Giyotin tip kesme makinesi. [2]                                                                      | 10       |
| 3.1.2 Kesimden hemen önceki durum. (Vural, 2001)                                                           | 11       |
| 3.1.3 Kesim işlemi. (Vural, 2001)                                                                          | 11       |
| 3.1.4 Malzemenin kesilmesi. (Vural, 2001)                                                                  | 12       |
| 3.1.5 Sacın kopması. (Vural, 2001)                                                                         | 12       |
| 3.2.1 Punch makinesi. [2]                                                                                  | 13       |
| 3.2.2 Punch takımının kesme işlemi. (Groover, 2007)                                                        | 14       |
| 3.3.1 Form verme yöntemi. (Vural, 2001)                                                                    | 14       |
| 3.4.1 Hidroform ile şekillendirme. (Vural, 2001)                                                           | 15       |
| 3.4.2 Ütüleme. (Vural, 2001)                                                                               | 15       |
| 3.4.3 Haddeleme. (Vural, 2001)                                                                             | 16       |
| 3.4.4 Sıvama. (Vural, 2001)                                                                                | 16       |
| 3.4.5 Germe. (Vural, 2001)                                                                                 | 17       |
| 3.5.1 Sac metal bükülmesi ile oluşan gerilmeler. (Groover, 2007)                                           | 17       |
| 3.5.1.1 V-büküm. (Groover, 2007)                                                                           | 18       |
| 3.5.1.2 Hidrolik abkant. (Janke, 2005)                                                                     | 19       |
| 3.5.1.3 Abkantta kullanılan V-büküm kalıbı. (Janke, 2005)                                                  | 19       |
| 3.5.2.1 Kenar büküm. (Groover, 2007)                                                                       | 20       |
| 3.5.2.2 Kenar büküm modeli başlangıç aşaması. (Groover, 2007)                                              | 20       |
| 3.5.2.3 Kenar büküm modellemesinde erkek kalıp'ın sacı bükmeye başlaması. (Groover, 2007)                  | 21       |
| 3.5.2.4 Kenar büküm modellemesinde sacın alt kalıba sıvanmaya başlanması. (Groover, 2007)                  | 21       |
| 3.5.2.5 Kenar büküm modellemesinde sacın alt kalıba sıvayarak büküm işleminin bitirilmesi. (Groover, 2007) | 22       |
| 3.5.2.6 El ile çalışan kenar büküm makinesi. (Groover, 2007)                                               | 22       |
| 3.6.1 Salvagnini büküm makinesi. [3]                                                                       | 23       |
| 3.6.2 Kenar bükme abkanti.                                                                                 | 24       |
| 3.6.3 Kenar bükme abkanti çalışması                                                                        | 25       |
| 3.6.4 Sacın makineye oturtulması ve sabitlenmesi.                                                          | 25       |
| 3.6.5 Sacın makineye oturtulması ve sabitlenmesi                                                           | 26       |
| 3.6.6 Sacın yan pistonun yardımıyla bükülmesi                                                              | 26       |
| 3.6.7 Basınçların kaldırılıp sacın alınması                                                                | 27       |
| 3.6.8 Kenar büküm makinesi gerçek resmi                                                                    | 27       |
| 4.1 Sac metal üzerine gelen gerilme analizi uygulaması. (Janke, 2005)                                      | 28       |
| 4.2 Sac metal üzerine gelen gerilme analizi uygulaması. (Janke, 2005)                                      | 29       |
| 4.3 Sac üzerinde uzama dağılımları ve yırtılmanın görünümü. (Kurtuluş, 2004)                               | 30       |
| 4.4 Formlanmış sacın durumu. (Kurtuluş, 2004)                                                              | 30       |
| 4.5 Kalınlık dağılımı. (Kurtuluş, 2004)                                                                    | 31       |
| 4.6 Modellenmiş parça. (Jingjing, 2003)                                                                    | 31       |
| 4.7 Analiz görüntüsü. (Jingjing, 2003)                                                                     | 32       |
| 4.8 V-büküm modellemesi. (Himanshu, 2007)                                                                  | 32       |
| 4.9 Parçanın geometrik modeli. (Himanshu, 2007)                                                            | 33       |
| 4.10 Malzemedeki gerilimin zaman içindeki değişimi. (Himanshu, 2007)                                       | 33       |
| 4.11 Farklı programlara göre analiz sonuçları. (Himanshu, 2007)                                            | 34       |
| 4.12 Tek boyutlu kenar büküm modeli. [5]                                                                   | 34       |
| 4.13 Tek boyutlu analizde deformasyon görüntüsü. [5]                                                       | 35       |

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.14 Analiz sonuçlarının gerinme / deformasyon tablosu. [5]                            | 35 |
| 5.1.1 Sonlu elemanlar için yay benzeşimi. (Turgut, 2003)                               | 38 |
| 5.1.2 Lineer ve non-lineer durum için kuvvet şekil değişimi. (Turgut, 2003)            | 39 |
| 6.1.1 V-büküm tipinde modellenecek parçanın katı modellemesi                           | 41 |
| 6.1.2 V-büküm tipinde modellenecek parçanın rijit body olarak tanımlanan resmi         | 42 |
| 6.5.1.1 Erkek kalıp sacın üzerinde hareket noktasında                                  | 46 |
| 6.5.1.2 Erkek kalıp hareketi ile birlikte deformasyonun başlangıcı                     | 46 |
| 6.5.1.3 Sacdaki deformasyonların belirmesi                                             | 47 |
| 6.5.1.4 Sac metaldeki deformasyonlar                                                   | 47 |
| 6.5.1.5 Sacda meydana gelen deformasyon                                                | 48 |
| 6.5.1.6 En büyük oranda deformasyonun görülmesi                                        | 48 |
| 6.5.2.1 R7,5mm'lik erkek kalıp yarıçapına göre analizin yapılması                      | 50 |
| 6.5.3.1 R10mm'lik erkek kalıp yarıçapına göre analizin yapılması                       | 51 |
| 6.5.4.1 R12,5mm'lik erkek kalıp yarıçapına göre analizin yapılması                     | 53 |
| 6.6.1.1 Kenar büküm analiz modeli                                                      | 55 |
| 6.6.1.2 Kenar bükümde sac deformasyonun başlaması                                      | 55 |
| 6.6.1.3 Kenar bükümde sacın deformasyonun artarak devam etmesi                         | 56 |
| 6.6.1.4 Büküm köşesindeki deformasyon                                                  | 56 |
| 6.6.1.5 Kenar büküm analizinin son hali                                                | 57 |
| 6.6.2.1 R5mm'lik erkek kalıp yarıçapına göre kenar büküm analizi yapılması             | 58 |
| 6.6.3.1 R7,5mm'lik erkek kalıp yarıçapına göre kenar büküm analizi yapılması           | 60 |
| 6.6.4.1 R10mm'lik erkek kalıp yarıçapına göre kenar büküm analizi yapılması            | 61 |
| 6.6.5.1 R12,5mm'lik erkek kalıp yarıçapına göre kenar büküm analizi yapılması          | 63 |
| 6.6.6.1 R10mm'lik erkek kalıp yarıçapına göre ters yönde kenar büküm analizi yapılması | 64 |

## ÇİZELGE DİZİNİ

| Çizelge No                                                                                                | Sayfa No |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| 2.1 Paslanmaz çeliklerin özellikleri ve kullanım alanları. [1]                                            | 3        |
| 2.2 304 Kalite çeliğin kimyasal kompozisyonu. [1]                                                         | 7        |
| 2.3 316 Kalite çeliğin kimyasal kompozisyonu. [1]                                                         | 7        |
| 2.4 430 Kalite çeliğin kimyasal kompozisyonu. [1]                                                         | 7        |
| 2.5 304 Kalite çeliğin mekanik özellikleri. [1]                                                           | 8        |
| 2.6 316 Kalite çeliğin mekanik özellikleri. [1]                                                           | 8        |
| 2.7 430 Kalite çeliğin mekanik özellikleri. [1]                                                           | 9        |
| 6.1.1 V-büküm analiz bilgileri                                                                            | 41       |
| 6.2.1 “Aluminum-killed steel” için gerilme-gerinme diyagramı                                              | 42       |
| 6.2.2 “Aluminum-killed steel” malzemesi için gerilme-gerinme tablosu                                      | 43       |
| 6.4.1 Analizde zaman genlik tablosu                                                                       | 45       |
| 6.5.1.1 R5mm’lik erkek kalıp ile V-bükümde farklı saclarda meydana gelen analiz sonuçları                 | 49       |
| 6.5.1.2 R5mm’lik erkek kalıp uygulandığında gerilme-gerinme eğrisi                                        | 49       |
| 6.5.2.1 R7,5mm’lik erkek kalıp ile V-bükümde farklı saclarda meydana gelen analiz sonuçları               | 50       |
| 6.5.2.2 R7,5mm’lik erkek kalıp uygulandığında gerilme-gerinme eğrisi                                      | 51       |
| 6.5.3.1 R7,5mm’lik erkek kalıp ile V-bükümde farklı saclarda meydana gelen analiz sonuçları               | 52       |
| 6.5.3.2 R10mm’lik erkek kalıp uygulandığında gerilme-gerinme eğrisi                                       | 52       |
| 6.5.4.1 R12,5mm’lik erkek kalıp ile V-bükümde farklı saclarda meydana gelen analiz sonuçları              | 53       |
| 6.5.4.2 R12,5mm’lik erkek kalıp uygulandığında gerilme-gerinme eğrisi                                     | 53       |
| 6.5.4.3 V-tipi bükümde farklı kalıplara göre sac kalınlığı-max. yer değiştirme grafiği                    | 54       |
| 6.6.1 Kenar büküm analiz bilgileri                                                                        | 54       |
| 6.6.1.1 90° erkek kalıp ile kenar bükümde farklı saclarda meydana gelen analiz sonuçları                  | 57       |
| 6.6.1.2 90° erkek kalıp uygulandığında gerilme-gerinme eğrisi                                             | 58       |
| 6.6.2.1 R5mm’lik erkek kalıp ile kenar bükümde farklı saclarda meydana gelen analiz sonuçları             | 59       |
| 6.6.2.2 R5mm’lik erkek kalıp uygulandığında gerilme-gerinme eğrisi                                        | 59       |
| 6.6.3.1 R7,5mm’lik erkek kalıp ile kenar bükümde farklı saclarda meydana gelen analiz sonuçları           | 60       |
| 6.6.3.2 R7,5mm’lik erkek kalıp uygulandığında gerilme-gerinme eğrisi                                      | 61       |
| 6.6.4.1 R10mm’lik erkek kalıp ile kenar bükümde farklı saclarda meydana gelen analiz sonuçları            | 62       |
| 6.6.4.2 R10mm’lik erkek kalıp uygulandığında gerilme-gerinme eğrisi                                       | 62       |
| 6.6.5.1 R12,5mm’lik erkek kalıp ile kenar bükümde farklı saclarda meydana gelen analiz sonuçları          | 63       |
| 6.6.5.2 R12,5mm’lik erkek kalıp uygulandığında gerilme-gerinme eğrisi                                     | 64       |
| 6.6.6.1 R10mm’lik erkek kalıp ile ters yönde kenar bükümde farklı saclarda meydana gelen analiz sonuçları | 65       |
| 6.6.6.2 R10mm’lik ters yönde erkek kalıp uygulandığında gerilme-gerinme eğrisi                            | 65       |
| 6.6.6.3 Kenar bükümde farklı kalıplara göre sac kalınlığı-max. yer değiştirme grafiği                     | 66       |
| 6.7.1.1 0,6mm’lik sac için V-tipi bükümde göre analiz sonuçları                                           | 67       |
| 6.7.1.2 0,6mm’lik sac için V-bükümde kalıp yarıçaplarına göre yer değiştirme                              | 67       |
| 6.7.1.3 0,6mm’lik sac için kenar bükümde göre analiz sonuçları                                            | 68       |
| 6.7.1.4 0,6mm’lik sac için kenar bükümde kalıp yarıçaplarına göre yer değiştirme                          | 68       |
| 6.7.1.5 Büküm şekline göre 0,6mm’lik sacda gerilme-plastik gerinim grafiği                                | 69       |

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| 6.7.2.1 0,8mm'lik sac için V-tipi büküme göre analiz sonuçları                   | 69 |
| 6.7.2.2 0,8mm'lik sac için V-bükümde kalıp yarıçaplarına göre yer değiştirme     | 69 |
| 6.7.2.3 0,8mm'lik sac için kenar büküme göre analiz sonuçları                    | 70 |
| 6.7.2.4 0,8mm'lik sac için kenar bükümde kalıp yarıçaplarına göre yer değiştirme | 70 |
| 6.7.2.5 Büküm şekline göre 0,8mm'lik sacda gerilme-plastik gerinme grafiği       | 70 |
| 6.7.3.1 1mm'lik sac için V-tipi büküme göre analiz sonuçları                     | 71 |
| 6.7.3.2.1mm'lik sac için V-bükümde kalıp yarıçaplarına göre yer değiştirme       | 71 |
| 6.7.3.3 1mm'lik sac için kenar büküme göre analiz sonuçları                      | 72 |
| 6.7.3.4 1mm'lik sac için kenar bükümde kalıp yarıçaplarına göre yer değiştirme   | 72 |
| 6.7.3.5 Büküm şekline göre 1mm sacda gerilme-plastik gerinim grafiği             | 72 |
| 6.7.4.1 1.2mm'lik sac için V-tipi büküme göre analiz sonuçları                   | 73 |
| 6.7.4.2.1.2mm'lik sac için V-bükümde kalıp yarıçaplarına göre yer değiştirme     | 73 |
| 6.7.4.3 1.2mm'lik sac için kenar büküme göre analiz sonuçları                    | 74 |
| 6.7.4.4 1.2mm'lik sac için kenar bükümde kalıp yarıçaplarına göre yer değiştirme | 74 |
| 6.7.4.5 Büküm şekline göre 1.2mm sacda gerilme-plastik gerinim grafiği           | 74 |

## KISALTMA LİSTESİ

|               |                                                            |
|---------------|------------------------------------------------------------|
| $V$           | Hacim                                                      |
| $S$           | Yüzey                                                      |
| $T$           | Birim alana dağıtılmış kuvvet                              |
| $x$           | Bir noktanın kartezyen koordinatlarının vektörel gösterimi |
| $u$           | $x$ noktasının yer değiştirme vektörü                      |
| $f$           | Dağıtılmış kuvvet                                          |
| $p_i$         | $i$ noktasındaki yük kuvveti                               |
| $\sigma$      | gerilme tensörü                                            |
| $n$           | normal vektör                                              |
| $\varepsilon$ | Yer değiştirme vektörü                                     |
| $\nu$         | Poisson oranı                                              |
| $E_x$         | Elastisite modülü                                          |
| $G$           | Malzemenin kayma modülü                                    |
| $D$           | Rijitlik matrisi                                           |
| $J$           | Burkulma sabiti                                            |
| $L_{OA}$      | Tam boy                                                    |
| $L_{BP}$      | Kaimeler arası boy                                         |
| $B$           | Genişlik                                                   |
| $d$           | Çekme                                                      |
| $\rho$        | Yoğunluk                                                   |
| $p$           | Basınç                                                     |
| $\psi$        | Belirli bir deplasman fonksiyonu                           |

## 1. GİRİŞ

Hızlı tüketim ile beraber artan ara ürün ihtiyacı işletmelerde kısa zamanda maksimum kapasitede ürün elde etme zorunluluğu doğurmuştur. Buradaki amaç maliyet, verimlilik ve kaliteyi etkileyen unsurların incelenmesidir.

Günümüz teknolojisinin ulaştığı noktada sanayide kullanılan büküm makineleri, işletmelerde minimum maliyetle maksimum verim ve sac metalde yüksek ürün kalitesinin elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Büküm makineleri incelendiğinde makine çeşidi, erkek kalıp yarıçapı ve sac kalınlığının, maliyet, verimlilik ve kaliteyi etkileyen unsurlar olduğu görülmektedir.

Bu bağlamda makine çeşidi, erkek kalıp yarıçapı ve sac kalınlığının sonlu elemanlar analizi yöntemine göre incelendiğinde verimliliği ne şekilde etkilediği ortaya çıkarılacaktır.

### 1.1 Konunun Amacı ve Kapsamı

Bu yüksek lisans tezi, sanayide ve günlük alanlarda en çok kullanılan metal çeşitlerinden birisi olan sac metal (sheet metal) hakkında genel bilgilerin verilmesi ve sac metal şekillendirme yöntemlerinin incelenmesini amaçlamaktadır.

Sac metal şekillendirme yöntemlerinde saca nasıl ve ne türlü yöntemler ile şekil verilebileceği ilk aşamada incelenmektedir. Bu şekil verme yöntemlerinden büküm ile saca şekil verme yöntemine göre sacda meydana gelen deformasyonlar, malzeme kalığı ve uygulanan kalıpların şekli sonlu elemanlar analizi yöntemi ile incelenmiştir. Bu analizlerin ışığı altında ulaşılan veriler ve yorumlar ile büküm yöntemi, kalıp seçimi ve sac kalınlıklarına göre sac metalin işlenmesinde metalde oluşan deformasyonlar anlaşılabilir ve üretimde sac kalınlıkları ve kalıp seçimi daha doğru yapılması sağlanacaktır.

Tez çalışması oluşturulurken, mantık sıralaması gereğince ilk olarak sac metal hakkında genel bilgi ve sac metal işleme yöntemleri incelenmiş, sonra analizi yapılacak büküm çeşitlerinden birine göre üç boyutlu model yapılmıştır. Literatür çalışmasında sonlu elemanlar yöntemi ile sacda deformasyonlar hakkında bilgi elde edilmiştir. Analiz kısmında oluşan deformasyonlara göre veriler incelenip yorum yapılmıştır.

## 2. SAC METAL (SHEET METAL)

Sac metal genel olarak metallerin haddeleme işleminden geçtikten sonra kalınlığı 0,4mm ile 6mm arasında olan levhalar olarak adlandırılır. Sac metal işlemleri genellikle soğuk şekil verme işlemi olarak gerçekleşir.

Sac metalin endüstride kullanıldığı yerler otomobiller, kamyonlar, uçaklar, demiryolu vagon ve lokomotifleri, tarım ve inşaat donanımları, evlerde kullanılan küçük ve büyük boy ev aletleri, çamaşır makinesi, bulaşık makinesi, fırın, buzdolabı, bilgisayar parçaları ve ofis elemanları v.b.'dir.

Sac metal parçanın üstünlüklerini ise yüksek dayanım, yüksek boyutsal doğruluk, iyi yüzey kalitesi, nispeten düşük maliyet, büyük miktarda ekonomik seri üretim diye sıralayabiliriz. (Vural, 2001)

Bir makineyi veya herhangi bir ara parçayı sac metalden üretebilmek için ilk önce parçaların mekanik özelliklerinin ve nerelerde kullanılacağını bililmeli ve o doğrultuda seçim yapılmalıdır.

Sac metal malzeme grupları çok fazla çeşitlilik göstermektedir. Bunlardan en çok kullanılanları galvaniz sac, siyah (dkp) sac ve paslanmaz çelik sac metaller olarak adlandırılır. Aşağıdaki tabloda paslanmaz çeliklerin özellikleri ve kullanım alanları yer almaktadır.

Çizelge 2.1 Paslanmaz çeliklerin özellikleri ve kullanım alanları. [1]

| Sınıflandırma |      | Özellikleri                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Kullanım alanları                                                                                                                                                                                                                                                     |
|---------------|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ostenitli     | 304  | En yaygın kullanımı olan çelik tipidir. 304 iyi korozyon direnci, sıcaklığa direnci, düşük sıcaklık derecelerindeki mukavemeti ve mekanik özellikleri ile bilinir. 304'ün çekilebilirlik özelliği derin çekme ve bükmede olduğu gibi çok iyidir, ısı ile işlemle sertleştirilmemiştir. (Manyetik değildir, kullanma aralığı $-196 \approx +800\text{ }^{\circ}\text{C}$ )                             | Mutfak eşyaları, evye, dahili borular, sıcak su kazanları, banyo küvetleri, kazanlar, otomobil parçaları (silecek, susturucu vb.) tıbbi aletler, inşaat malzemeleri, kimya tesisleri, süt ve gıda endüstrisi, gemi parçalarında kullanılır.                           |
|               | 304L | 304L 304 çeliğin düşük karbonlu sürümüdür. Normal koşullarda korozyon direnci 304 ile aynıdır. Gerilim giderme ve kaynak sonrası taneler arası korozyona karşı direnci mükemmeldir. Isıl işlem olmaksızın korozyon direnci özellikleri vardır ve genellikle $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin altında kullanılır. (Manyetik değildir, kullanma aralığı $-196 \approx +800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) | Kimya sanayinde kullanılan makine ve donanımlarında, yüksek taneler arası korozyon direncine ihtiyaç duyulan kömür ve petrol endüstrisinde, inşaat malzemelerinde, ısıya dayanıklı aletlerin parçalarında ve ısı ile işlem uygulaması zor olan parçalarda kullanılır. |

| Sınıflandırma |       | Özellikleri                                                                                                                                                                        | Kullanım alanları                                                                                                                                                                                         |
|---------------|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Östenitli     | 309   | Bakır ilavesi ile anti mikrobik özelliğe ve iyi çekilebilirliğe sahiptir. Hijyenik ortam ihtiyaç duyulan derin çekme ürünlerde kullanışlıdır.                                      | Termos, mutfak evyeleri, çaydanlık, yiyecek servis gruplarında, kapı tokmaklarında, hızlı dönme gerektiren ürünlerde kullanılır.                                                                          |
|               | 310   | 304 çeliğin içeriğindeki S ve Mn `yi düşürüp sünekliliğin azalmasını engellemek için N ilave edilmesiyle elde edilen çelik tipidir. Mukavemet arttırılmış, kalınlık azaltılmıştır. | Yapı, inşaat, cadde aydınlatmaları, su tankları, su boruları.                                                                                                                                             |
|               | 304LN | N ilavesi ile mukavemeti ve taneler arası korozyon direnci artırılmıştır.                                                                                                          | Yapı – İnşaat, ısı eşanjörleri, kimyasal tankerlerde.                                                                                                                                                     |
|               | 316   | Mükemmel korozyon direnci, oyuk korozyonu direnci ve Mo ilavesi ile yüksek sıcaklık dayanımı.                                                                                      | Deniz suyu teçhizatında, kimyasallarda kullanılan teçhizatta, kâğıt, boya, asetik asit, gübre, fotoğraf ve gıda endüstrisi, deniz kenarı yapılarında, halatlarda, çubuk, cıvata ve somunlarda kullanılır. |

| Sınıflandırma |       | Özellikleri                                                                                                                                                                                  | Kullanım alanları                                                                                                                                                                              |
|---------------|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Östenitli     | 316L  | Düşük karbonlu çelik tipi, 316 `nın normal özelliklerine artı olarak mükemmel taneler arası korozyon direnci vardır.                                                                         | Deniz suyu teçhizatında, kimyasallarda kullanılan teçhizatta, kâğıt, boya, asetik asit, gübre, fotoğraf ve gıda endüstrisi, deniz kenarı yapılarında, halatlarda, çubuk, cıvata ve somunlarda. |
|               | 316Ti | Korozyon direnci 316 ile benzerdir. Yüksek sıcaklıklarda çok yüksek bir oksidasyon direnci vardır.                                                                                           | Kimya, petrokimya, gıda, tekstil ve kâğıt endüstrisinde.                                                                                                                                       |
|               | 310S  | 304`e benzer özellikleri vardır. Mekanik özellikleri ve korozyon direnci 304 den daha iyidir. Kaynaklanabilirlik özelliği çok iyidir ve 1200 ° C ye kadar çok iyi oksidasyon direnci vardır. | Endüstriyel fırın parçaları, yakıt ve özel boru hatları, boya endüstrisi ve petrol rafinasyonu                                                                                                 |
|               | 321   | Ti ilavesi ile taneler arası korozyon engellenir. 430 ° C - 900 ° C arası sıcaklıklar için uygundur.                                                                                         | Uçak egzost boruları, kazanlar, ısı eşanjörleri.                                                                                                                                               |

| Sınıflandırma |        | Özellikleri                                                                                                                                                      | Kullanım alanları                                                                                                                                                            |
|---------------|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ferritli      | 420    | Ni içermez,.manyetiktir.                                                                                                                                         | Bıçak üretimi.                                                                                                                                                               |
|               | 430    | 430 temel ferritli çelik tipidir.430 düşük ısı genleşme oranı ve mükemmel çekme ve oksidasyon direnciyle bilinir.                                                | Isıya dayanıklı aletlerde, üç tabanlı çaydanlık tabanlarında, gaz memeleri, ev aletleri, kuvvet kaplamaları, inşaat malzemelerinde, cıvata ve somunlarda çubuklar, eleklere. |
|               | 430J1L | Mo,Yi ve Nb ilavesi iyi korozyon direnci, kaynaklanabilirlik ve yüksek sıcaklık oksidasyon direnci sağlar.                                                       | Çamaşır makinesi tamburları, otomobil egzostları, elektrik aletleri parçaları.                                                                                               |
|               | 409    | Ti ilavesi ile iyi kaynaklanabilirlik ve çekilebilme özellikleri sağlanır.                                                                                       | Otomobil egzost boruları ılık su teçhizatları.                                                                                                                               |
| Martenzitli   | 410    | 410 iyi mukavemet özellikleri ile bilinen temel martenzitli çelik tipidir. Fakat darbeli korozyon koşulları için uygun değildir. 410 ısıl işleme sertleştirilir. | Bıçak, makine parçaları, petrol rafinasyon aparatları, cıvata, somun, pompa şaftları, çatal-kaşık imalatında                                                                 |

Çizelge 2.2 304 Kalite çeliğin kimyasal kompozisyonu. [1]

| 304 Kalite çeliğin kimyasal kompozisyonu |                  |         |       |       |         |         |              |
|------------------------------------------|------------------|---------|-------|-------|---------|---------|--------------|
| SX                                       | oC               | Mn      | P     | S     | Si      | Cr      | Ni           |
| 304                                      | 0.08<br>max 0.03 |         | 0.045 | 0.030 |         | 18.0 to | 8.0 to 10.50 |
| 304L                                     | max              | 2.0 max | max   | max   | 1.0 max | 20.0    | 8.0 - 12.0   |

Çizelge 2.3 316 Kalite çeliğin kimyasal kompozisyonu. [1]

| 316 Kalite çeliğin kimyasal kompozisyonu |             |            |              |              |            |                 |                 |                 |                        |
|------------------------------------------|-------------|------------|--------------|--------------|------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------------|
|                                          | C           | Mn         | P            | S            | Si         | Cr              | Ni              | Mo              | Ti                     |
| SX316                                    | 0.08<br>max | 2.0<br>max | 0.045<br>max | 0.030<br>max | 1.0<br>max | 16.0 to<br>18.0 | 10.0 to<br>14.0 | 2.00 to<br>3.00 | -                      |
| SX316L                                   | 0.03<br>max |            |              |              |            |                 |                 |                 | 0.5<br>max<br>5X%<br>C |
| SX316Ti                                  | 0.08<br>max |            |              |              |            |                 |                 |                 |                        |

Çizelge 2.4 430 Kalite çeliğin kimyasal kompozisyonu. [1]

| 430 Kalite çeliğin kimyasal kompozisyonu |             |            |              |             |         |           |  |
|------------------------------------------|-------------|------------|--------------|-------------|---------|-----------|--|
| Analiz %                                 | oC          | Mn         | P            | S           | Si      | Cr        |  |
| ASTM A 240                               | 0.12<br>max | 1.0<br>max | 0.045<br>max | 0.03<br>max | 1.0 max | 16.0-18.0 |  |
| Tipik                                    | 0.05        | 0.7        | 0.021        | 0.024       | 0.6     | 17        |  |

Çizelge 2.5 304 Kalite çeliğin mekanik özellikleri. [1]

| 304 Kalite çeliğin mekanik özellikler (oda sıcaklığında) |       |       |       |       |
|----------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|                                                          | 304   |       | 304L  |       |
|                                                          | Tipik | En az | Tipik | En az |
| Çekme Mukavemeti, MPa                                    | 600   | 515   | 590   | 485   |
| Akma Mukavemeti, (Offset 0.2 %), MPa                     | 310   | 205   | 310   | 170   |
| Uzama / (% in 50mm)                                      | 60    | 40    | 60    | 40    |
| Sertlik / (Brinell)                                      | 170   | -     | 170   | -     |
| Yorulmaya dayanma limiti / MPa                           | 240   | -     | 240   | -     |

Çizelge 2.6 316 Kalite çeliğin mekanik özellikleri. [1]

| 316 Kalite çeliğin mekanik özellikler (Oda sıcaklığında) |       |       |        |       |         |       |
|----------------------------------------------------------|-------|-------|--------|-------|---------|-------|
|                                                          | SX316 |       | SX316L |       | SX316Ti |       |
|                                                          | Tipik | En az | Tipik  | En az | Tipik   | En ez |
| Çekme Mukavemeti, MPa                                    | 580   | 515   | 570    | 485   | 600     | 515   |
| Akma Gerilimi, MPa                                       | 310   | 205   | 300    | 170   | 320     | 205   |
| Uzama(% in L = 5.65 So)                                  | 55    | 40    | 60     | 40    | 50      | 40    |
| Sertlik                                                  | 165   | -     | 165    | -     | 165     | -     |
| Yorulmaya dayanma limiti, MPa                            | 260   | -     | 260    | -     | 260     | -     |

Çizelge 2.7 430 Kalite çeliğin mekanik özellikleri. [1]

| 430 Kalite çeliğin mekanik özellikleri (oda sıcaklığında) |       |       |
|-----------------------------------------------------------|-------|-------|
|                                                           | Tipik | En az |
| Çekme Mukavemeti                                          | 530   | 450   |
| Akma Mukavemeti,<br>MPa                                   | 360   | 205   |
| Uzama (% in $L_0=5.65$<br>So) MPa                         | 25    | 22    |
| Sertlik (Brinell)                                         | 160   | -     |

### 3. SAC METAL ÜRETİM SÜREÇLERİ

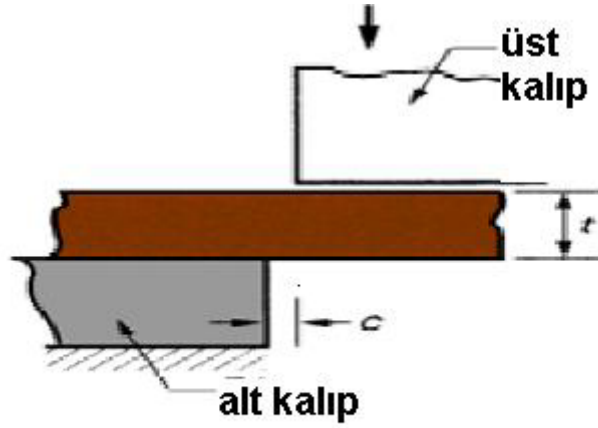
Ana başlıklar altında imalat süreçlerinin kısa bir literatür çalışması gösterilecektir. Sac metal işleminin genel türleri; kesme, delme(işleme), bükme, kaynak aşamalarından oluşmaktadır. Üretimde üretilecek parçaların ilk önce ölçüleri tam olarak belirlenir sonra kesme işlemi ile istenilen ölçülere getirilir. Devamında erkek kalıplarla veya dişi kalıplarla şekil verilir, gerekli yerleri var ise bükme işlemi yapılır. En son montaj işlemleri ya kaynak ya da somun cıvatalar yardımı ile birleştirilir.

#### 3.1 Kesme İşlemi

Kesme işlemi, sac metali kenarlarından belirli ölçülere getirebilmek için kullanılan bir yöntemdir. Şekil 3.1.1’ de giyotin tip kesme makinesi görülmektedir. Giyotin tip kesmede sac levhanın bir kenarı tablanın yan tarafına dayandırılır. Kesim ölçülerine göre kesilecek taraf nümerik kontrol mekanizması yardımıyla giyotin makasın arkasında olan dayama hareket ettirilir ve tam istenilen ölçülere göre parçanın kesim işlemi tamamlanmış olur. (Janke, 2005) Kesme işleminin aşamaları aşağıdaki gibidir. Parçanın kesilmeden hemen önceki hali şekil 3.1.2’de görülmektedir.

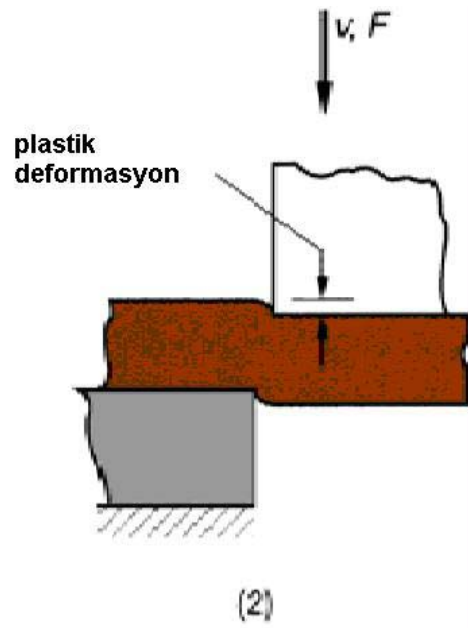


Şekil 3.1.1 Giyotin tip kesme makinesi. [2]



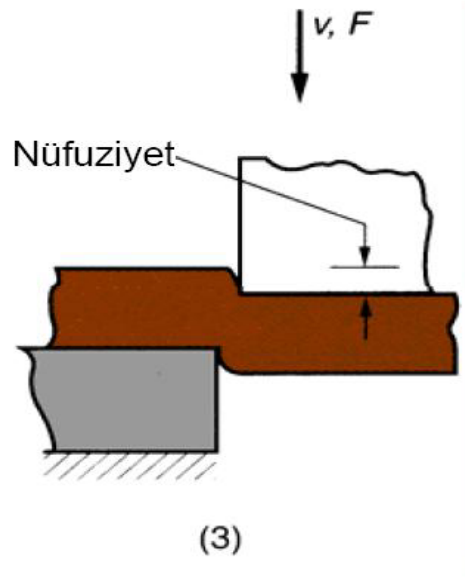
Şekil 3.1.2 Kesimden hemen önceki durum. (Vural, 2001)

Şekil 3.1.3'te iki kesici kenar arasında metal sacın kesilmesiyle erkek kalıp, plastik deformasyona neden olarak parçayı itmeye başlıyor.



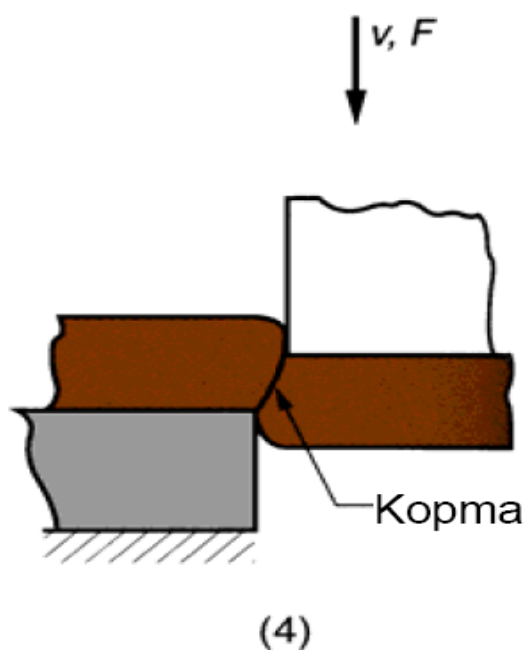
Şekil 3.1.3 Kesim işlemi. (Vural, 2001)

Şekil 3.1.4'te erkek kalıp, düz bir kesme yüzey oluşturacak şekilde, parçayı sıkıştırıp nüfuz ediyor. Bu aşamada yaklaşık olarak sacın üçte biri kesilir.



Şekil 3.1.4 Malzemenin kesilmesi. (Vural, 2001)

Şekil 3.1.5'te üzerine uygulanan kuvvet ile sacın belirli bölgeden sonra kesme işlemi tamamlanır ve sac kopma eğilimi göstererek sürecini tamamlar.



Şekil 3.1.5 Sacın kopması. (Vural, 2001)

### 3.2 Punchlama (Zımbalama)

Punchlama (zımbalama) sacın üzerinde belirli delik veya şekilleri oluşturmak için kullanılan bir yöntemdir. Punch makineleri CNC kontrol ünitesi sahip taretinde kesici erkek takımları ve kesici erkek takımlara uygun alt (die) takımları bulunan makinelerdir (Şekil 3.2.1).



Şekil 3.2.1 Punch makinesi. [2]

Punchl işlemi, yuvarlak, kare, dikdörtgen veya sipariş üzerine yapılmış istenilen şekli özel takımlar yardımı ile sacın üzerine bilgisayar destekli program ile çok düşük toleranslarda işlemeye yarayan bir makinedir. Makinenin çalışma prensibi:

- Sac parçanın makinenin tablasına yerleştirilmesi,
- Tablanın üzerindeki sıfır konumlandırıcıları ve tutucular ile tablaya tutturulması,
- Sac tutucu yardımıyla takımların bulunduğu taret bölgesine yönlendirilmesi,

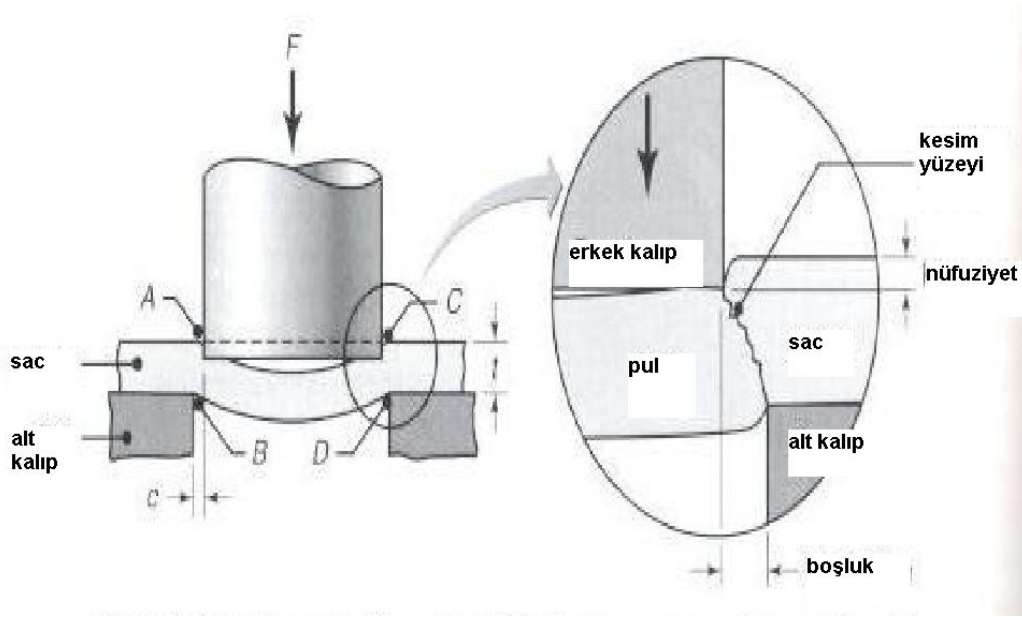
Sac metal bilgisayardan aldığı komutlar yardımıyla taret bölgesine getirilir, kesici takımlar ile kuvvet uygulanır ve kesme işlemi tamamlanır. Erkek kalıplarda kesme kuvveti hesabı  $F=S.L.t$  olarak hesaplanır.

$F$ =kesme kuvveti,

$S$ =Metalin kayma dayanımı,

$T$ =blok kalınlığı,

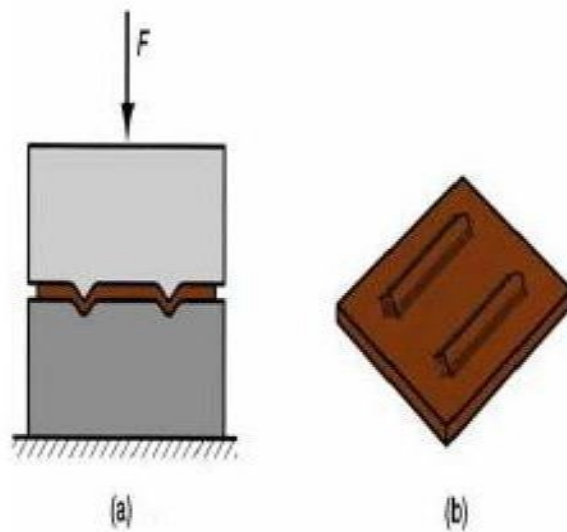
$L = \text{kesme kenar boyu}$



Şekil 3.2.2 Punch takımının kesme işlemi. (Groover,2007 )

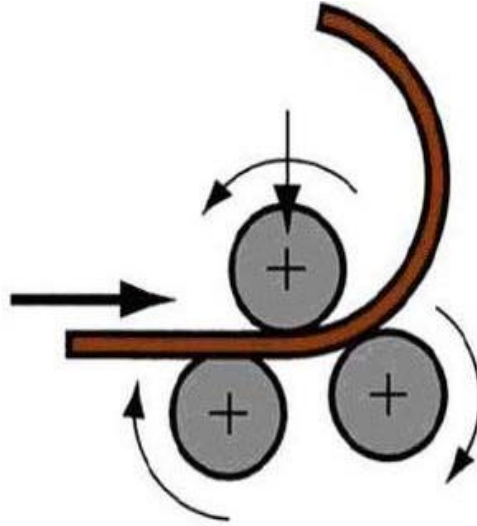
### 3.3 Form Verme (Kabartı Oluşturma)

Kabartı oluşturma işlemi, sac metal üzerinde oluşturulan şekillerin kalıplara işlenip, kalıpların sacın yüzeyine uygulanan kuvvetin etkisiyle işlenmesidir. (Vural, 2001)

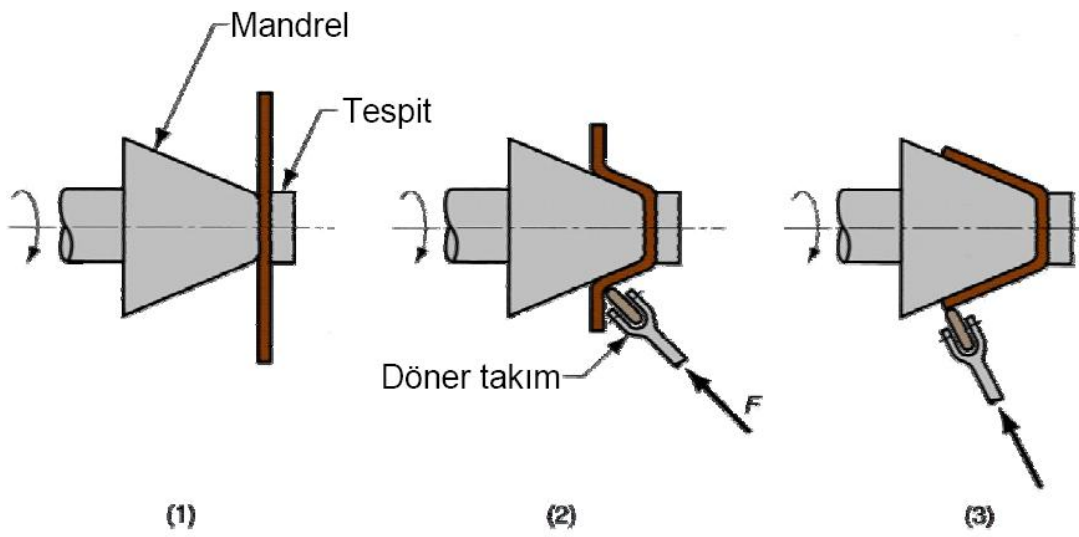


Şekil 3.3.1 Form verme yöntemi. (Vural, 2001)

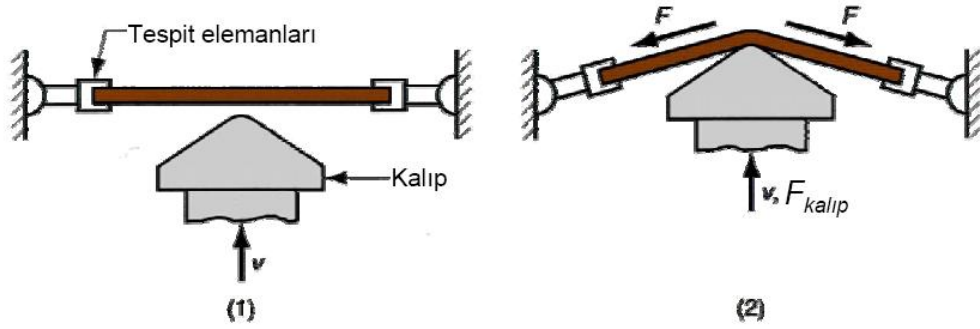




Şekil 3.4.3 Haddeleme. (Vural, 2001)



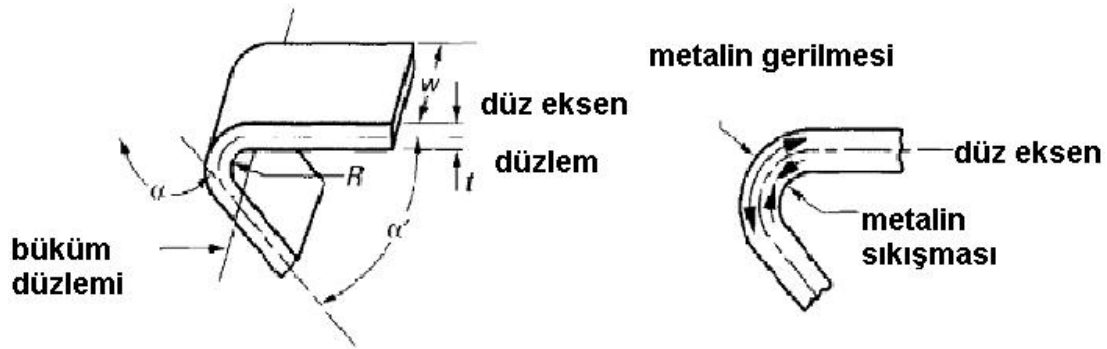
Şekil 3.4.4 Sıvama. (Vural, 2001)



Şekil 3.4.5 Germe. (Vural, 2001)

### 3.5 Sac Metal Bükme

Bükme bir sacın üzerine yüklenen yük ile sacın düz eksen etrafında oluşan gerilmeler olarak tanımlanır. Sac bu yükleme sonucunda şekil değiştirir. Metalin iç kısmı düz eksene göre sıkışır. Metalin dış kısmı düz eksene göre gerilir. [6]



Şekil 3.5.1 Sac metal bükülmesi ile oluşan gerilmeler. (Groover, 2007)

$\alpha$  = büküm açısı

$w$  = sacın genişliği

$R$  = büküm yarıçapı

$t$  = sacın kalınlığı

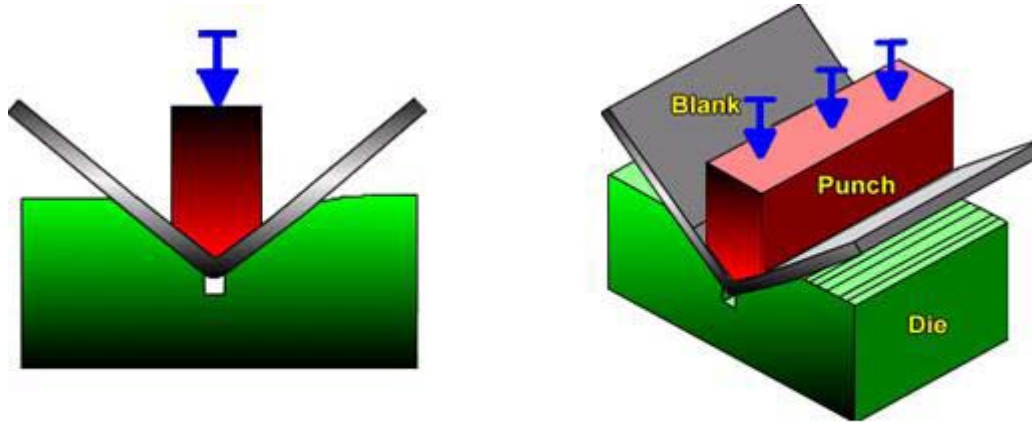
$\alpha' = 180^\circ - \alpha$ , hesap açısı

Yaygın olarak kullanılan 2 büküm çeşidi vardır.

- V-büküm
- Köşe büküm

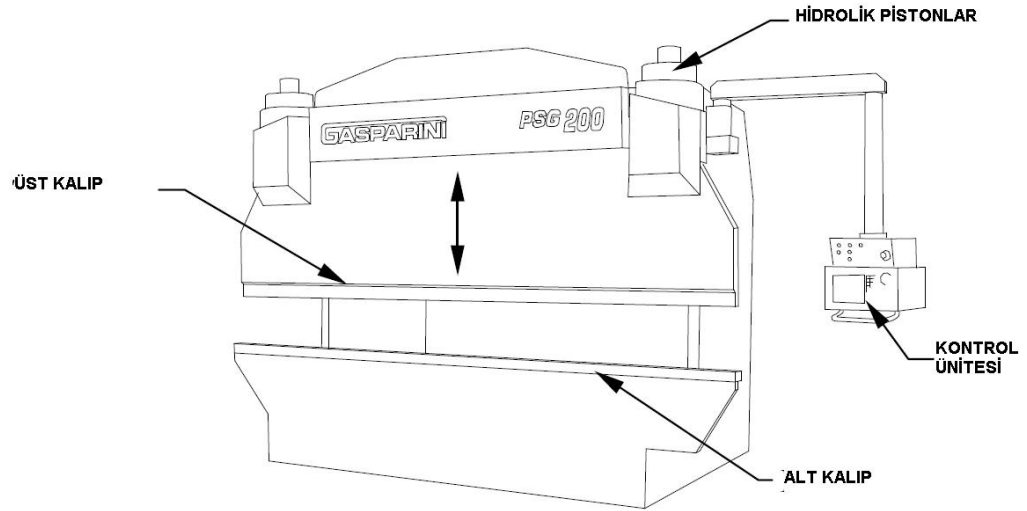
### 3.5.1 V-Büküm

V-büküm V şeklindeki alt ve üst kalıbın saca uygulanması sonucu oluşan bir büküm yöntemidir. Az sayıda imalat için uygundur. Genel olarak ucuz kalıp maliyeti vardır. Bükme yöntemi aşağıdaki şekilde gibidir.

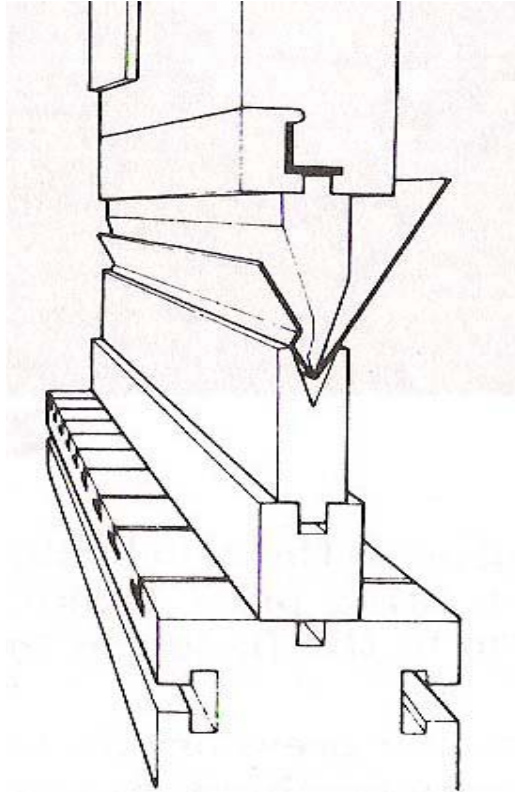


Şekil 3.5.1.1 V-büküm. (Groover, 2007)

En yaygın kullanımı olan hidrolik abkantlar aşağıdaki şekilde gösterildiği gibidir.



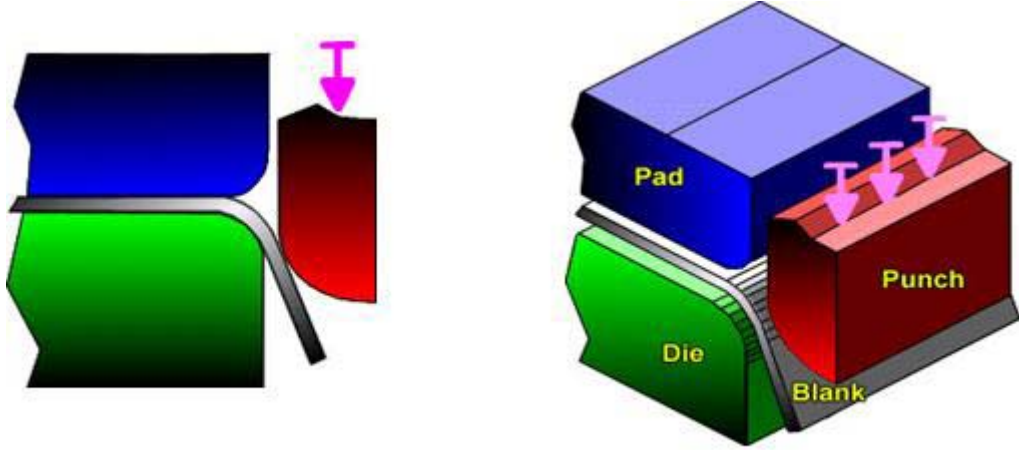
Şekil 3.5.1.2 Hidrolik abkant. (Janke, 2005)



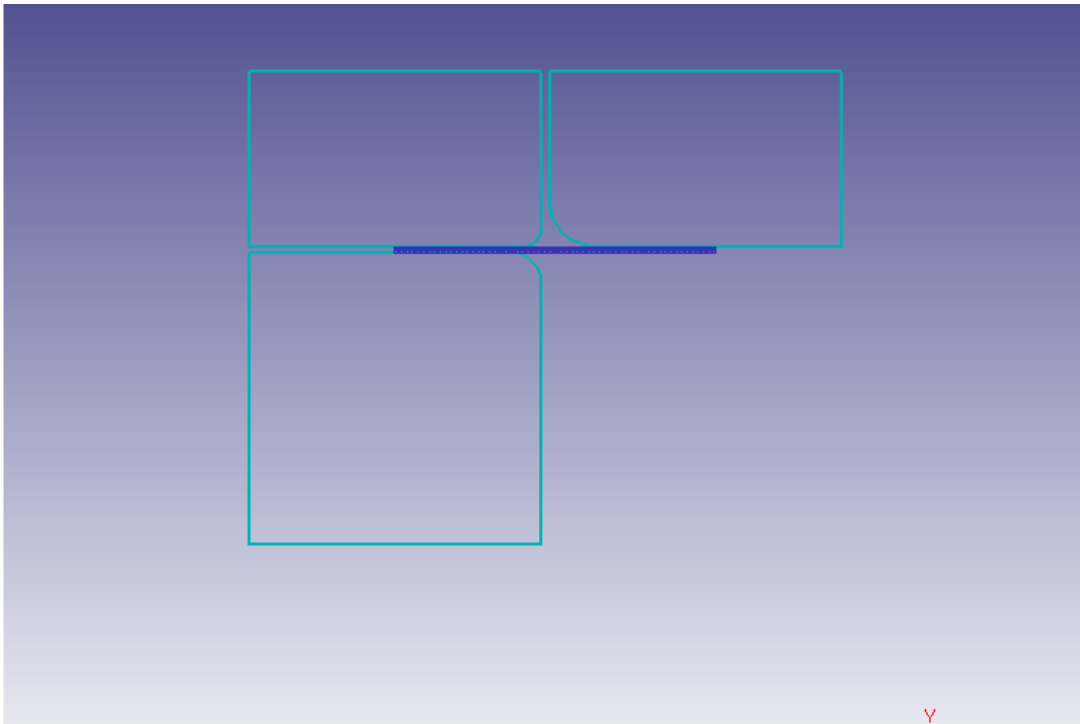
Şekil 3.5.1.3 Abkantta kullanılan V-büküm kalıbı. (Janke, 2005)

### 3.5.2 Kenar Büküm

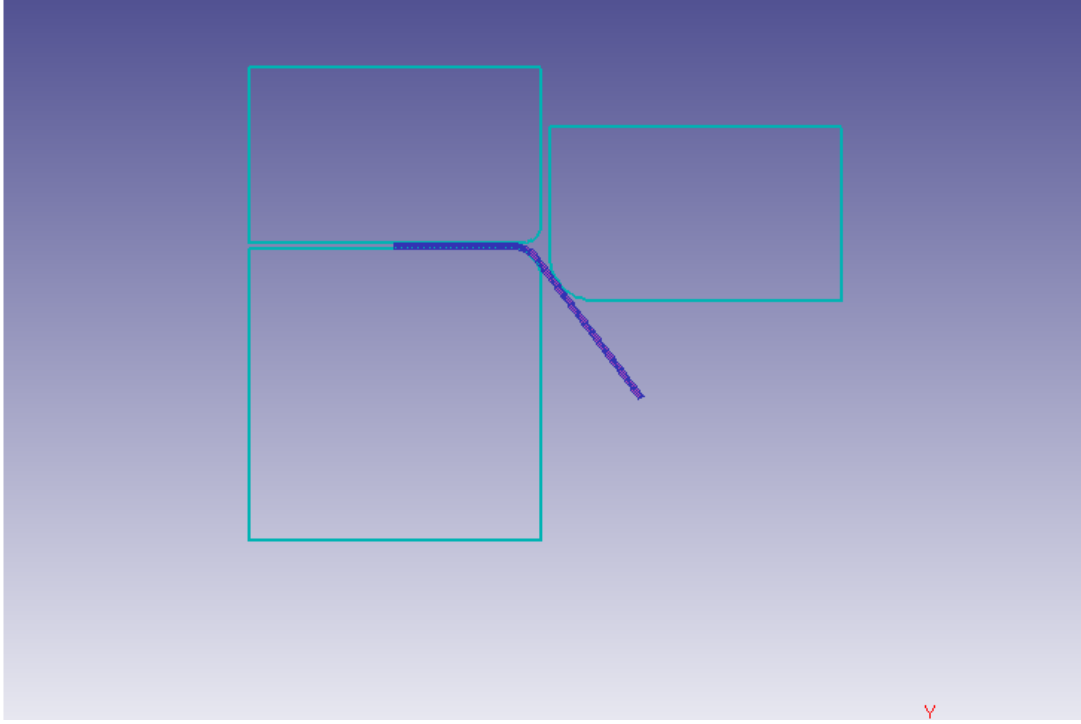
Kenar bükümde birden fazla yükleme vardır. Bu yöntemde, ilk önce alt kalıp üst kalıp tarafından sıkıştırılarak sacın sabitlenmesi işlemi yapılır. Daha sonra bükme için ikinci olan erkek kalıp saca kuvvet uygulayarak büküm işlemini tamamlar.



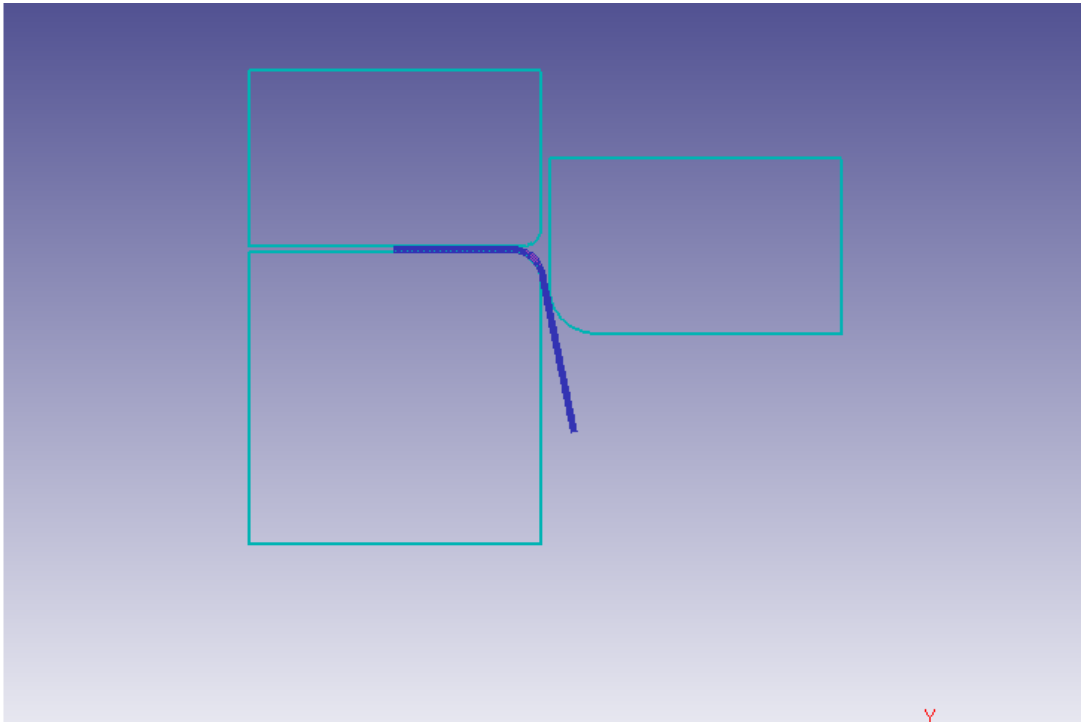
Şekil 3.5.2.1 Kenar büküm. (Groover, 2007)



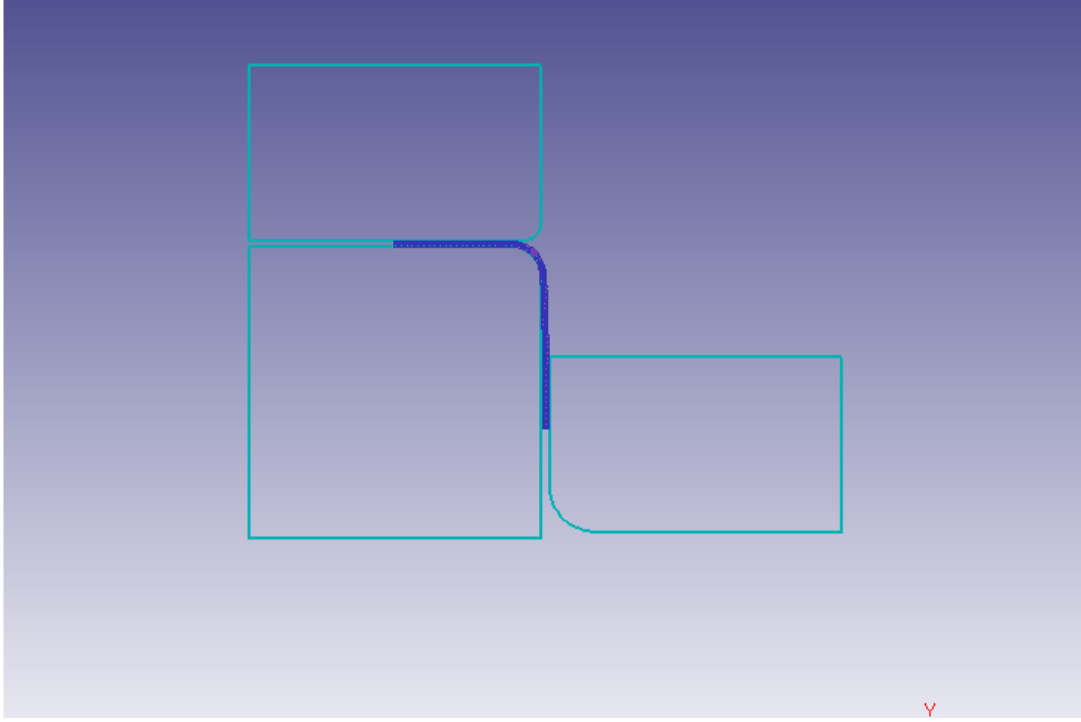
Şekil 3.5.2.2 Kenar büküm modeli başlangıç aşaması. (Groover, 2007)



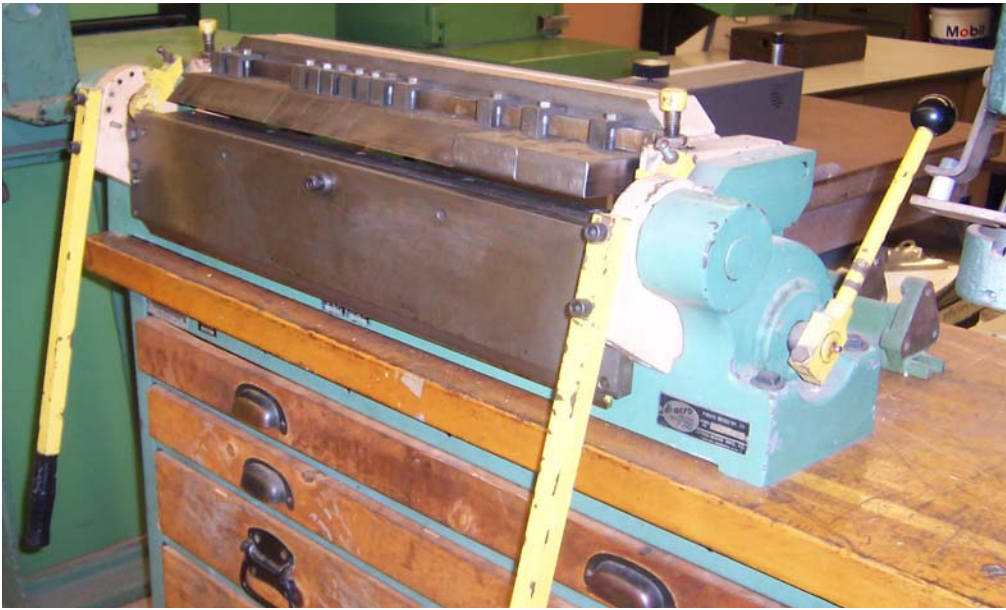
Şekil 3.5.2.3 Kenar büküm modellemesinde erkek kalıp'ın sacı bükmeye başlaması. (Groover, 2007)



Şekil 3.5.2.4 Kenar büküm modellemesinde sacın alt kalıba sıvanmaya başlanması. (Groover, 2007)



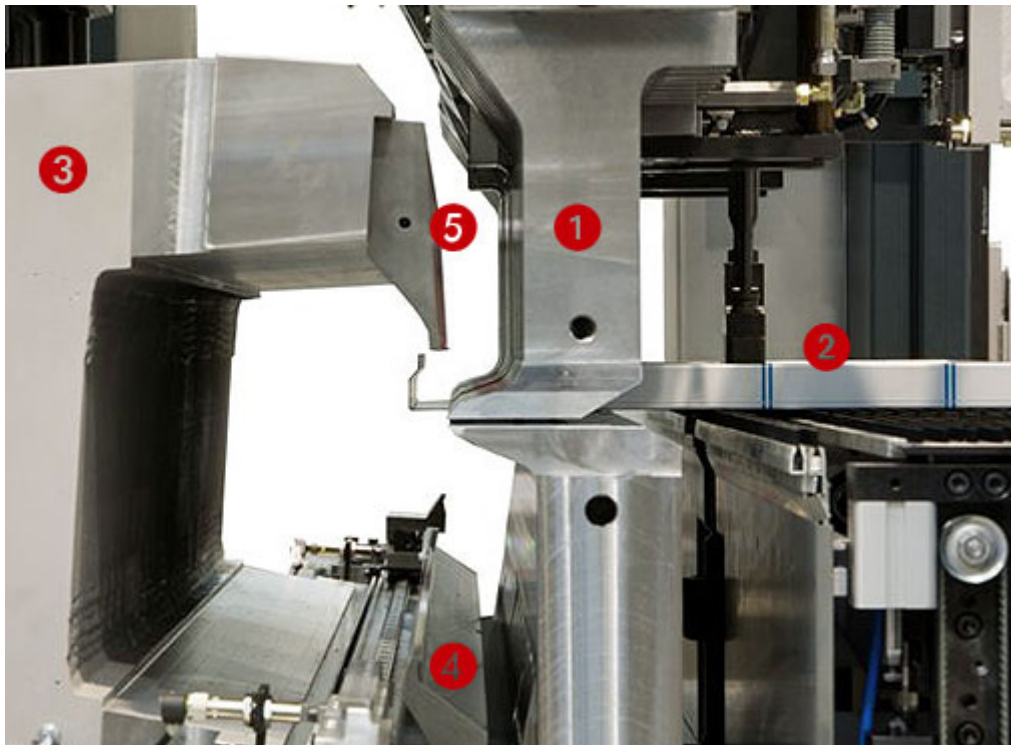
Şekil 3.5.2.5 Kenar büküm modellemesinde sacın alt kalıba sıvayarak büküm işleminin bitirilmesi. (Groover, 2007)



Şekil 3.5.2.6 El ile çalışan kenar büküm makinesi. (Groover, 2007)

### 3.6 Amaca Uygun Özel Abkant Kenar Büküm Makinesi Modellenmesi

Amaca uygun özel abkant kenar büküm makinesi modellenmesi, özel parçaların imalatı için parçaların ihtiyacını görececek özel büküm makineleri imal edilmesi, üretimin hızlanması ve daha kaliteli bükümlerin ortaya çıkmasını sağlamaktadır. Bu nedenle Fagor Endüstriyel A.Ş.'de bulaşık makinelerinin küvet saclarının imalatı için özel bir kenar büküm makinesi modelleme çalışması yapılmıştır. Dünyadaki en büyük büküm ve erkek kalıp makineleri üreticilerinden biri olan Salvagnini'nin büküm makinesinde esinlenerek kenar bükme makinesi tasarım ve üretimine başlandı.

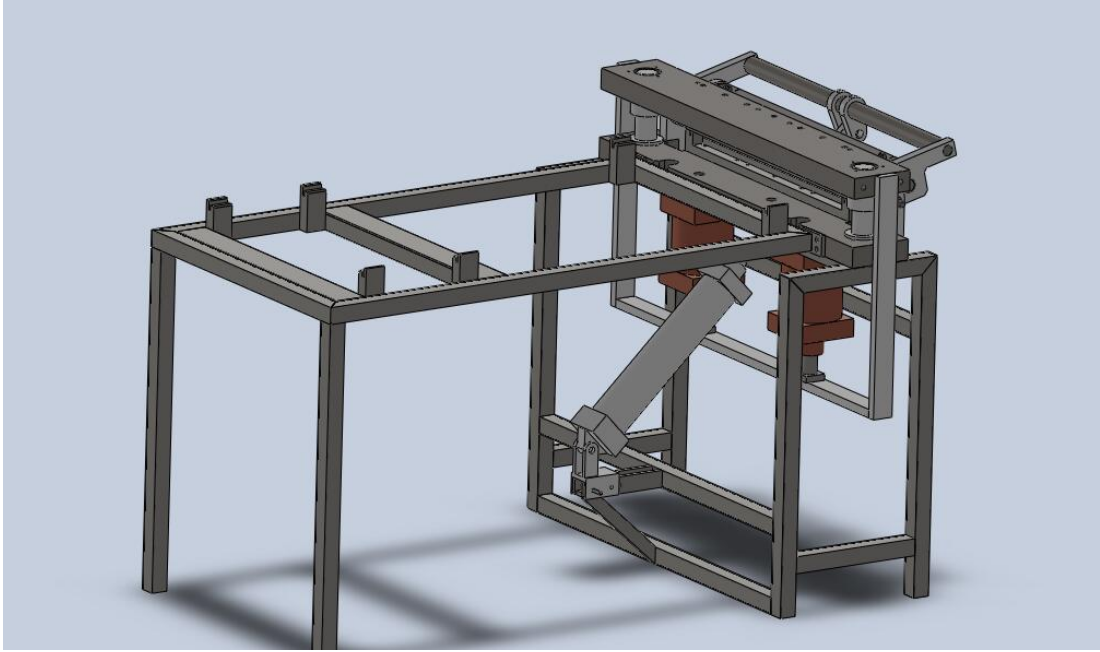


Şekil 3.6.1 Salvagnini büküm makinesi. [3]

Salvagnininin bu makinesinde çift taraflı kenar bükme prensibi vardır. Bu makine 2 ile gösterilen sac 1 ile gösterilen sıkma kalıbıyla sıkılarak sabitlenir. 4 ve 5 ile gösterilen büküm kalıpları parçanın büküm yönüne göre alttan veya üstten tahrik uygulayarak parçanın bükümü tamamlanır. Bilgisayar kontrolü ile sac ilerleyerek yeni büküm yerine getirilir veya büküm işlemi tamamlanıp diğer parçayı makineye bağlar.

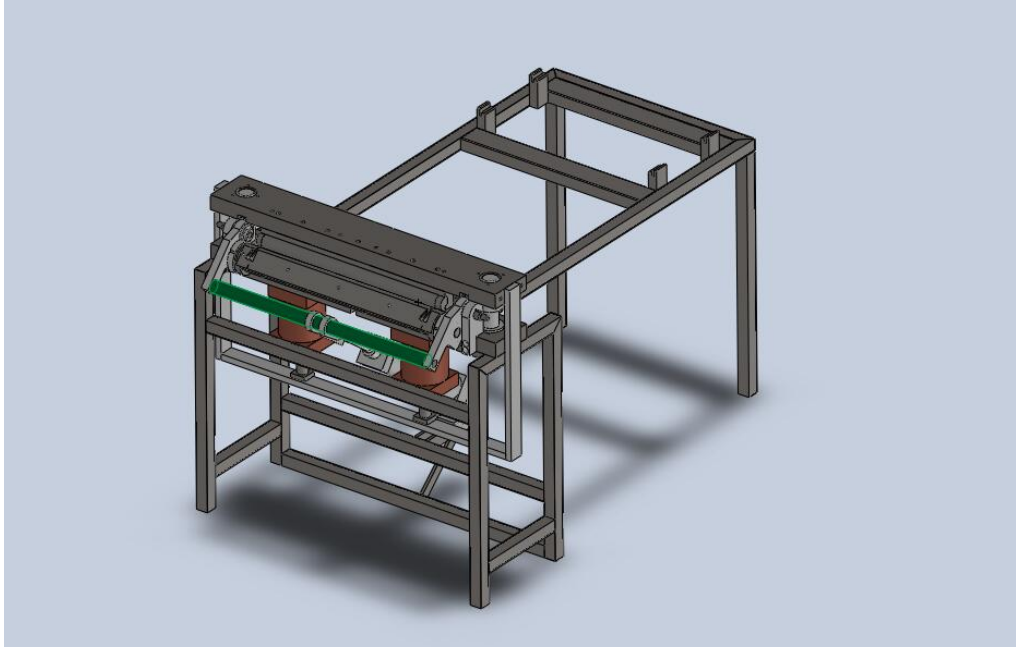
Tasarlanan makine ise bu çalışma şekline dayanıyor. Salvagninide sac bilgisayar yardımıyla tablaya oturtulurken bu makinede önceden küvet ana sacı için belirtilen

konumlamalarda büküm işlemi yapılıyor. Salvagninide çift taraflı büküm olmasına karşın yeni kenar büküm makinesinde tek taraflı büküm uygulaması yetiyor. Makineyi üretirken istenilen en önemli özellik ise fabrikanın içindeki kompresörden gelen hava basıncıyla büküm işleminin yapılabilmesidir.



Şekil 3.6.2 Kenar bükme abkantı.

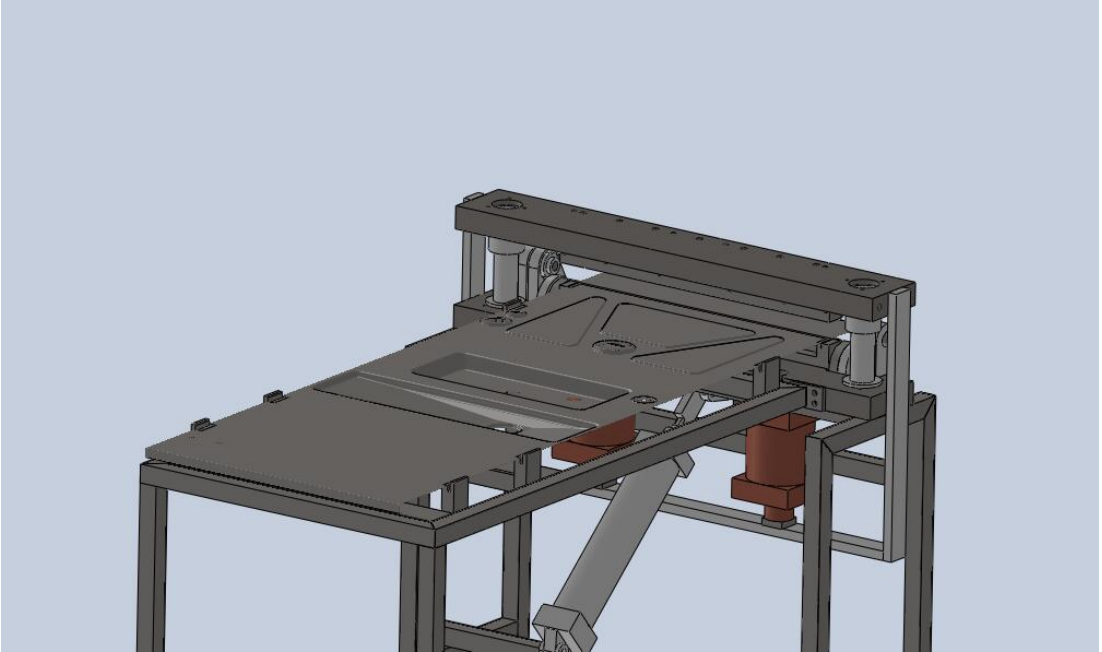
- Hava basıncıyla çalışan bir makine olması,
- 2 kademeli hidrolik piston sisteminin olması,
- 1. kademe sacın sıkıştırılmasını sağlaması,
- 2. kademe yukarıya doğru köşe büküm yapılmasını sağlaması,
- Büküm yarıçapı 10 derece olan büküm kalıpları kullanılması,
- Makine yaklaşık 150 adet parçadan oluşması, abkantın özelliklerindendir.



Şekil 3.6.3 Kenar bükme abkantı çalışması

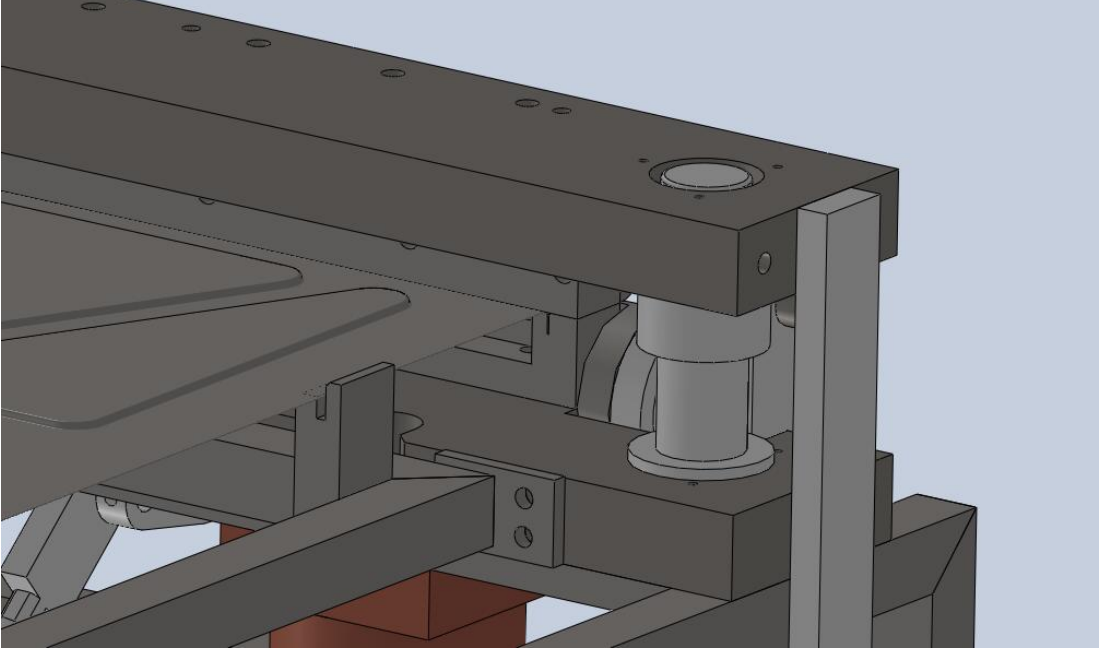
Makinenin çalışma prensibi;

1. İşaretlenmiş yerlerden makineye bağlanan sac parçası alttaki pistonların basınç kuvvetiyle sacı sıkıştırarak sacın büküm esnasında sabit kalmasını sağlamaktır.



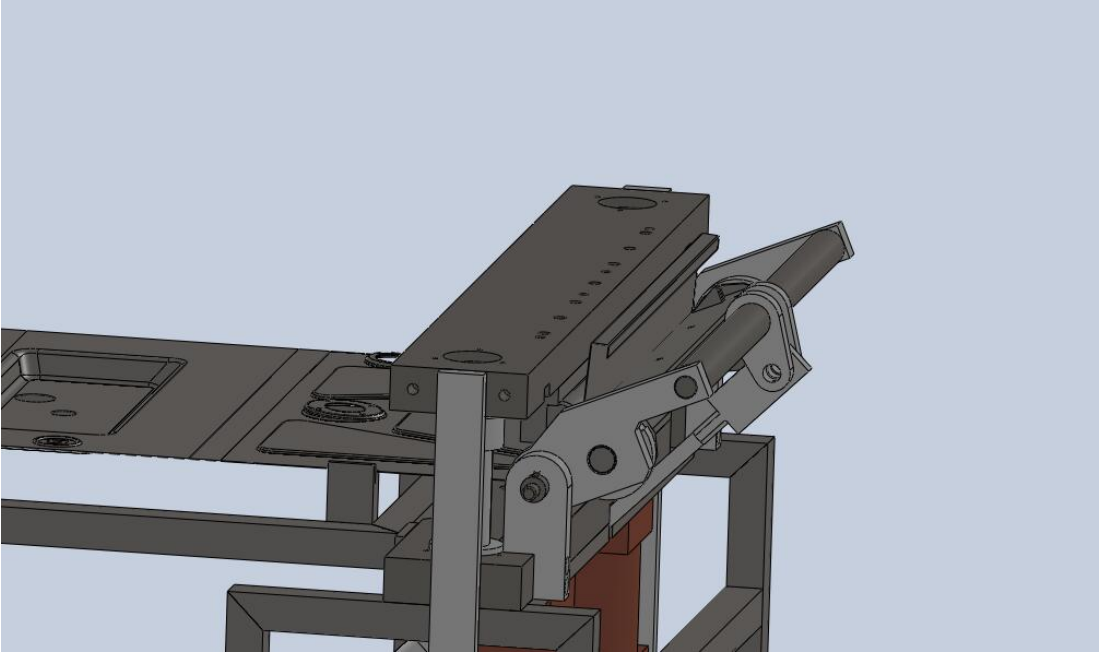
Şekil 3.6.4 Sacın makineye oturtulması ve sabitlenmesi.

2. Alt pistonlar belirli bir seviyeye geldikten sonra anahtar yardımıyla pistonlara gelen basınç keser ve sacın baskılı bir şekilde makineye bağlanması sağlanır.



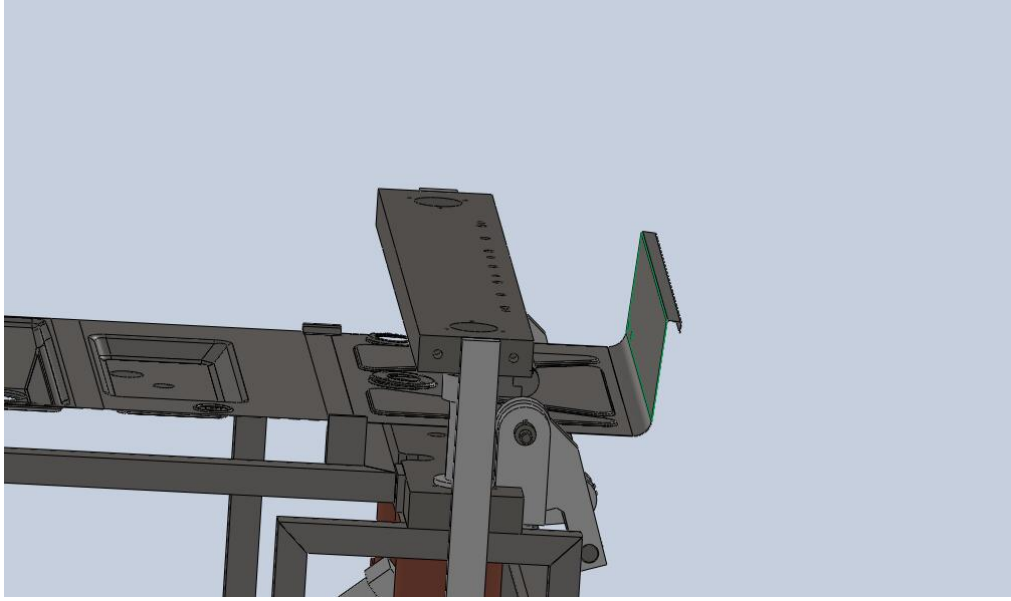
Şekil 3.6.5 Sacın makineye oturtulması ve sabitlenmesi

3. Sac sabitlendikten sonra gelen hava basıncı büküm kolunu hareket ettirerek pistondan gelen basınçla kuvvet uygulayarak istenilen çapta bükülmesi sağlanır.



Şekil 3.6.6 Sacın yan pistonun yardımıyla bükülmesi

4. En son pistona uygulanan basınçlar sırasıyla kaldırılarak sac parça 2. büküm yeri için yeniden konumlandırılır ve büküm işlemi bitene kadar aynı işlemler devam eder.



Şekil 3.6.7 Basınçların kaldırılıp sacın alınması



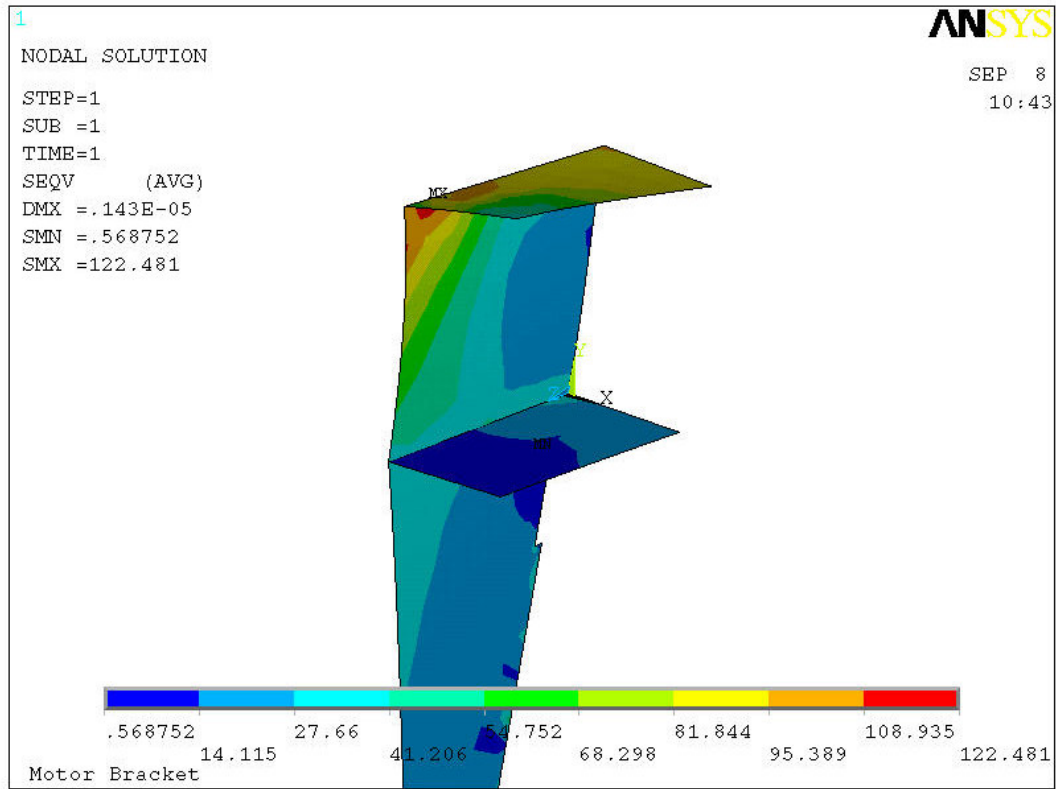
Şekil 3.6.8 Kenar büküm makinesi gerçek resmi

#### 4. LİTERATÜR TARAMASI

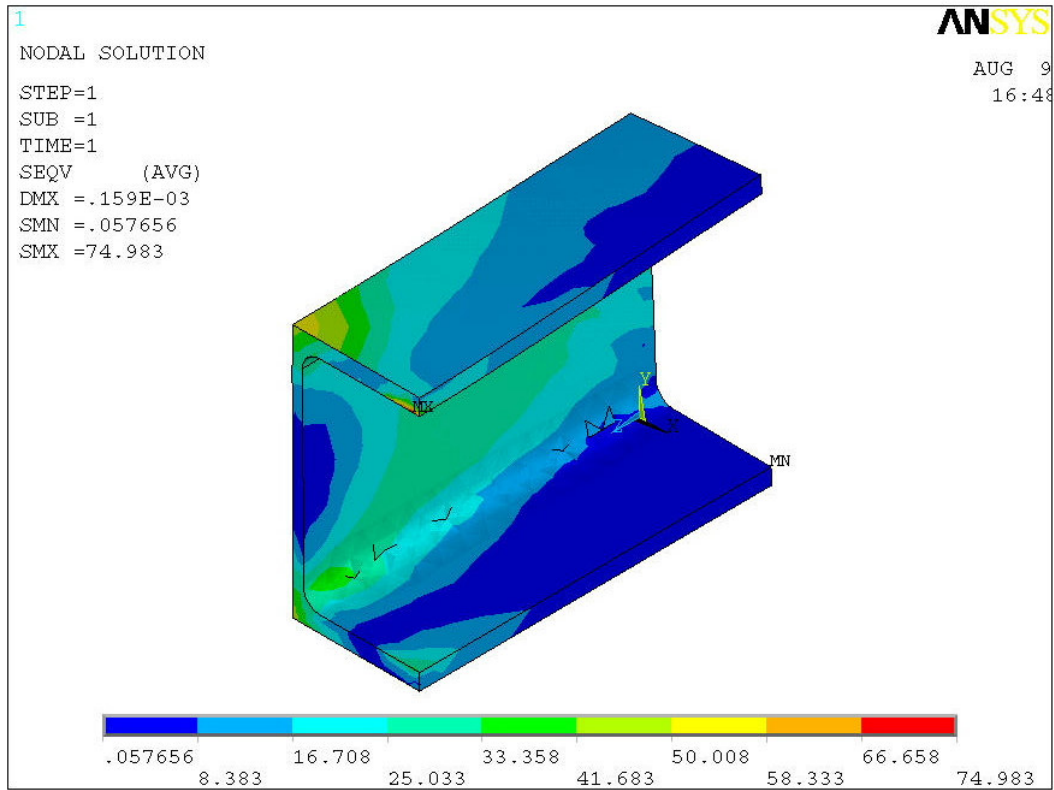
Literatürde sac metal deformasyonları ile ilgili sac metal işleme yöntemlerinin hepsine göre birçok çalışma bulunmaktadır. Bunları belli başlıklar altında toplamak gerekirse;

- 1- Sac metallere uygulanan gerilme analizleri,
- 2- Sac kalıpcılığı için form verme analizleri,
- 3- Sac metale uygulanan sac işleme yöntemlerindeki büküm, delik delme, kesme gibi işlemlerin analizidir.

Birinci örnek 2005 yılında yayımlanmış olan asansör üzerindeki sac metal parçaların analizi (Analysis of a Sheet Metal Bucket Elevator Head ) olarak görülmektedir.



Şekil 4.1 Sac metal üzerine gelen gerilme analizi uygulaması. (Janke, 2005)



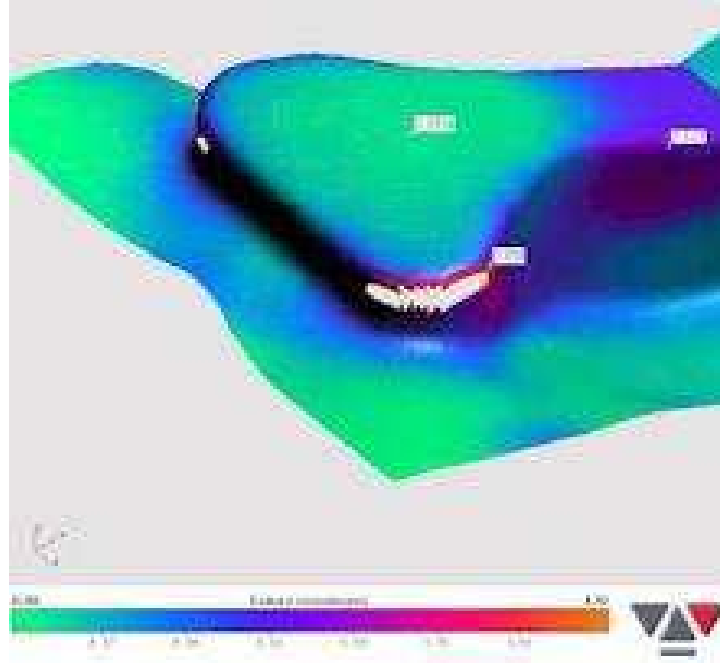
Şekil 4.2 Sac metal üzerine gelen gerilme analizi uygulaması. (Janke, 2005)

Bu analizde sac metal parçalar, statik yüklemeler altında analiz edilip malzemedeki deformasyonların görülmesi sağlanmıştır. Malzeme üzerinde deformasyonların fazla olduğu bölgelerde sac kalınlıkları arttırılarak, malzemenin tasarımı değiştirilerek veya malzeme cinsi değiştirilerek deformasyonların ortadan kaldırılması sağlanmıştır.

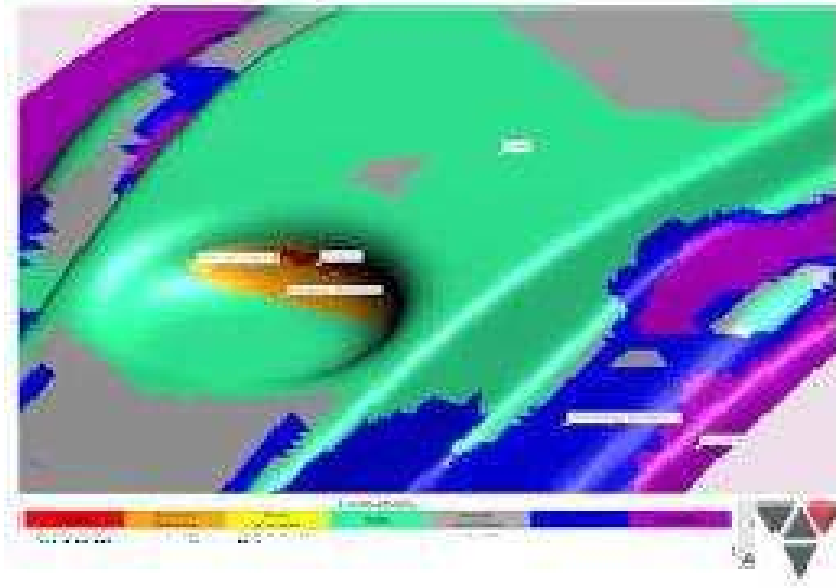
Sac metali kalıplar ile işleme ve sac metal işleme yöntemlerinden bükme, delme ve kesme gibi işlemlerin sac metal üzerinde analizi yapılmak istendiğinde ise malzemeye statik analiz yerine verilerini daha doğru bir şekilde alabileceğimiz dinamik analiz uygulanması gerekmektedir. Dinamik analizler için kullanılan analiz programları ansys ls-dyna ve abaqus explicit analizler kullanılmıştır.

“Sac şekillendirme sayısal çözümlerinde en başarılı olan yöntem, formlama sırasında sacın durumunu belirleyen denklemlerin zamanda entegrasyonu (zaman adımları) üzerine kuruludur. Zaman adımlarındaki çözüm genellikle explicit metotla yapılır.” (Kurtuluş, 2004)

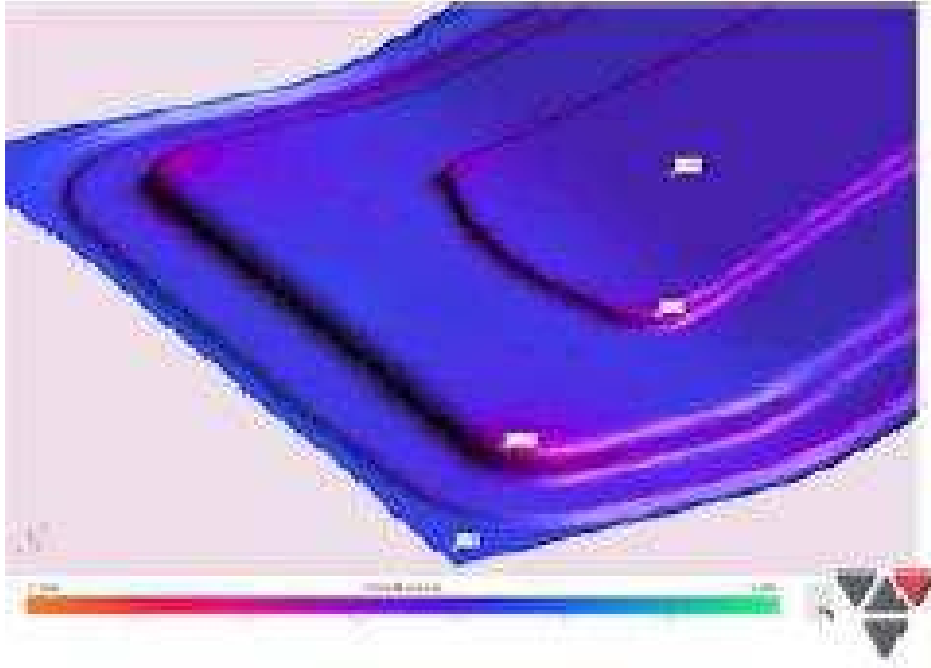
Bu analiz yöntemi ile sac üzerinde oluşan en yüksek formlama limiti, sacın yük altında ne zaman ve nerden yırtılacağı, formlanmış parçanın üzerinde oluşan gerilmeler ve kalınlık dağılımı, kırılma, geri yaylanma ve sac metala uygulayacağımız gerekli kuvvetin hesabını bulabiliriz.



Şekil 4.3 Sac üzerinde uzama dağılımları ve yırtılmanın görünümü. (Kurtuluş, 2004)

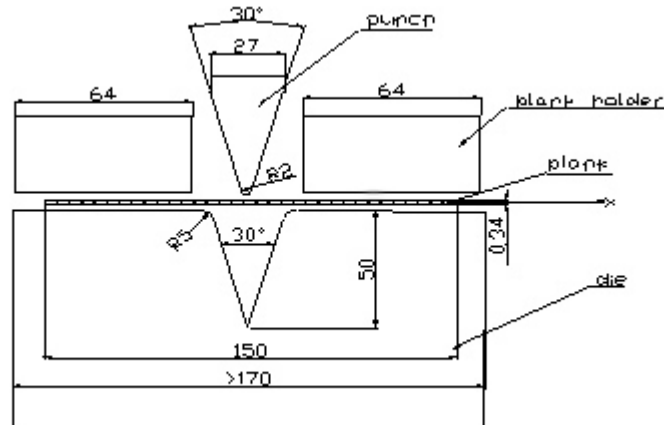


Şekil 4.4 Formlanmış sacın durumu. (Kurtuluş, 2004)

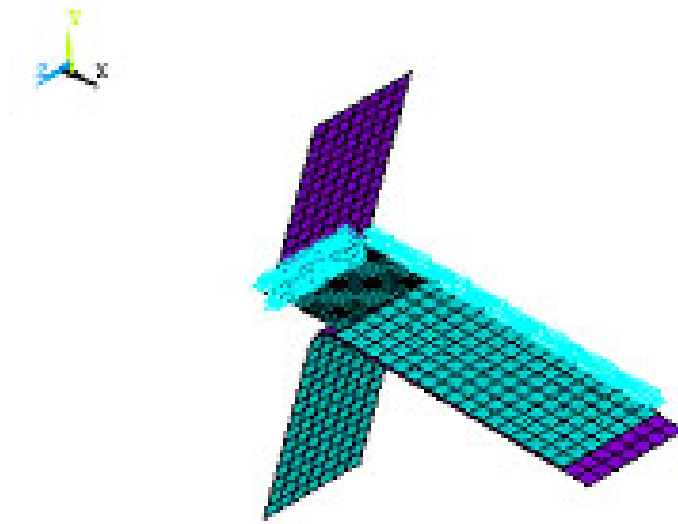


Şekil 4.5 Kalınlık dağılımı. (Kurtuluş, 2004)

Sac metal büküm işlemine göre yapılmış araştırmalardan ilki; sonlu elemanlar yöntemi ile bükümden sonra oluşan bükümüm tersine doğru hareketini inceleyen analizdir.

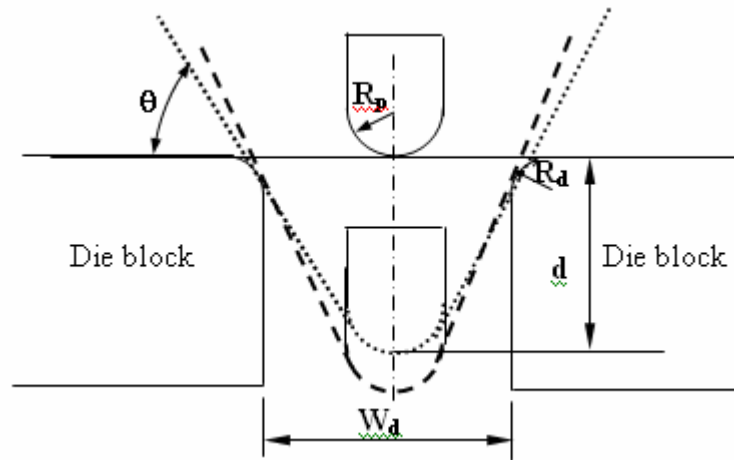


Şekil 4.6 Modellenmiş parça. (Jingjing, 2003)

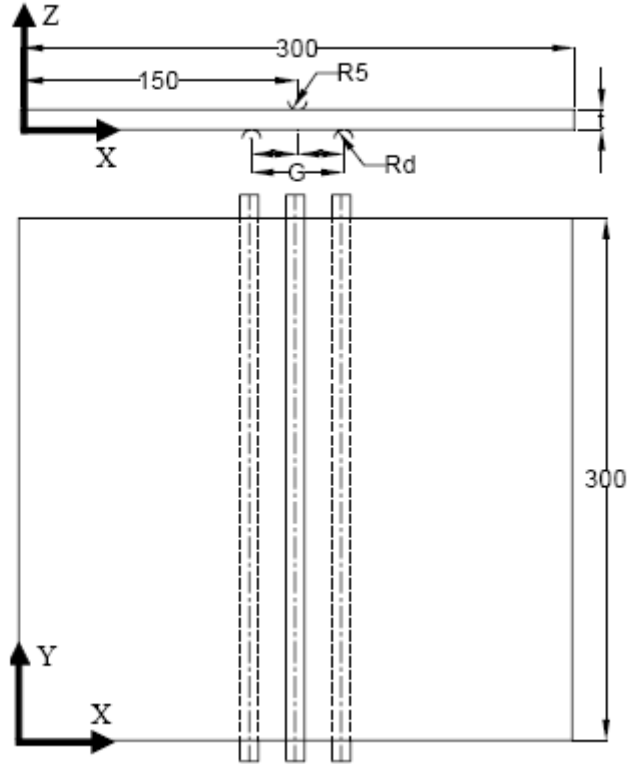


Şekil 4.7 Analiz görüntüsü. (Jingjing, 2003)

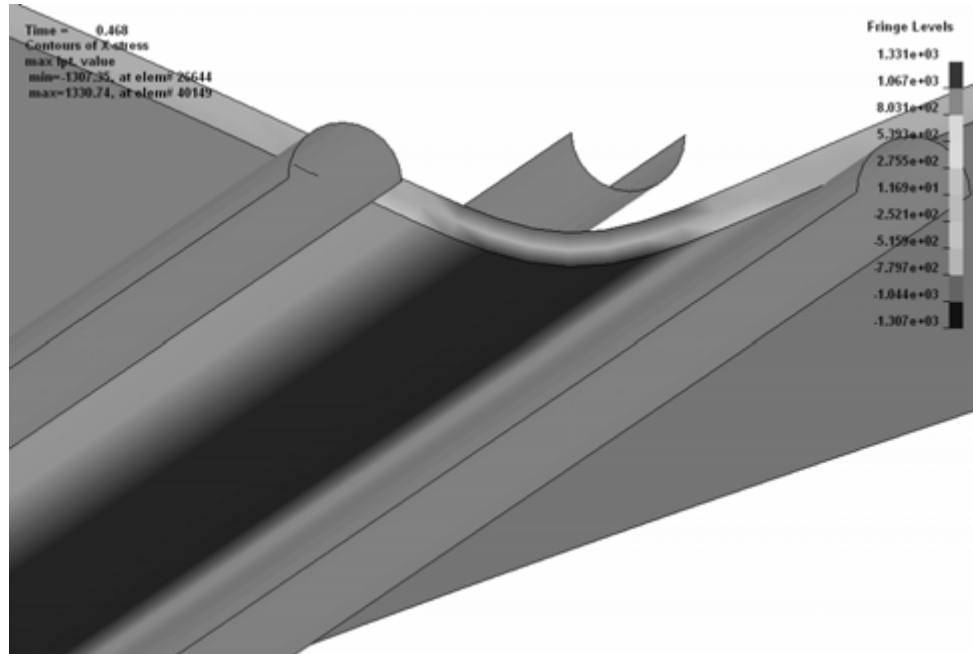
Başka bir örnekte ise sac malzemenin farklı sonlu elemanlar analizi ile sonlu elemanlar analizi yapıldığı görülmektedir.



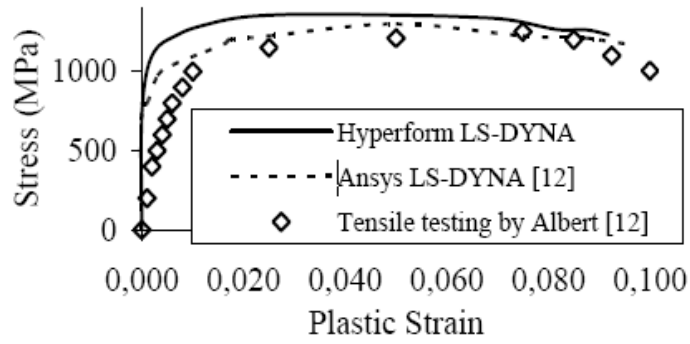
Şekil 4.8 V-büküm modellemesi. (Himanshu, 2007)



Şekil 4.9 Parçanın geometrik modeli. (Himanshu, 2007)



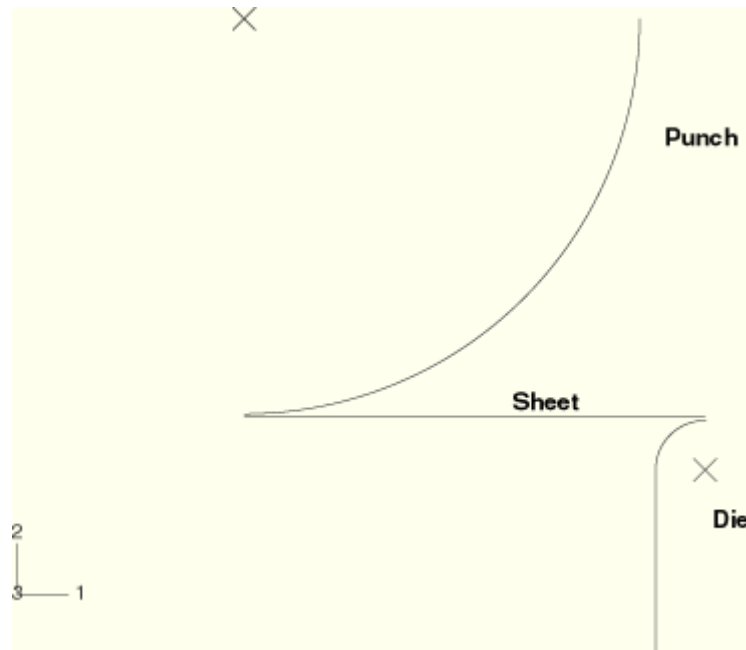
Şekil 4.10 Malzemedeki gerilimin zaman içindeki değişimi. (Himanshu, 2007)



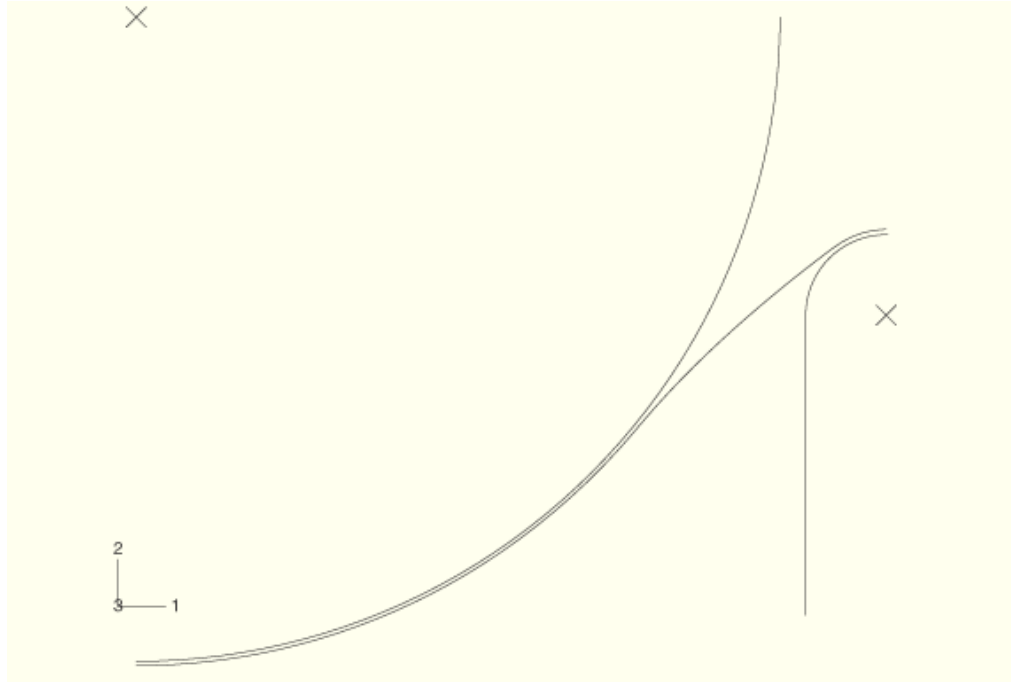
Şekil 4.11 Farklı programlara göre analiz sonuçları. (Himanshu, 2007)

Bu örnekte görüldüğü gibi farklı analiz sonuçları yaklaşık olarak aynı değerlerde kalmaktadır. Buradan çıkan sonuçlarda LS-DYNA sac metal analizi için iyi bir programdır. Sonlu elemanlar analizi yöntemi ile kinetik enerji parametrelerinde çalışmak yararlı olmaktadır.

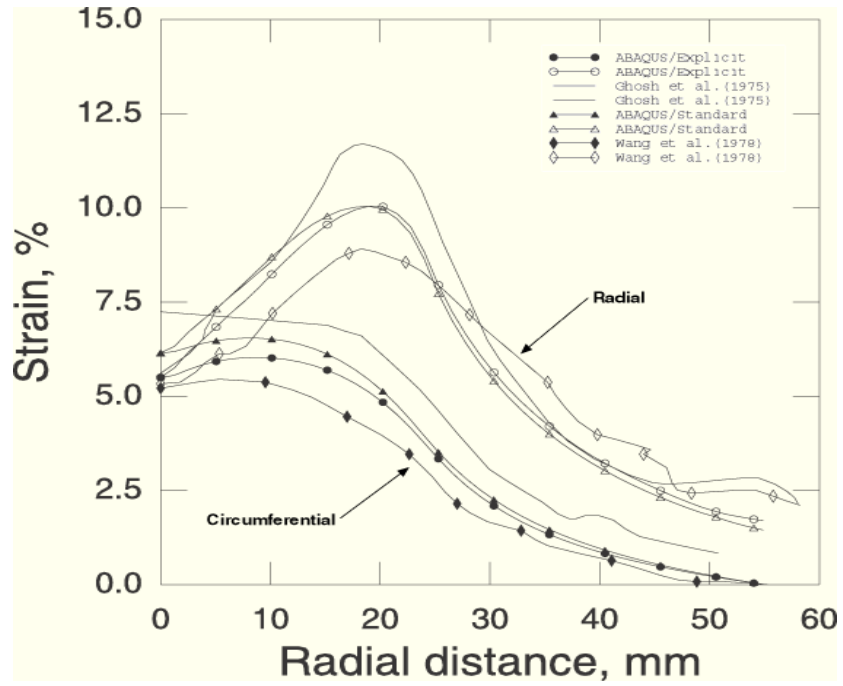
Son örneğimizde ise abaqus explicit programı kullanarak hazırlanmış tek boyutlu kenar büküm örneği görülmektedir. Bu örnekte kullanılan verilerin hepsi abaqus programında yeniden modellenip analiz edilerek aynı sonuçlara ulaşılmaktadır.



Şekil 4.12 Tek boyutlu kenar büküm modeli. [5]



Şekil 4.13 Tek boyutlu analizde deformasyon görüntüsü. [5]



Şekil 4.14 Analiz sonuçlarının gerinme / deformasyon tablosu. [5]

## 5. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

### 5.1 Sonlu Elemanlar Teorisi

Gerçek bir parça tasarımında parçayı oluşturan geometri genel olarak tek bir matematiksel ifade ile anlatılamayacak kadar karmaşıktır. Malzeme yapısı kimi durumlarda izotrop olarak kabul edilse bile aslı itibarıyla tüm yapılar anizotropik bir yapıda bulunmaktadır. Yapı içerisinde süreksizlikler çeşitli kesitlerdeki duvar kalınlıklarının farklılıkları yapı geometrisinin bu şekilde olması klasik mukavemet metotlarını güvenilir kılmamaktadır. (Turgut, 2003)

Özellikle bilgisayar alanındaki gelişmelere bağlı olarak önemi ve uygulama alanı genişleyen Sonlu Elemanlar Analizi (FEA; Finite Element Analysis), yöntemi karmaşık parçaları çözülmesi daha kolay olan küçük parçalara bölerek çözmek ve çözümleri birleştirmek olarak özetlenebilir. Esas itibarıyla yapılarda seçilen kuvvetler ve buna karşılık gelen deplasmanlar ve kuvvetler arasında bağıntılar kurularak lineer cebrik denklem takımlarının oluşturulması ve çözülmesi esastır.

Sonlu elemanlar metodunun kullanılması 1960'lı yıllara hatta daha öncelere dayanmakla birlikte özellikle yüksek hızlı ve yüksek bellekli sayısal bilgisayarların gelişmesiyle yaygın bir şekilde kullanılan bir yöntem olmuştur (Turgut, 2003)

Bu yöntemin avantajlarından bazıları aşağıdadır:

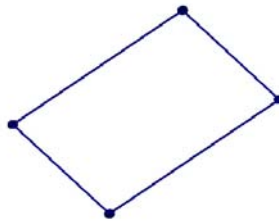
- Gerçek yapı, birçok yapı elemanından oluşan bir matematik model olarak oluşturulabilir.
- Yükleme durumları, artık gerilmeler, ön gerilmeler, ısı yükleri, sınır koşulları göz önüne alınabilir.
- Lineer olmayan yapı problemleri çözülebilir.
- İzotrop olmayan ve süreksizlik içeren malzemeler kullanılabilir.
- Sayısal bilgisayarlar sayesinde hesaplanması tamamen otomatik hale getirilerek zaman tasarrufu sağlanabilir.

Sonlu elemanlar yönteminde yapıyı oluşturan elemanların bazıları aşağıda gösterilmiştir:

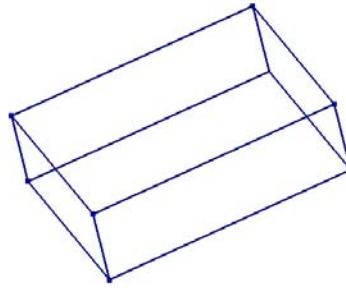
- Tek boyutlu eleman: Yay, kiriş elemanı gibi.



- İki boyutlu eleman: Membran, levha ve kabuk elemanlar gibi.



- Üç boyutlu eleman: Tetrahedral, Brick eleman, vs.



Yapısal analiz problemlerin birçoğu lineer statik olarak kabul edilerek çözülebilecek problemler olmaktadır. Bu çalışmada da problem lineer statik bir problem olarak göz önüne alınmış ve tetrahedral elemanlar kullanılmıştır. Ancak şekil optimizasyonu sonunda elde edilen nihai parça için hegzahedral elemanlar kullanılarak da çözüm sağlanmıştır.

Lineer statik problemler için aşağıdaki kabuller yapılmaktadır:

- 1- Deformasyonlar küçüktür. (Uygulanan yükler şekil değişimine uygun olarak değişmez ve denge denklemleri değişimin her anı için yazılmaz.)

2- Malzemeler elastik olarak kabul edildiğinde plastik şekil değişimi göz ardı edilmektedir.

3- Statik yükler sisteme uygulanırken çok yavaş bir şekilde uygulanmaktadır sabit rejimde uygulanmaktadır.

Lineer statik analiz sistemin yüklere karşı davranışı hakkında bilgi alınmasını sağlarken genel olarak iyi bir yaklaşım olmasının yanında, lineer olmayan analiz için de esas teşkil etmektedir. Lineer statik analiz ile ilgili temel bağlantılar öncelikle incelenmelidir.

Denklemlerde kullanılan değişkenler:

L: Uzunluk

A : Kesit alanı

E : Elastiklik modülü

$u = u(x)$  : Yer değiştirme

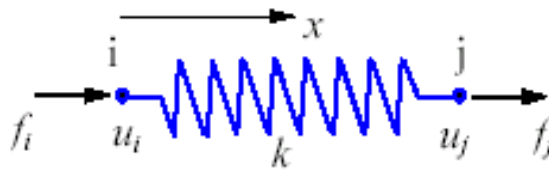
$\varepsilon = \varepsilon(x)$  : Uzama

$\sigma = \sigma(x)$  : Gerilme

Uzama-Şekil Değiştirme Bağlantısı:

$$\varepsilon = du \div dx$$

Sonlu elemanlar analizi için kullanılan elemanların temel eşitlikleri için bir benzeşim yapmak gerekirse yay eleman benzeşimi yapılabilir.



Şekil 5.1.1 Sonlu elemanlar için yay benzeşimi. (Turgut, 2003)

İki nod: i, j

Nodal yer değiştirme:  $u_i, u_j$  (in, m, mm)

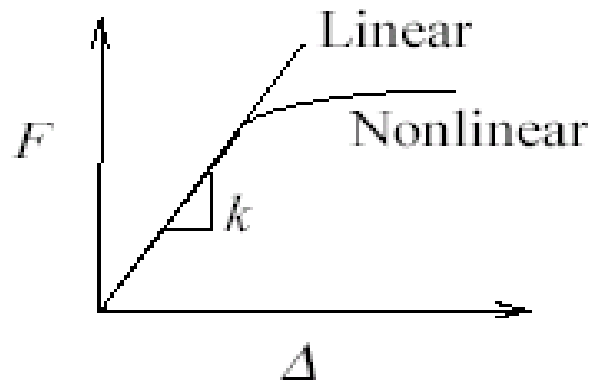
Nodal kuvvetler:  $f_i, f_j$  (lb, Newton)

Yay sabiti (Katılık):  $k$  (lb/in, N/m, N/mm)

Yay kuvveti – yer değiştirme ilişkisi:

$$F = k\Delta$$

$$\Delta = u_j - u_i$$



Şekil 5.1.2 Lineer ve non-linear durum için kuvvet şekil değişimi. (Turgut, 2003)

$k = F / \Delta$  ( $>0$ ) Bir birimlik şekil değişimi için gerekli kuvvet.

Bu çalışmada lineer problemler göz önüne alınmıştır. Yay benzeşimi için eşitlikler herhangi bir  $i$  nodu için aşağıdadır:

$$f_i = -F = -k(u_j - u_i) = k u_i - k u_j$$

$j$  nodu için,

$$f_j = F = k(u_j - u_i) = -k u_i + k u_j$$

**Matris formu için:**

$$\begin{bmatrix} k & -k \\ -k & k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ u_j \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_i \\ f_j \end{Bmatrix}$$

$$k u = f$$

$k$  = (Eleman) rijitlik matrisi

## 6. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ YÖNTEMİ İLE SAC METALİN BÜKÜM ÇEŞİTLERİNE GÖRE ANALİZİ

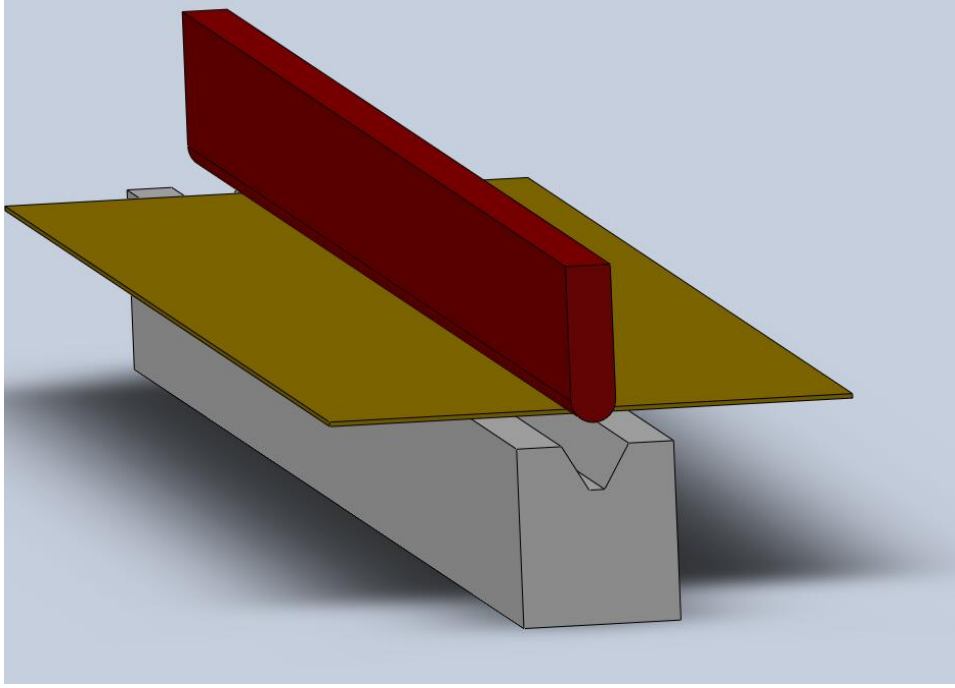
Basitliği ve geniş alan uygulaması nedeniyle bükme önemli metal şekillendirme biçimidir. Analitik ve deneye dayalı modellerin doğruluğu için rapor varsayım basitleştirilerek dinamik parametrelerin etkisi dikkate alınmamıştır. Çok sayıda sonlu elemanlar analizi (FEA) V-bükme, kenar bükme üzerinde araştırma bulunmaktadır. Sonlu elemanlar analizi yöntemi ile birçok fiziksel ve sayısal değerlerin teorik ve basit olarak hesapları yapılabilir. Bu analizlerde modellemek ve analizi yapabilmek için Abaqus programının explicit modülünde çalışılmıştır.

Karşılaştırma yapılacak büküm çeşitlerinden V-büküm ve kenar büküm çeşitlerine göre modellemesi yapıldıktan sonra her iki modellemede işlenecek aynı sac parçası üzerine farklı erkek kalıpların (punch) uyguladığı deformasyonlar ve her bir erkek kalıp için farklı kalınlıktaki saclarda meydana gelen deformasyonların incelemesi yapılacaktır.

### 6.1 Geometri ve Model

Modelleme kısmında sac metal haricinde tüm elemanlar ( alt kalıp, üst kalıp ve tutucular) rijit body olarak tanımlanmıştır. Bütün modellerin ilk önce abaqus sonlu elemanlar programında 2 boyutlu olarak modellenip analizi yapılmıştır. Abaquste kullandığımız eleman çeşidi S4R elamanıdır. Bu elamanı seçme nedenimiz 2 boyutlu modellemeye uygun olup, dinamik explicit analizde uygun bağ eleman tanımları vardır ve hem eğilmeye hem de uzamaya göre çalışmaktadır.

Bu modelleme ilk önce Solidworks, üç boyutlu tasarım programında modellenmiştir. Modellemede kullanılan sac metalin abatlari 116,5mm x 500mm olarak tayin edilmiştir. Bu analizde kullanılan sac kalınlıkları 0,6mm, 0,8mm, 1mm ve 1,2mm olarak alınmıştır. Üst kalıp (erkek kalıp) analiz çapları ise 5mm, 7.5mm, 10mm ve 12.5mm ölçülerindedir. Alt kalıp ise (die) piyasada standart olarak bulunan ağız genişliği 15mm olan V şeklindeki kalıp parçasıdır.

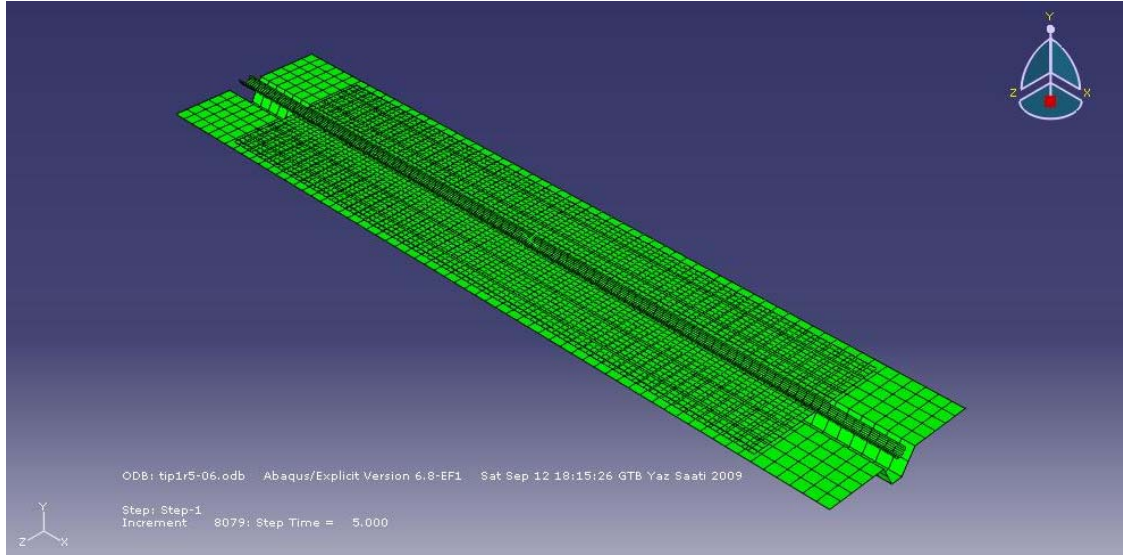


Şekil 6.1.1 V-büküm tipinde modellenecek parçanın katı modellemesi

Bu büküm tipi abaqus programı yardımı ile yeniden tüm kalıplarla tek tek modellenmiş ve saclara göre model analizleri burada yapılmıştır. Analizde kullanılan veriler aşağıdadır.

Çizelge 6.1.1 V-büküm analiz bilgileri

|               |      |
|---------------|------|
| Düğüm sayısı  | 8500 |
| Eleman sayısı | 8145 |
| Eleman tipi   | S4R  |

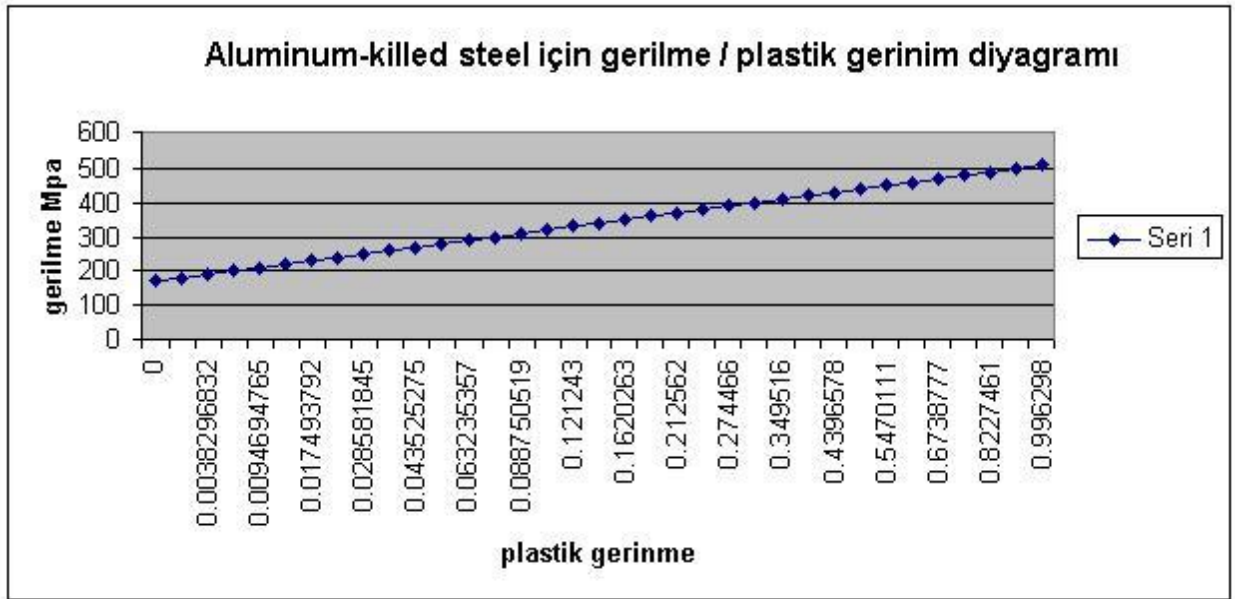


Şekil 6.1.2 V-büküm tipinde modellenecek parçanın rijit body olarak tanımlanan resmi

## 6.2 Malzeme Tanımı

Malzeme (aluminum-killed steel) olarak tanımlanmıştır. Yoğunluğu 0,00000785 kg/mm<sup>2</sup> dir. Young katsayısı, E, 206,8 GPa, referans gerilim değeri, K, 0,510 GPa dir.

Çizelge 6.2.1 “Aluminum-killed steel” için gerilme-gerinme diyagramı



Çizelge 6.2.2 “Aluminum-killed steel” malzemesi için gerilme-gerinme tablosu

| Akma gerilmesi | Plastik gerinme |
|----------------|-----------------|
| 170000000      | 0               |
| 180000000      | 0.0017205942    |
| 190000000      | 0.0038296832    |
| 200000000      | 0.0063897874    |
| 210000000      | 0.0094694765    |
| 220000000      | 0.01314366      |
| 230000000      | 0.017493792     |
| 240000000      | 0.022608092     |
| 250000000      | 0.028581845     |
| 260000000      | 0.035517555     |
| 270000000      | 0.043525275     |
| 280000000      | 0.052722659     |
| 290000000      | 0.063235357     |
| 300000000      | 0.075197279     |
| 310000000      | 0.088750519     |
| 320000000      | 0.1040458       |
| 330000000      | 0.121243        |
| 340000000      | 0.1405106       |
| 350000000      | 0.1620263       |
| 360000000      | 0.1859779       |
| 370000000      | 0.212562        |

| Akma gerilmesi | Plastik gerinme |
|----------------|-----------------|
| 380000000      | 0.2419857       |
| 390000000      | 0.274466        |
| 400000000      | 0.3102303       |
| 410000000      | 0.349516        |
| 420000000      | 0.392572        |
| 430000000      | 0.4396578       |
| 440000000      | 0.4910434       |
| 450000000      | 0.5470111       |
| 460000000      | 0.6078544       |
| 470000000      | 0.6738777       |
| 480000000      | 0.7453985       |
| 490000000      | 0.8227461       |
| 500000000      | 0.906261        |
| 510000000      | 0.996298        |

### 6.3 Bağlantı Tanımlamaları

Rijit parçalar ve sac parçası arasındaki tüm bağlantı tanımlamaları “explicit surface to surface” olarak tanımlanmıştır. Bağlantı özelliklerinin değerleri ise “tangential behaviour” seçilmiş olup sürtünme formülasyonu için “penalty” çözüm metodu seçilmiştir. Sürtünme katsayısı olarak ise 0,275 olarak tayin edilmiştir.

#### 6.4 Sınır Koşulları

Sınır koşulu olarak erkek kalıp (punch) ve sac metal haricindeki tüm elemanlar  $U1=0$ ,  $U2=0$ ,  $U3=0$  ve  $Ur1=0$ ,  $Ur2=0$ ,  $Ur3=0$  şeklinde tanımlanmıştır. Erkek kalıp (punch) için sınır koşulları  $Ur1=Ur2=Ur3=0$  olarak tanımlanmıştır. Ayrıca erkek kalıbın hareketini sağlamak için V2 yönünde -5m/s bir ilk hız tanımlanmıştır. Zamana göre genlik tablosu aşağıdaki çizelgedeki gibidir.

Çizelge 6.4.1 Analizde zaman genlik tablosu

| Zaman | Genlik |
|-------|--------|
| 0,00  | 0,00   |
| 3,00  | 1,00   |
| 4,00  | 1,00   |
| 4,50  | 0,00   |
| 4,99  | -0.25  |

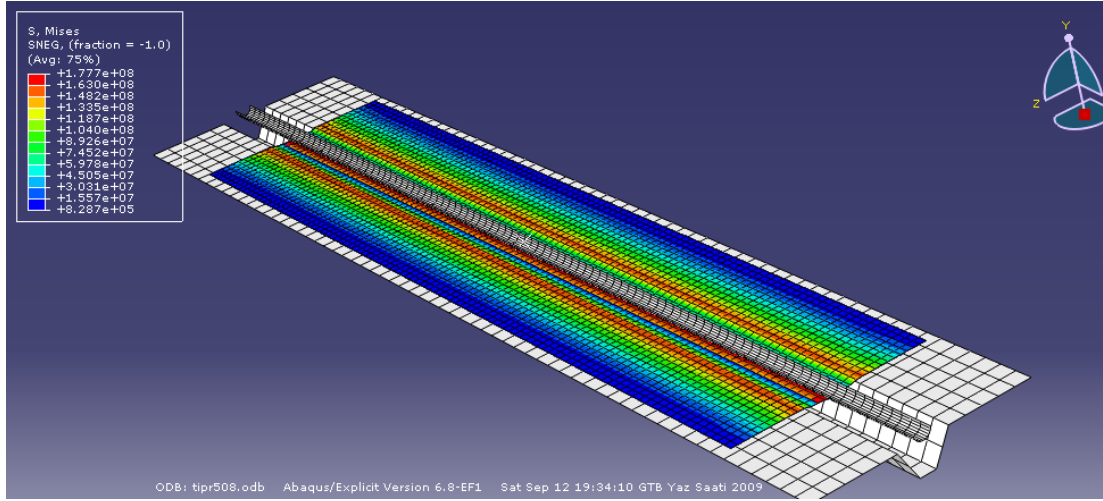
#### 6.5 V-Tipi Büküm Yöntemi İle Analiz Sonuçları ve Değerlendirilmesi

V-tipi büküm yöntemi ile analizler farklı erkek kalıp çapları ve farklı sac kalınlıklarına göre analiz edilip değerlendirilmiştir.

##### 6.5.1 V-Tipi Bükümde Erkek Kalıp Çapı R5 İçin Farklı Sac Kalınlıklarına Göre Analiz

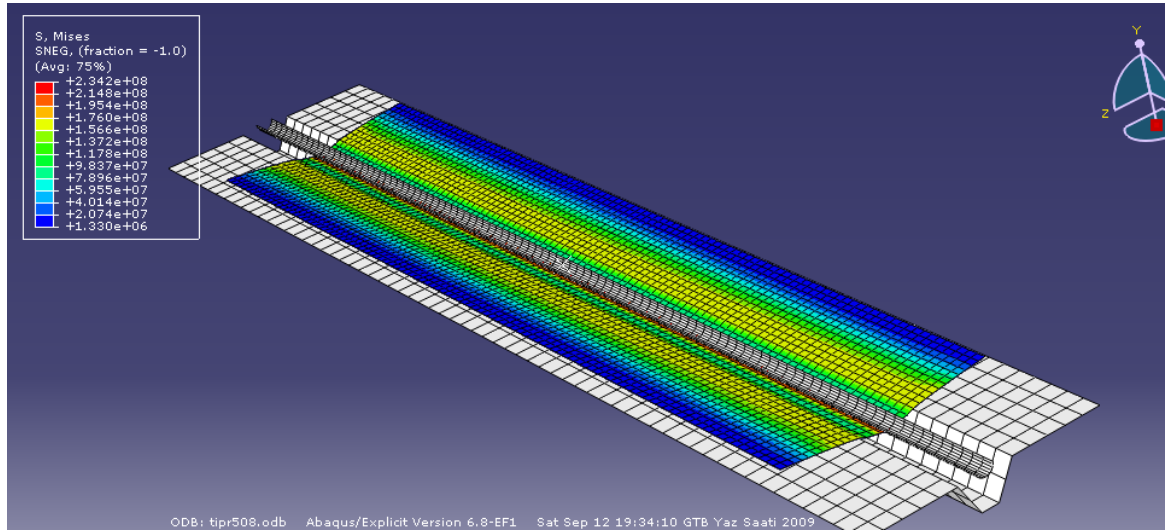
Analize başlangıç durumunda, R5 erkek kalıp parçası ile saca kuvvet uygulanmaya başlanıyor.





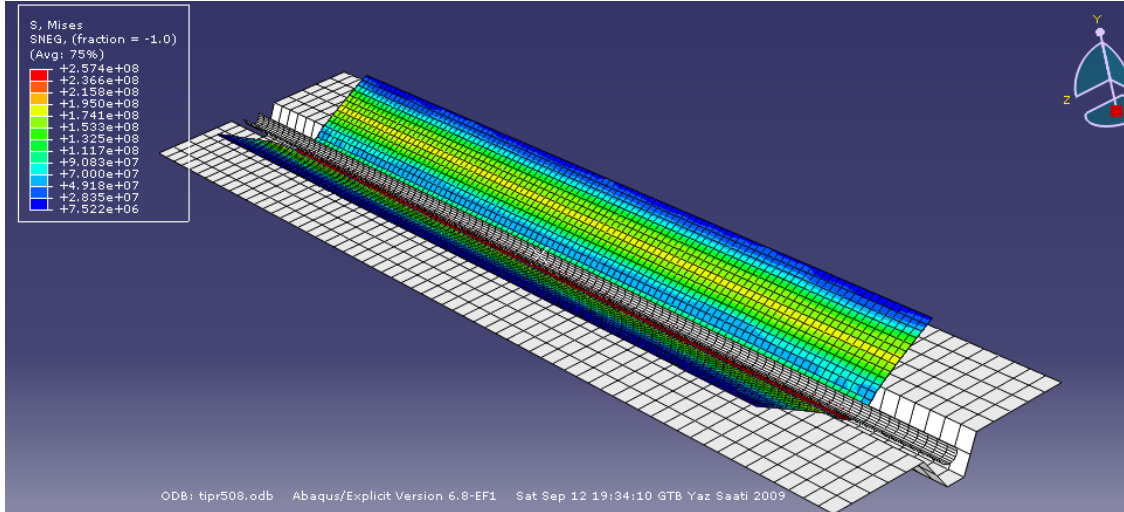
Şekil 6.5.1.3 Sacdaki deformasyonların belirmesi

Erkek kalıbın hareketinden sonra sacın yan kenarları havaya kalkmaya başlıyor. Buradaki hareketin artmasıyla sac metalde plastik şekil değiştirme görülmeye başlar. Gerçek hayatta erkek kalıbın hareket mesafesine göre sacda istenilen büküm açıları hesaplanır. Hareket mesafesi arttıkça açı 180 dereceden 30 hatta 20 dereceye kadar inebilmektedir.



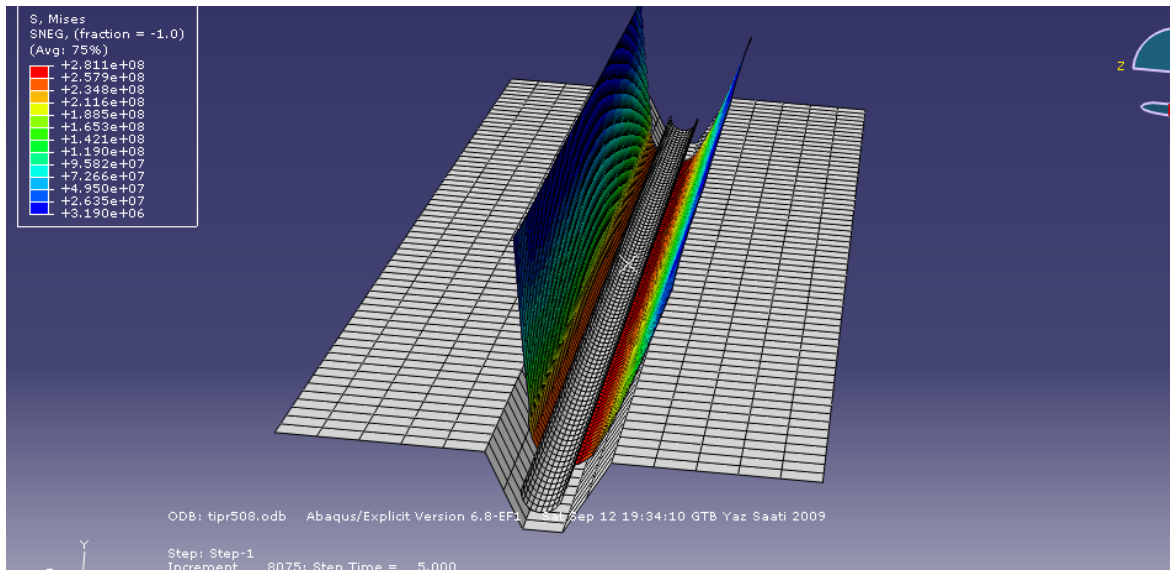
Şekil 6.5.1.4 Sac metaldeki deformasyonlar

Sac metalde oluşan deformasyonlar ile sacda 90 derece civarında bir köşe oluştuğu görülmektedir.



Şekil 6.5.1.5 Sacda meydana gelen deformasyon

Erkek kalıbın en fazla gidebileceği yere kadar hareketinden dolayı sacdaki deformasyonlar artarak sacın büküm açısının 90 dereceyi geçtiği görülmektedir.



Şekil 6.5.1.6 En büyük oranda deformasyonun görülmesi

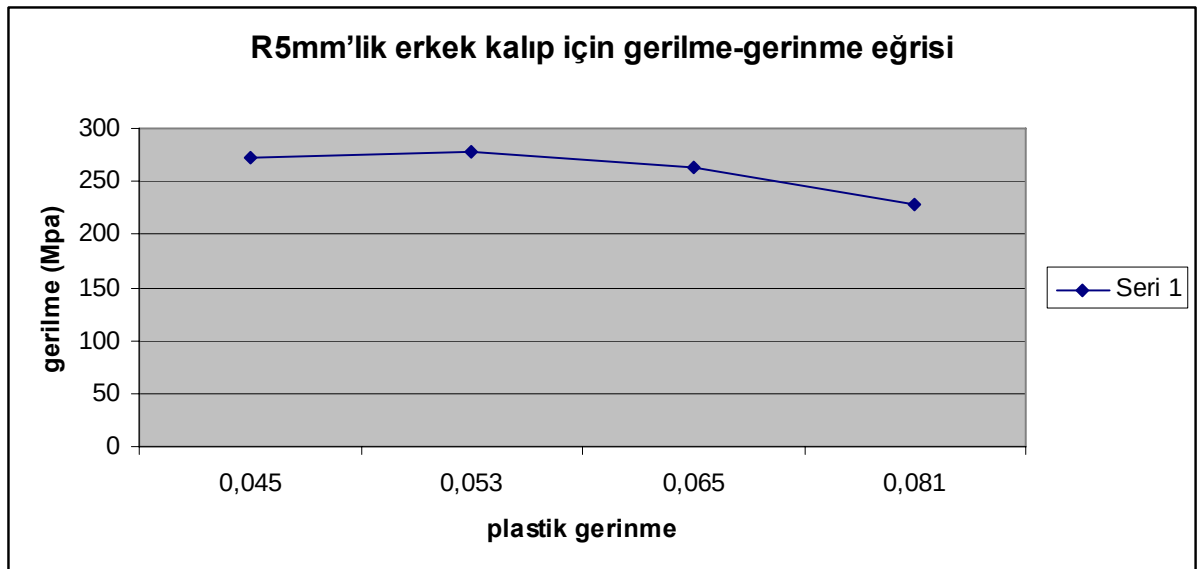
Farklı sac metal kalınlıklarında R5 erkek kalıp uygulandığında görülen gerilme ve plastik gerinmede en fazla yer değişme verileri aşağıdaki tabloda görülmektedir.

Çizelge 6.5.1.1 R5mm'lik erkek kalıp ile V-bükümde farklı saclarda meydana gelen analiz sonuçları

| V- tipi büküm            |                               |                    |                             |
|--------------------------|-------------------------------|--------------------|-----------------------------|
| R5 erkek kalıbı          |                               |                    |                             |
| sac kalınlıkları<br>(mm) | “von misses” gerilme<br>(Mpa) | plastik<br>gerinme | max. yer değiştirme<br>(mm) |
| 0,6                      | 273                           | 0,045              | 16,53                       |
| 0,8                      | 278                           | 0,053              | 16,33                       |
| 1                        | 263                           | 0,065              | 16,3                        |
| 1,2                      | 228                           | 0,081              | 16,14                       |

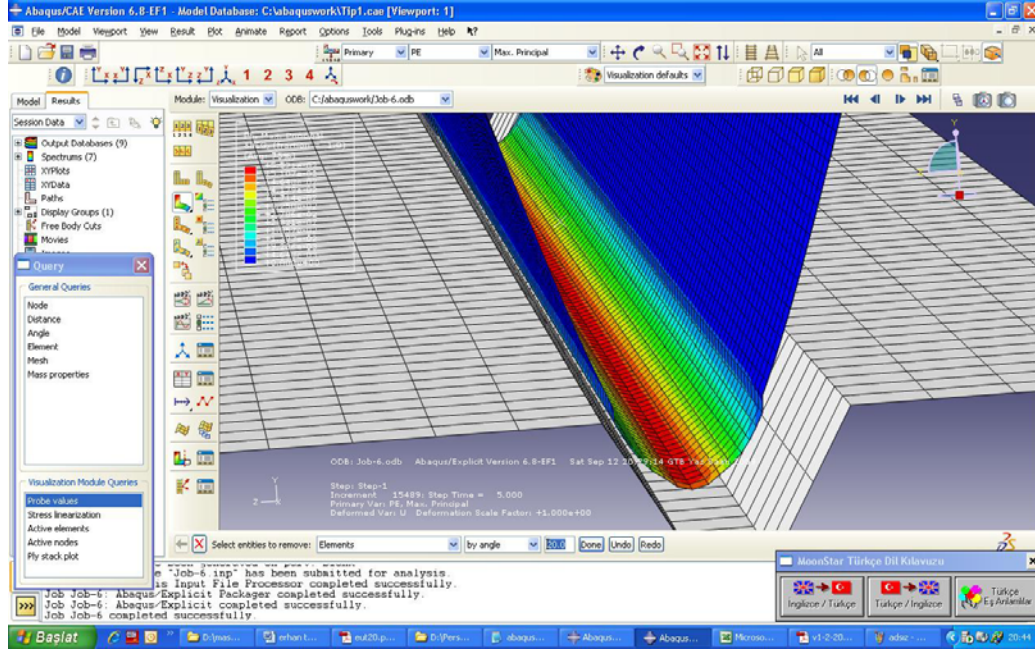
Yukarıdaki tablo incelendiğinde max. yer değiştirme yani deformasyonların ve malzeme üzerinde oluşan gerilmelerin sac kalınlığı ile azaldığı görülmektedir. Plastik gerinmenin sac kalınlığı ile arttığı görülmektedir.

Çizelge 6.5.1.2 R5mm'lik erkek kalıp uygulandığında gerilme-gerinme eğrisi



### 6.5.2 V-Tipi Bükümde Erkek Kalıp Çapı R7,5 İçin Farklı Sac Kalınlıklarına Göre Analiz

Bu analizde erkek kalıp değiştirilerek R7,5mm erkek kalıp ile yeniden aynı malzeme ve kalınlıklardaki sac metalin modellenmesi analizinin devamı sağlanmıştır.



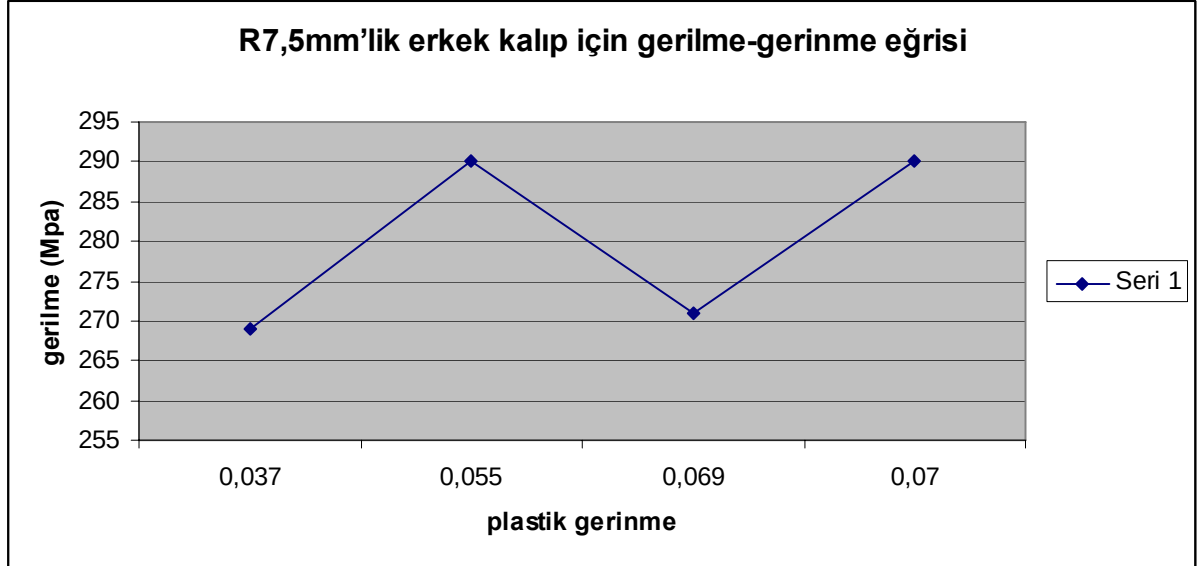
Şekil 6.5.2.1 R7,5mm’lik erkek kalıp yarıçapına göre analizin yapılması

Çizelge 6.5.2.1 R7,5mm’lik erkek kalıp ile V-bükümde farklı saclarda meydana gelen analiz sonuçları

| V- tipi büküm            |                               |                    |                             |
|--------------------------|-------------------------------|--------------------|-----------------------------|
| R7,5mm erkek kalıbı      |                               |                    |                             |
| sac kalınlıkları<br>(mm) | “von misses” gerilme<br>(Mpa) | plastik<br>gerilme | max. yer değiştirme<br>(mm) |
| 0,6                      | 269                           | 0,037              | 16,84                       |
| 0,8                      | 290                           | 0,055              | 16,91                       |
| 1                        | 271                           | 0,069              | 16,47                       |
| 1,2                      | 290                           | 0,07               | 15,95                       |

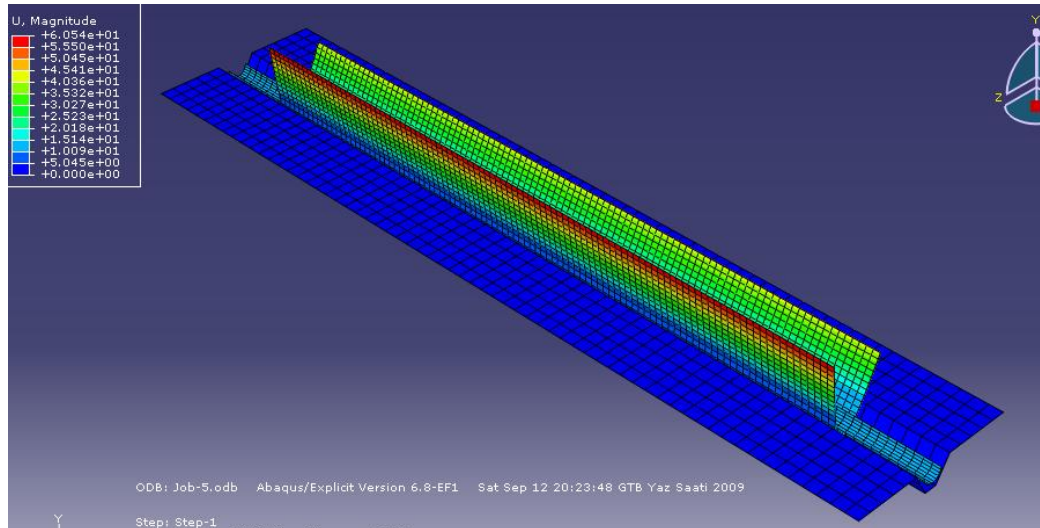
Sac kalınlığı artmasına rağmen R7,5mm erkek kalıpta yer değiştirmenin azaldığı ve gerilmelerin arttığı görülmektedir.

Çizelge 6.5.2.2 R7,5mm’lik erkek kalıp uygulandığında gerilme-gerinme eğrisi



### 6.5.3 V-Tipi Bükümde Erkek Kalıp Çapı R10 İçin Farklı Sac Kalınlıklarına Göre Analiz.

Bu analizde erkek kalıp kalıbı değiştirilerek R10mm erkek kalıp kalıbı ile yeniden aynı malzeme ve kalınlıklardaki sac metalin modellenerek analizin devamının sağlanmıştır.

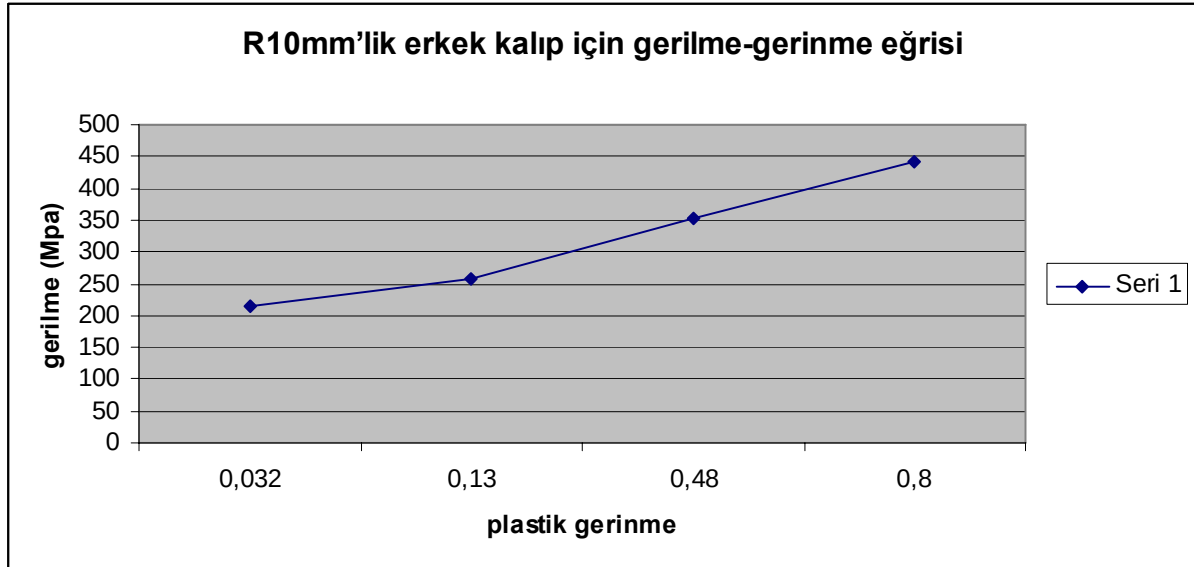


Şekil 6.5.3.1 R10mm’lik erkek kalıp yarıçapına göre analizin yapılması

Çizelge 6.5.3.1 R7,5mm’lik erkek kalıp ile V-bükümde farklı saclarda meydana gelen analiz sonuçları

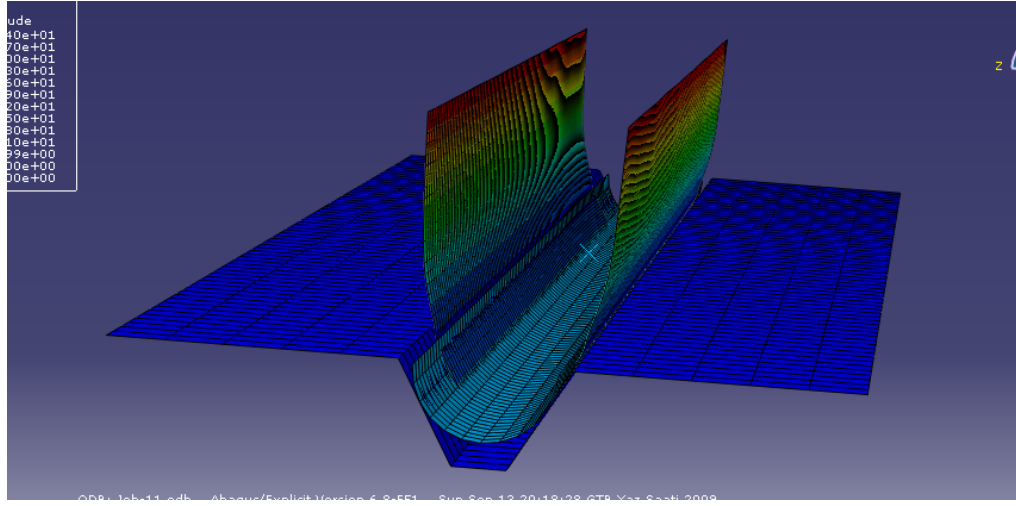
| V- tipi büküm            |                               |                    |                             |
|--------------------------|-------------------------------|--------------------|-----------------------------|
| R10mm erkek kalıbı       |                               |                    |                             |
| sac kalınlıkları<br>(mm) | “von misses” gerilme<br>(Mpa) | plastik<br>gerinme | max. yer değiştirme<br>(mm) |
| 0,6                      | 215                           | 0,032              | 16,99                       |
| 0,8                      | 258                           | 0,13               | 16,9                        |
| 1                        | 352                           | 0,48               | 16,62                       |
| 1,2                      | 443                           | 0,8                | 16,56                       |

Çizelge 6.5.3.2 R10mm’lik erkek kalıp uygulandığında gerilme-gerinme eğrisi



#### 6.5.4 V-Tipi Bükümde Erkek Kalıp Çapı R12,5 İçin Farklı Sac Kalınlıklarına Göre Analiz

Bu analizde erkek kalıp kalıbı değiştirilerek R10mm erkek kalıp kalıbı ile yeniden aynı malzeme ve kalınlıklardaki sac metalin modellenerek analizin devamının sağlanmıştır.

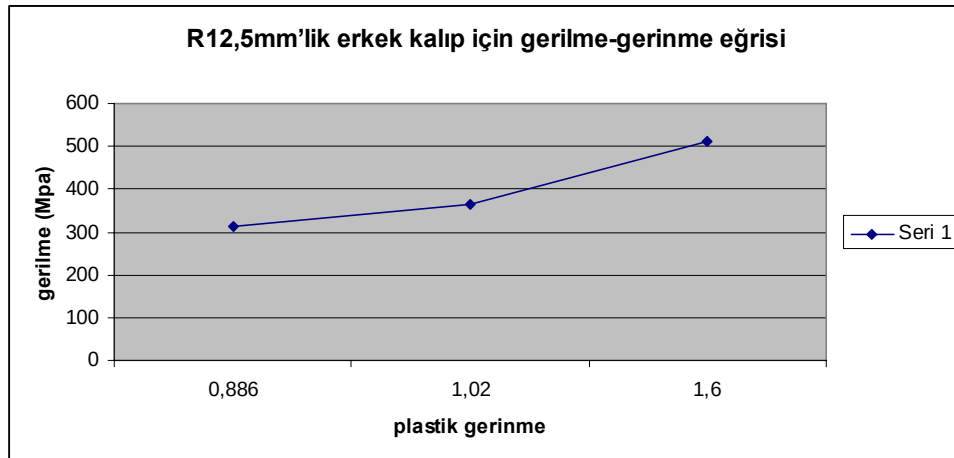


Şekil 6.5.4.1 R12,5mm’lik erkek kalıp yarıçapına göre analizin yapılması

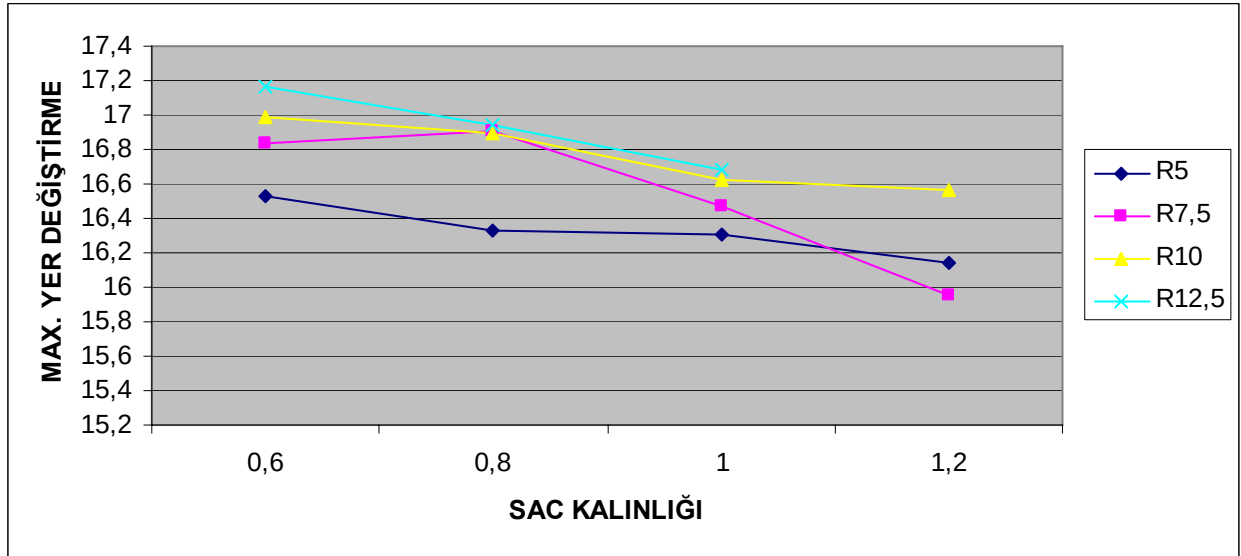
Çizelge 6.5.4.1 R12,5mm’lik erkek kalıp ile V-bükümde farklı saclarda meydana gelen analiz sonuçları

| V- tipi büküm         |                            |                 |                          |
|-----------------------|----------------------------|-----------------|--------------------------|
| R12,5mm erkek kalıbı  |                            |                 |                          |
| sac kalınlıkları (mm) | “von misses” gerilme (Mpa) | plastik gerinme | max. yer değiştirme (mm) |
| 0,6                   | 314                        | 0,886           | 17,16                    |
| 0,8                   | 366                        | 1,02            | 16,94                    |
| 1                     | 510                        | 1,6             | 16,68                    |

Çizelge 6.5.4.2 R12,5mm’lik erkek kalıp uygulandığında gerilme-gerinme eğrisi



Çizelge 6.5.4.3 V-tipi bükümde farklı kalıplara göre sac kalınlığı-max. yer değiştirme grafiği



## 6.6 Kenar Büküm Yöntemi İle Analiz Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Kenar büküme göre kullanılan malzeme çeşidi kalıp yarıçapları ve boyları aynı olup sadece sac malzemenin boyu 500mm eni 72mm olarak seçilmiştir. Analizde kullanılan veriler aşağıdadır.

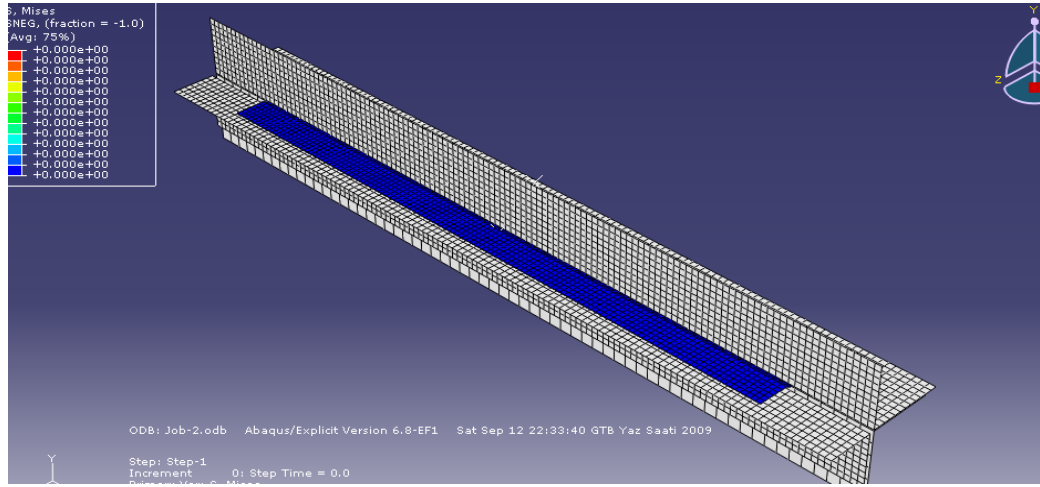
Çizelge 6.6.1 Kenar büküm analiz bilgileri

|               |      |
|---------------|------|
| Düğüm sayısı  | 8331 |
| Eleman sayısı | 7818 |
| Eleman tipi   | S4R  |

### 6.6.1 Kenar Büküm Yönteminde Erkek Kalıp Kenarı 90° İçin Farklı Sac Kalınlıklarına Göre Analiz

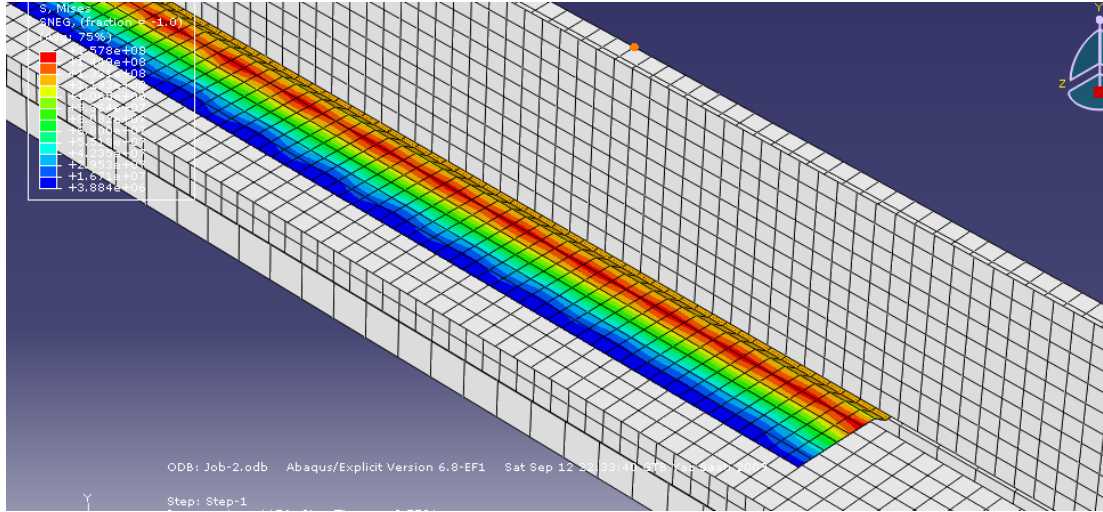
Kenar büküm yönteminde sac malzeme ilk olarak ek kalıp ile alt kalıp arasına sıkıştırılarak büküm işlemine başlanır. Erkek kalıp bu yöntemde isteğe bağlı olarak alttan yukarı veya yukardan aşağı hareket ederek sacın bükümünü sağlar. Bu analizde erkek kalıbın

alttan yukarı hareketiyle büküm işlemi tamamlanır.



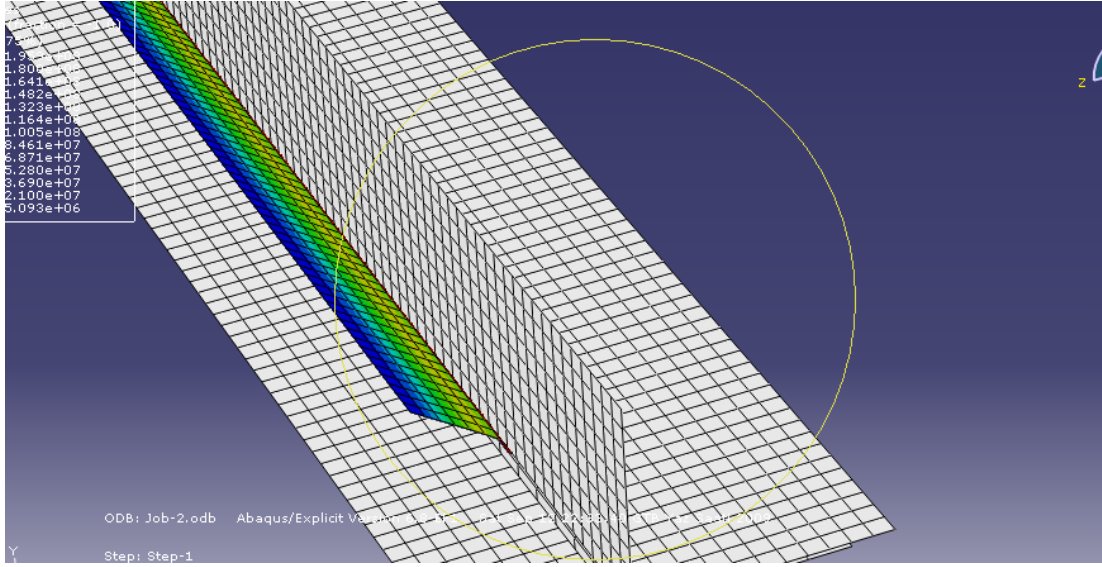
Şekil 6.6.1.1 Kenar büküm analiz modeli

Erkek kalıp aşağıdan yukarı hareket ederek sac malzemede sacı deforme etmeye başlar.



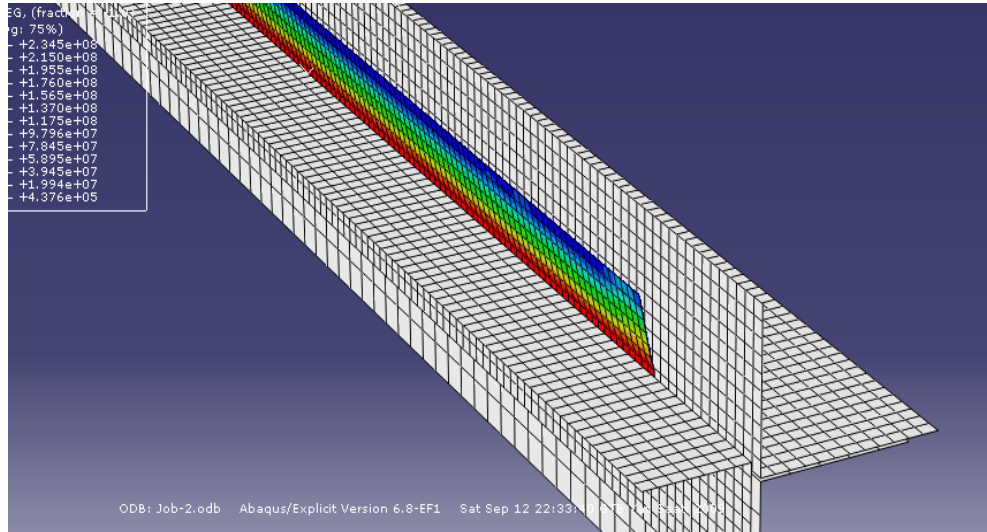
Şekil 6.6.1.2 Kenar bükümde sac deformasyonunun başlaması

Erkek kalıbın hareketinin devamı sağlanarak, sacın deformasyonu artarak devam etmektedir.



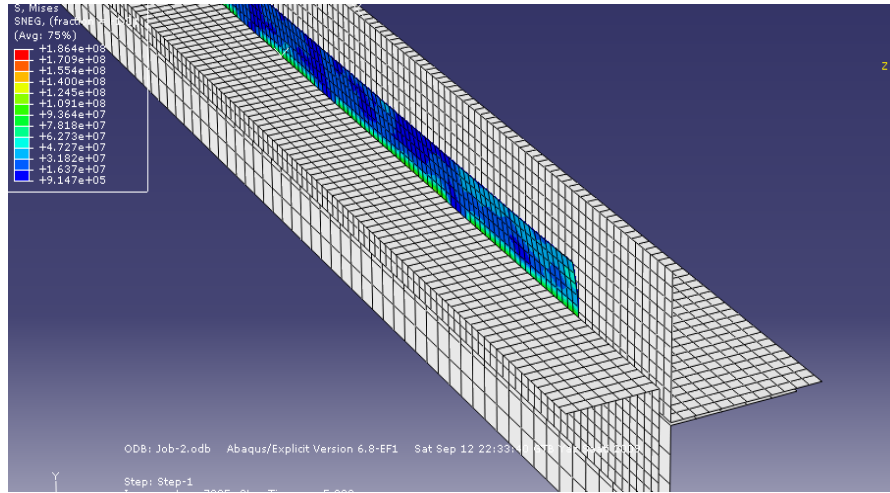
Şekil 6.6.1.3 Kenar bükümde sacın deformasyonun artarak devam etmesi

Sacdaki en yüksek deformasyonun büküm köşesinde olduğu kalıbın yukarı doğru hareketi ile görülmektedir



Şekil 6.6.1.4 Büküm köşesindeki deformasyon

Erkek kalıp hareketini bitirerek en üst seviyeye gelmiştir. Köşe büküm yönteminde sac metalin en büyük büküm açısı  $90^\circ$  dir.



Şekil 6.6.1.5 Kenar büküm analizinin son hali

Köşe bükümde ilk önce 90°'lik keskin kenar ile büküm sonuçları aşağıdaki çizelgededir.

Çizelge 6.6.1.1 90° erkek kalıp ile kenar bükümde farklı saclarda meydana gelen analiz sonuçları

| kenar tipi büküm      |                            |                 |                          |
|-----------------------|----------------------------|-----------------|--------------------------|
| 90° erkek kalıbı      |                            |                 |                          |
| sac kalınlıkları (mm) | “von misses” gerilme (Mpa) | plastik gerilme | max. yer değiştirme (mm) |
| 0,6                   | 188                        | 0,056           | 39,19                    |
| 0,8                   | 226                        | 0,6             | 39,95                    |
| 1                     | 287                        | 0,76            | 40,5                     |
| 1,2                   | 443                        | 0,282           | 39,5                     |

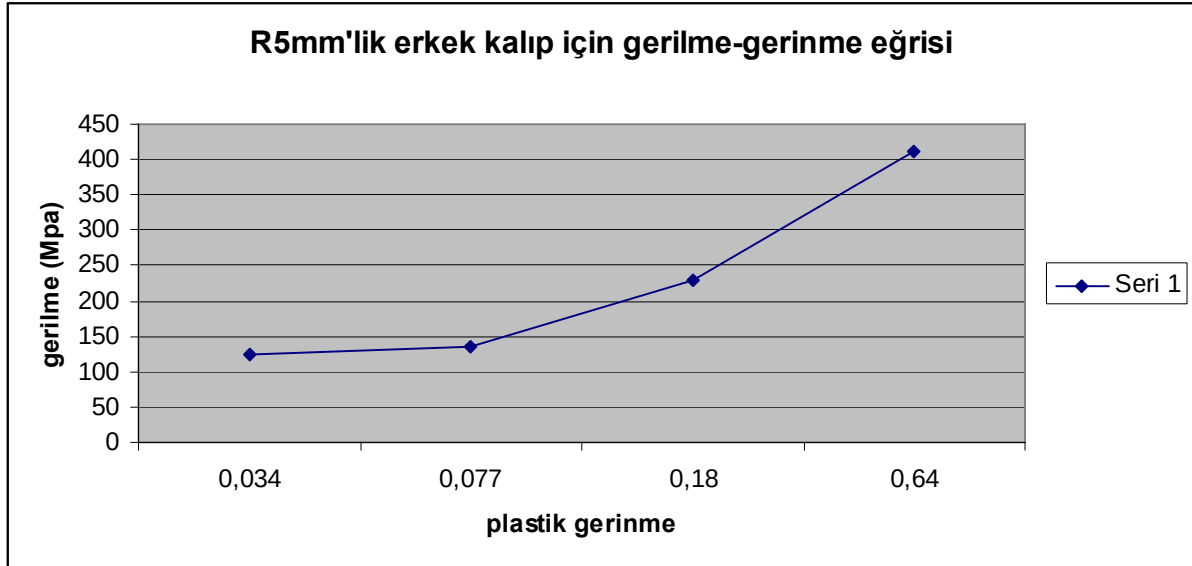


Çizelge 6.6.2.1 R5mm'lik erkek kalıp ile kenar bükümde farklı saclarda meydana gelen analiz sonuçları

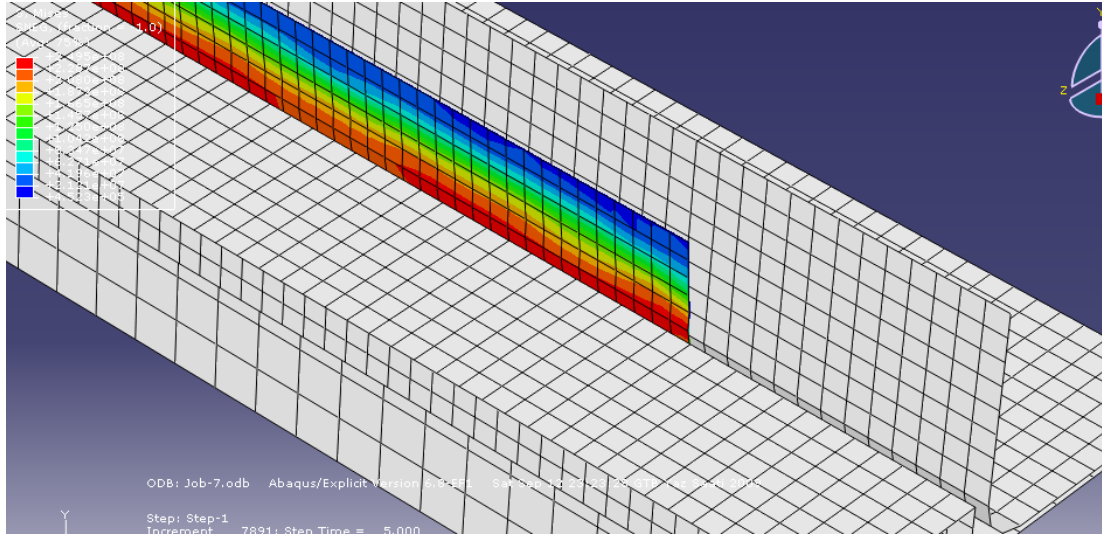
| kenar tipi büküm      |                            |                 |                          |
|-----------------------|----------------------------|-----------------|--------------------------|
| R5mm erkek kalıbı     |                            |                 |                          |
| sac kalınlıkları (mm) | “von misses” gerilme (Mpa) | plastik gerinme | max. yer değiştirme (mm) |
| 0,6                   | 123                        | 0,034           | 41                       |
| 0,8                   | 135                        | 0,077           | 40,8                     |
| 1                     | 229                        | 0,18            | 40,91                    |
| 1,2                   | 410                        | 0,64            | 42                       |

Kenar büküm yönteminde 90° 'lik kalıba göre incelendiğinde max. yer değiştirme yani deformasyonların sac kalınlığı ile azaldığı görülmektedir. Plastik gerinme ve malzeme üzerinde oluşan gerilmelerin sac kalınlığı ile arttığı görülmektedir.

Çizelge 6.6.2.2 R5mm'lik erkek kalıp uygulandığında gerilme-gerinme eğrisi



### 6.6.3 Kenar Bükümde Erkek Kalıp Çapı R7,5mm İçin Farklı Sac Kalınlıklarına Göre Analiz.

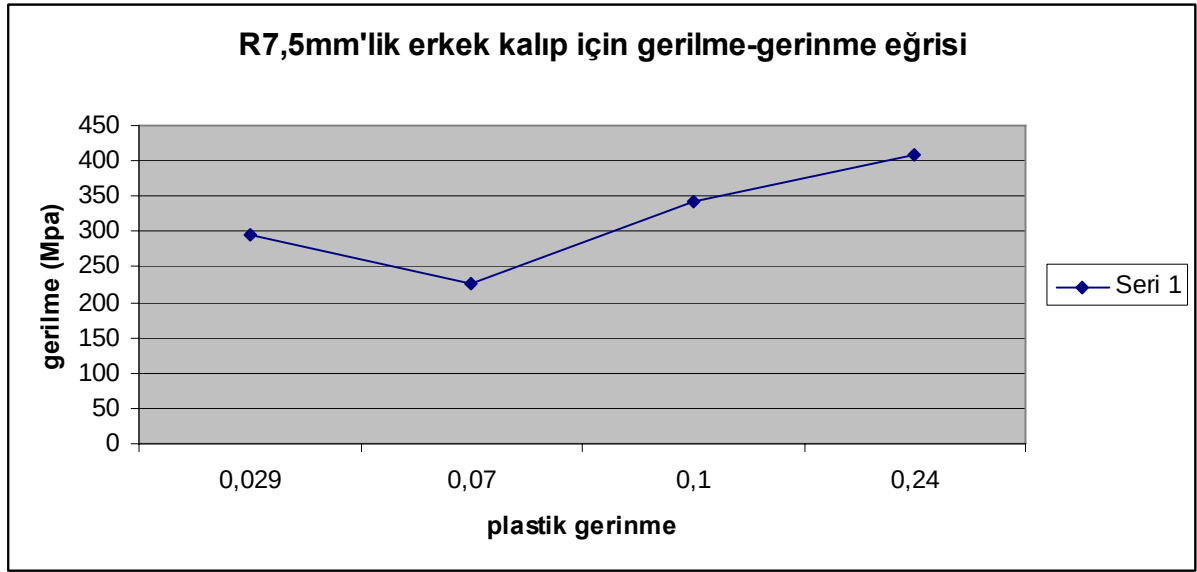


Şekil 6.6.3.1 R7,5mm’lik erkek kalıp yarıçapına göre kenar büküm analizi yapılması

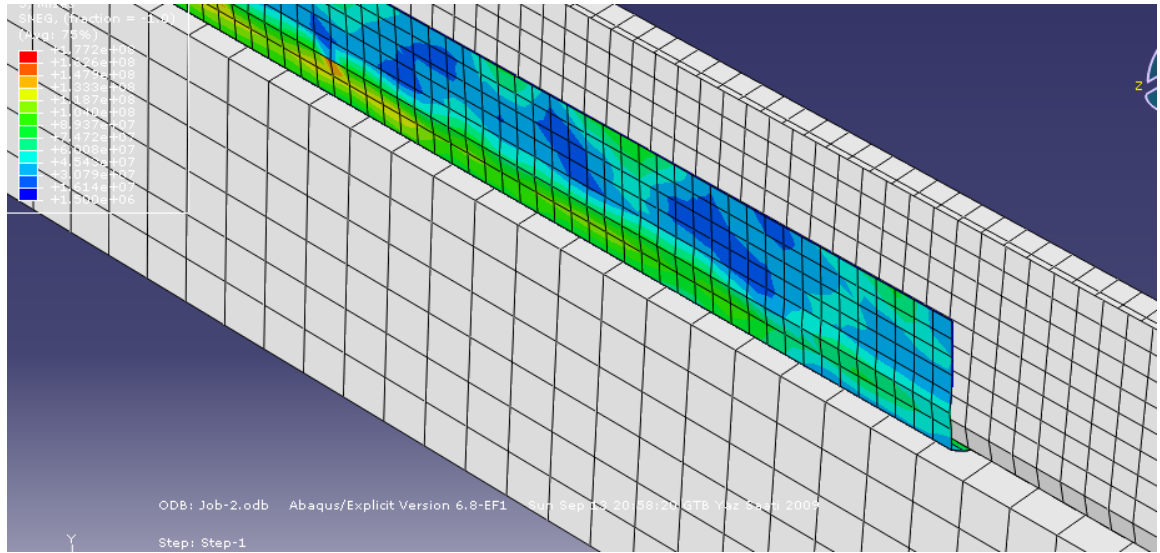
Çizelge 6.6.3.1 R7,5mm’lik erkek kalıp ile kenar bükümde farklı saclarda meydana gelen analiz sonuçları

| kenar tipi büküm         |                               |                    |                          |
|--------------------------|-------------------------------|--------------------|--------------------------|
| R7,5mm erkek kalıbı      |                               |                    |                          |
| sac kalınlıkları<br>(mm) | “von misses” gerilme<br>(Mpa) | plastik<br>gerilme | max. yer değiştirme (mm) |
| 0,6                      | 296                           | 0,029              | 40,5                     |
| 0,8                      | 226                           | 0,07               | 42,6                     |
| 1                        | 343                           | 0,1                | 42,4                     |
| 1,2                      | 408                           | 0,24               | 41,2                     |

Çizelge 6.6.3.2 R7,5mm'lik erkek kalıp uygulandığında gerilme-gerinme eğrisi



#### 6.6.4 Kenar Bükümde Erkek Kalıp Çapı R10mm İçin Farklı Sac Kalıklarına Göre Analiz

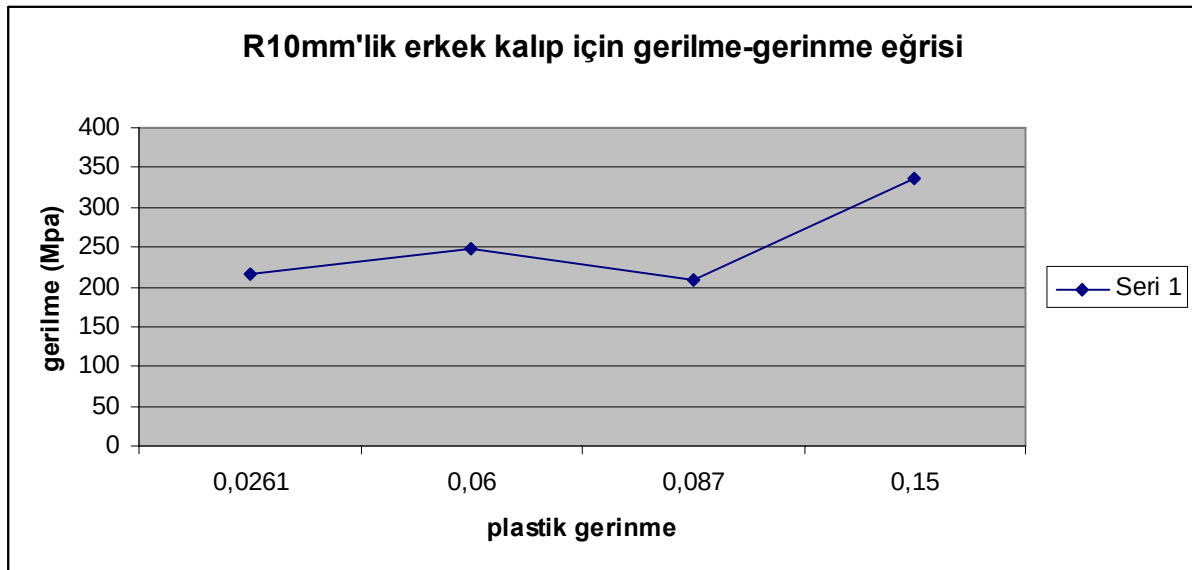


Şekil 6.6.4.1 R10mm'lik erkek kalıp yarıçapına göre kenar büküm analizi yapılması

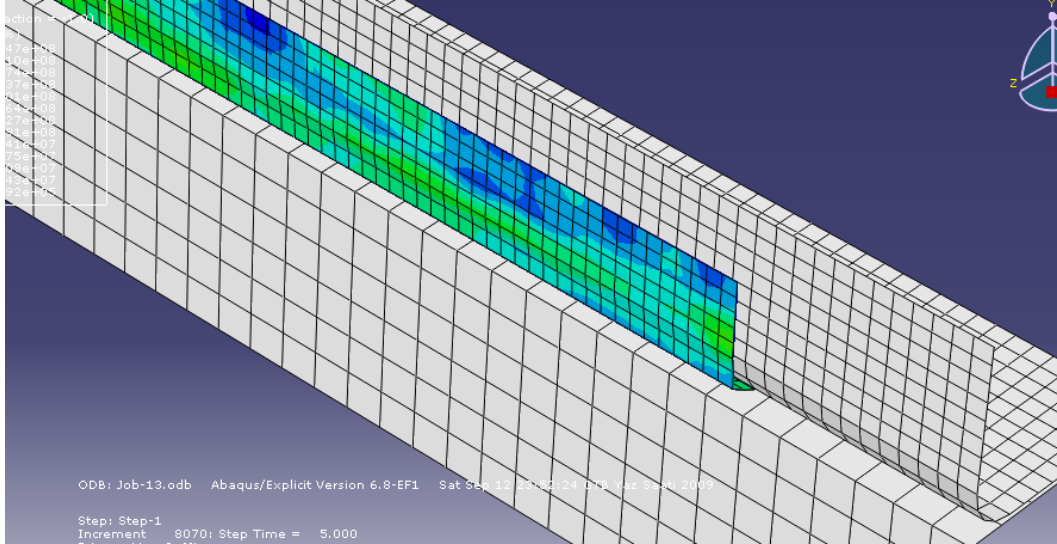
Çizelge 6.6.4.1 R10mm'lik erkek kalıp ile kenar bükümde farklı saclarda meydana gelen analiz sonuçları

| kenar tipi büküm         |                               |                    |                          |
|--------------------------|-------------------------------|--------------------|--------------------------|
| R10mm erkek kalıbı       |                               |                    |                          |
| sac kalınlıkları<br>(mm) | “von misses” gerilme<br>(Mpa) | plastik<br>gerinme | max. yer değiştirme (mm) |
| 0,6                      | 215                           | 0,0261             | 42                       |
| 0,8                      | 249                           | 0,06               | 42                       |
| 1                        | 208                           | 0,087              | 43,8                     |
| 1,2                      | 335                           | 0,15               | 41,6                     |

Çizelge 6.6.4.2 R10mm'lik erkek kalıp uygulandığında gerilme-gerinme eğrisi



### 6.6.5 Kenar Bükümde Erkek Kalıp Çapı R12,5mm İçin Farklı Sac Kalınlıklarına Göre Analiz.

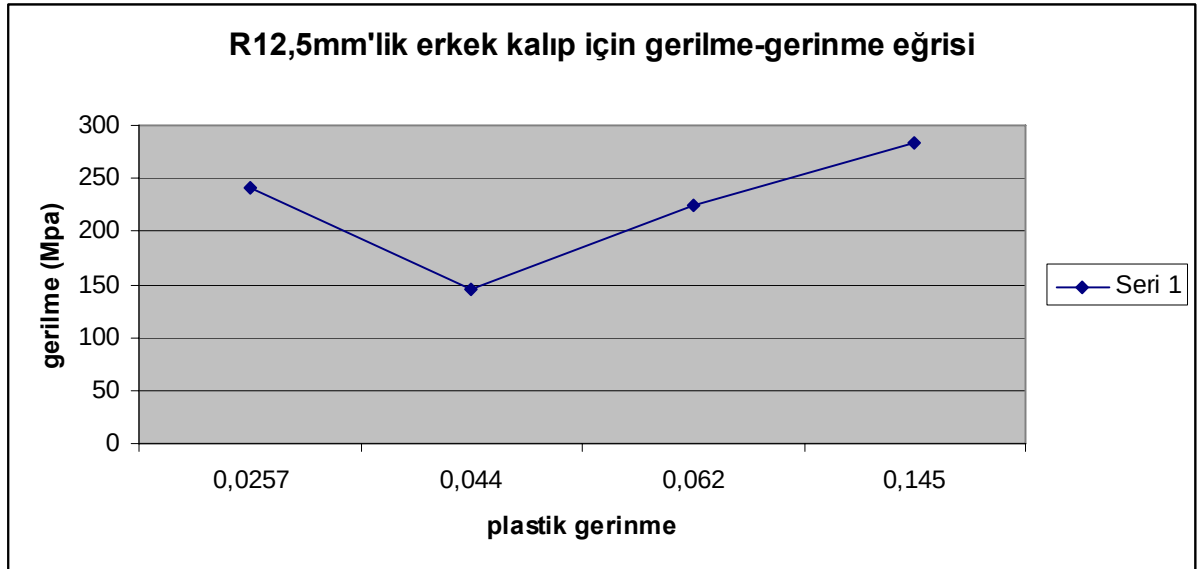


Şekil 6.6.5.1 R12,5mm’lik erkek kalıp yarıçapına göre kenar büküm analizi yapılması

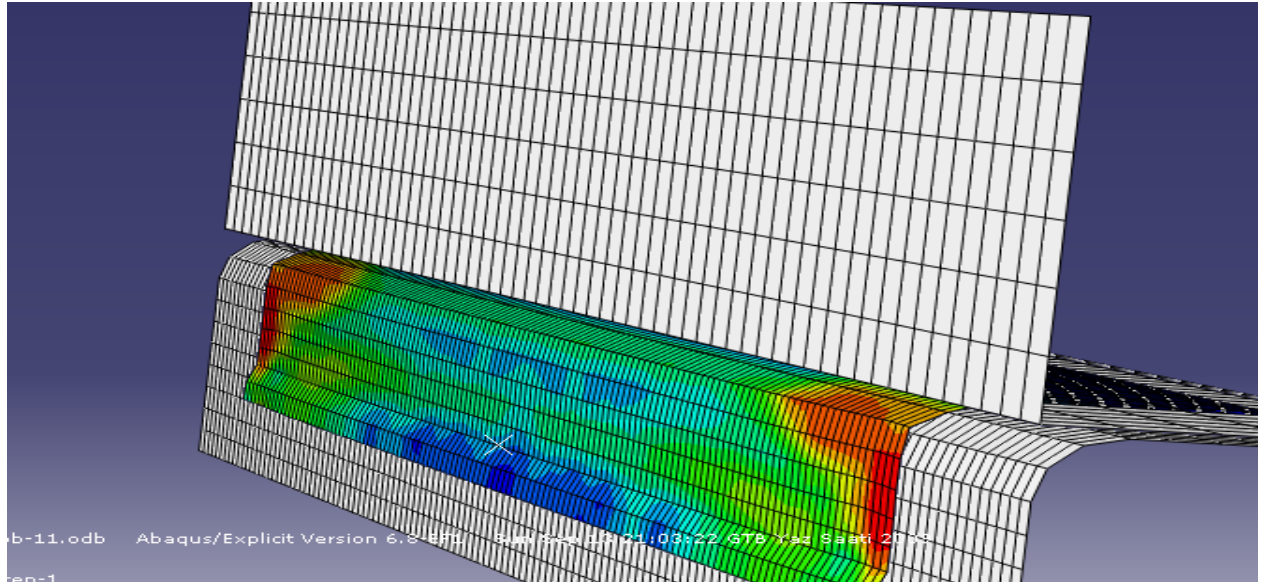
Çizelge 6.6.5.1 R12,5mm’lik erkek kalıp ile kenar bükümde farklı saclarda meydana gelen analiz sonuçları

| kenar tipi büküm         |                               |                    |                          |
|--------------------------|-------------------------------|--------------------|--------------------------|
| R12,5mm erkek kalıbı     |                               |                    |                          |
| sac kalınlıkları<br>(mm) | “von misses” gerilme<br>(Mpa) | plastik<br>gerilme | max. yer değiştirme (mm) |
| 0,6                      | 241                           | 0,0257             | 41,9                     |
| 0,8                      | 145                           | 0,044              | 42,6                     |
| 1                        | 225                           | 0,062              | 43,3                     |
| 1,2                      | 284                           | 0,145              | 43,6                     |

Çizelge 6.6.5.2 R12,5mm'lik erkek kalıp uygulandığında gerilme-gerinme eğrisi



#### 6.6.6 Kenar Bükümde Ters Yönde Erkek Kalıbın Hareketine Göre Analizin R10mm Kalıbına Göre Yeniden Yapılması

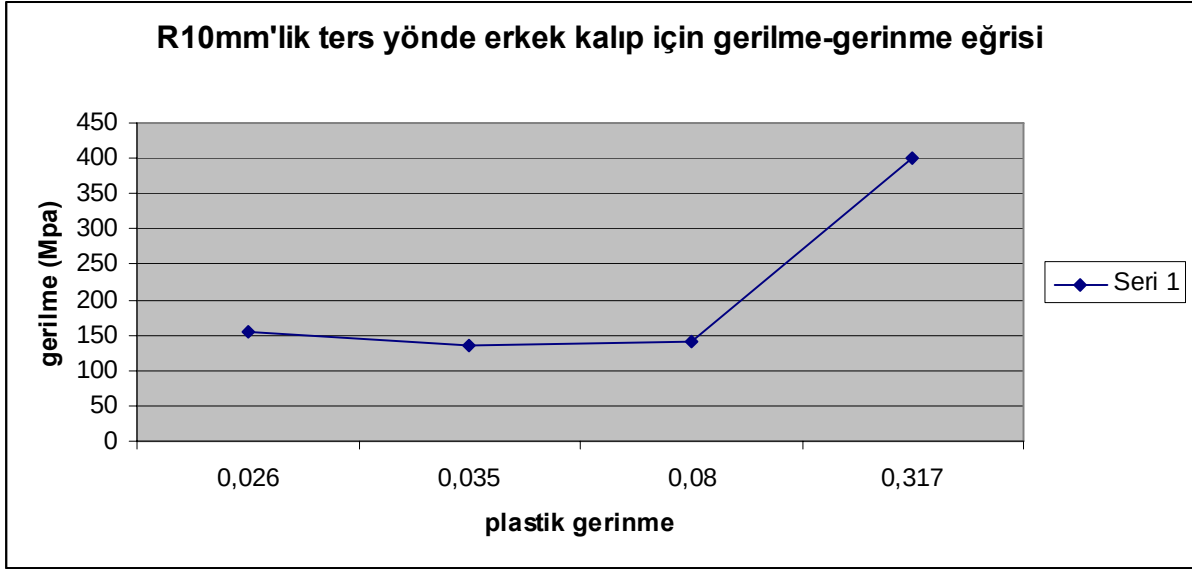


Şekil 6.6.6.1 R10mm'lik erkek kalıp yarıçapına göre ters yönde kenar büküm analizi yapılması

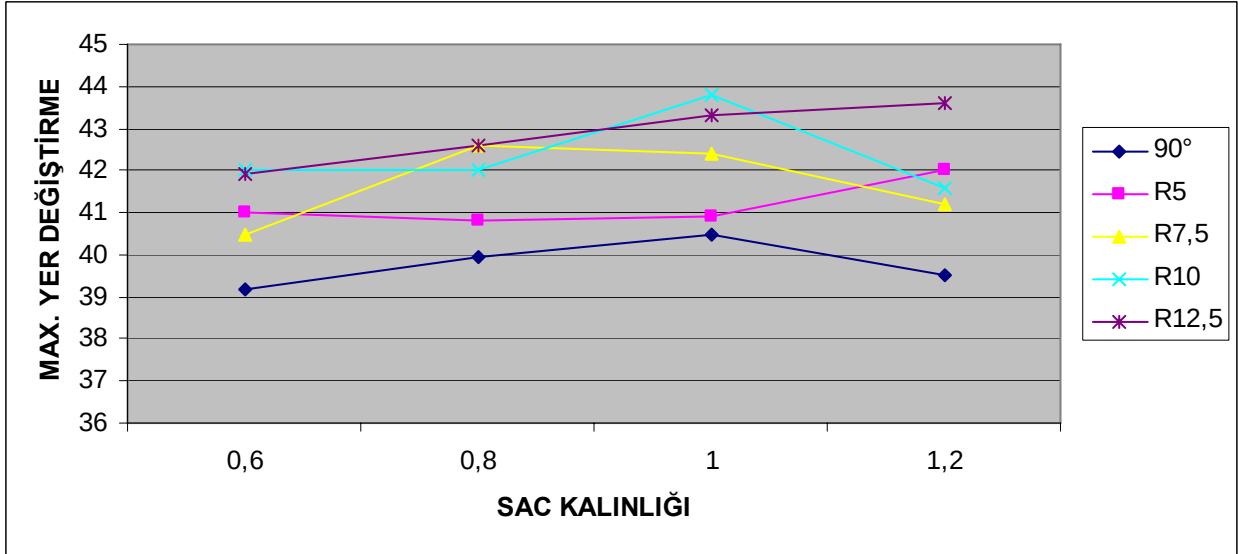
Çizelge 6.6.6.1 R10mm'lik erkek kalıp ile ters yönde kenar bükümde farklı saclarda meydana gelen analiz sonuçları

| kenar tipi ters büküm |                            |                 |                          |
|-----------------------|----------------------------|-----------------|--------------------------|
| R10mm erkek kalıbı    |                            |                 |                          |
| sac kalınlıkları (mm) | “von misses” gerilme (Mpa) | plastik gerinme | max. yer değiştirme (mm) |
| 0,6                   | 154                        | 0,026           | 42                       |
| 0,8                   | 135                        | 0,035           | 42                       |
| 1                     | 142                        | 0,08            | 42                       |
| 1,2                   | 401                        | 0,317           | 44                       |

Çizelge 6.6.6.2 R10mm'lik ters yönde erkek kalıp uygulandığında gerilme-gerinme eğrisi



Çizelge 6.6.6.3 Kenar bükümde farklı kalıplara göre sac kalınlığı-max. yer değiştirme grafiği



## 6.7 Sac Kalınlıklarına Göre Analiz Sonuçları ve Değerlendirmesi

Sac kalınlıklarına göre farklı büküm yöntemleri ve farklı erkek kalıp yarıçapları analiz edilip değerlendirilmiştir.

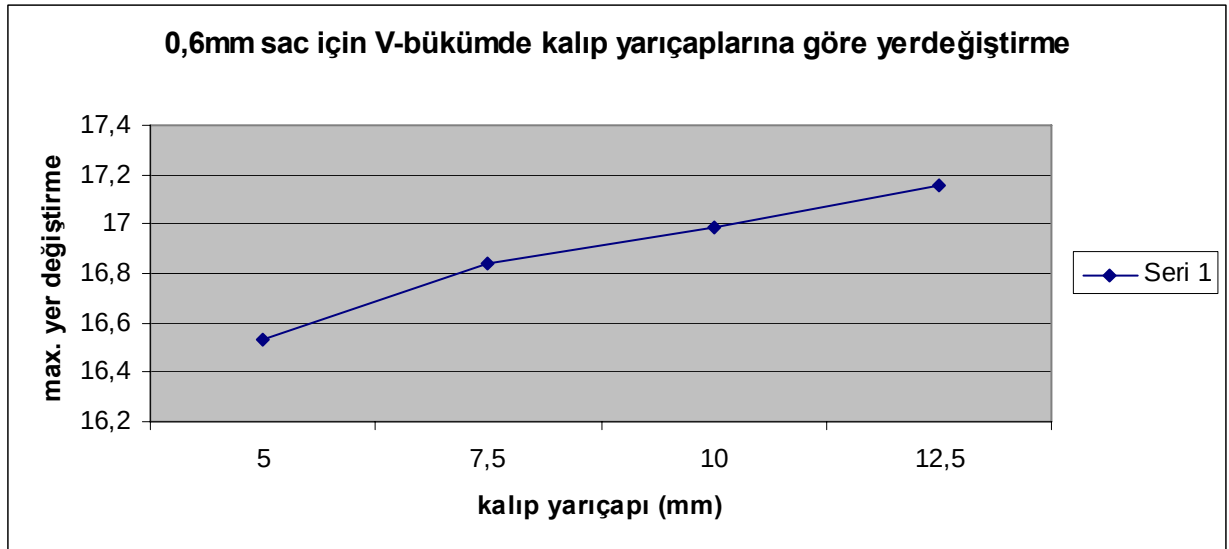
### 6.7.1 0,6mm Sac Metale Göre Analiz sonuçları ve Değerlendirmesi

Aynı sac kalınlığında erkek kalıp yarıçapı artırılarak uygulanan deney sonuçlarına göre kalıp çapı arttıkça malzemedeki max. yer değiştirme artmaktadır. Gerilme ve gerinim değerlerinde azalma görülmesini R12,5mm'lik kalıbın değerlerindeki artış bozmuştur. Bu artışın nedeninin alt kalıbın üst kalıba uyuşmamasından dolayı olduğu farz edilmiştir.

Çizelge 6.7.1.1 0,6mm'lik sac için V-tipi büküme göre analiz sonuçları

| 0,6mm sac için V-tipi büküm |                            |                 |                          |
|-----------------------------|----------------------------|-----------------|--------------------------|
| erkek kalıp                 | “von misses” gerilme (Mpa) | plastik gerilme | max. yer değiştirme (mm) |
| R5                          | 273                        | 0,045           | 16,53                    |
| R7.5                        | 269                        | 0,037           | 16,84                    |
| R10                         | 215                        | 0,032           | 16,99                    |
| R12.5                       | 314                        | 0,886           | 17,16                    |

Çizelge 6.7.1.2 0,6mm'lik sac için V-bükümde kalıp yarıçaplarına göre yer değiştirme

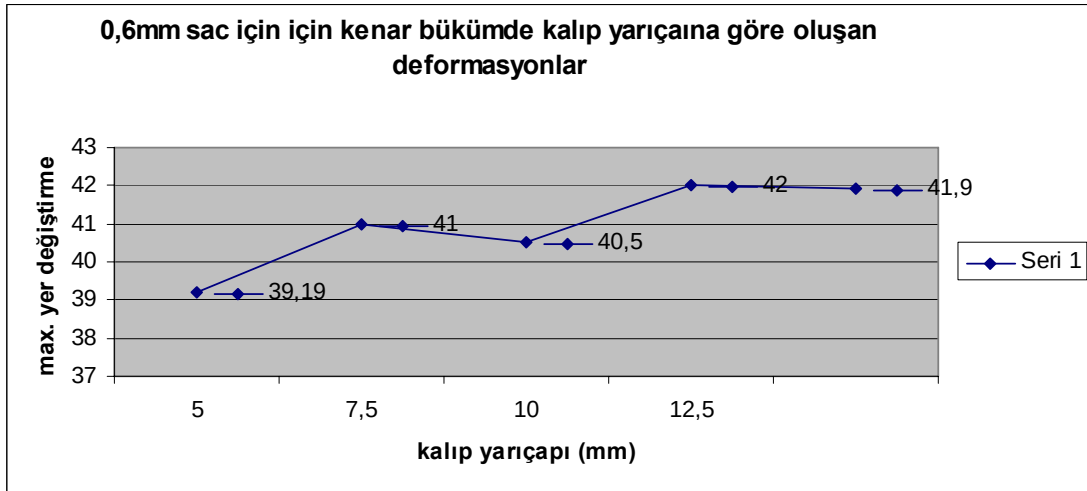


Şekilde görüldüğü gibi V-tipi bükümde kalıp yarıçapı büyüdükçe malzeme üzerinde deformasyonlar artmaktadır.

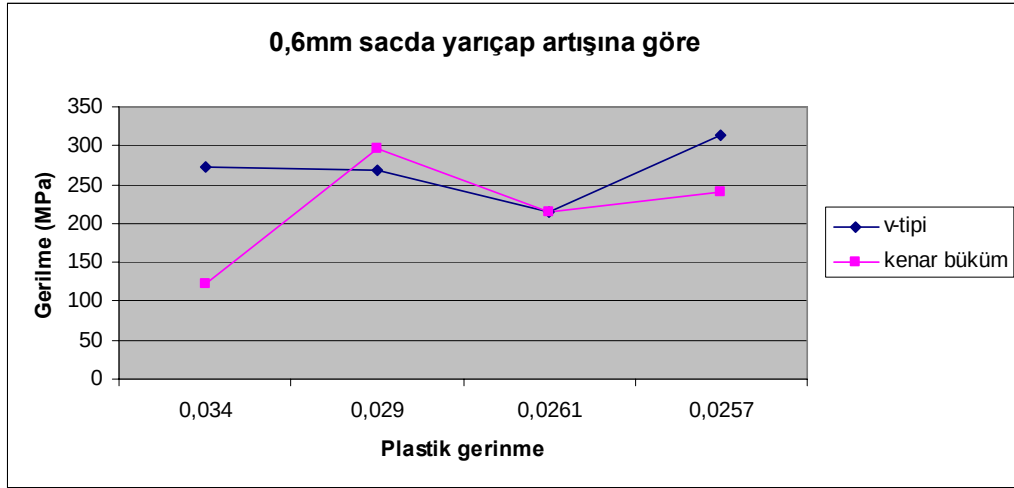
Çizelge 6.7.1.3 0,6mm'lik sac için kenar büküme göre analiz sonuçları

| 0,6mm sac için kenar büküm |                            |                 |                          |
|----------------------------|----------------------------|-----------------|--------------------------|
| erkek kalıp                | “von misses” gerilme (Mpa) | plastik gerinme | max. yer değiştirme (mm) |
| 90 derece                  | 188                        | 0,056           | 39,19                    |
| R5                         | 123                        | 0,034           | 41                       |
| R7.5                       | 296                        | 0,029           | 40,5                     |
| R10                        | 215                        | 0,0261          | 42                       |
| R12.5                      | 241                        | 0,0257          | 41,9                     |

Çizelge 6.7.1.4 0,6mm'lik sac için kenar bükümde kalıp yarıçaplarına göre yer değiştirme



Çizelge 6.7.1.5 Büküm şekline göre 0,6mm’lik sacda gerilme–plastik gerinim grafiği

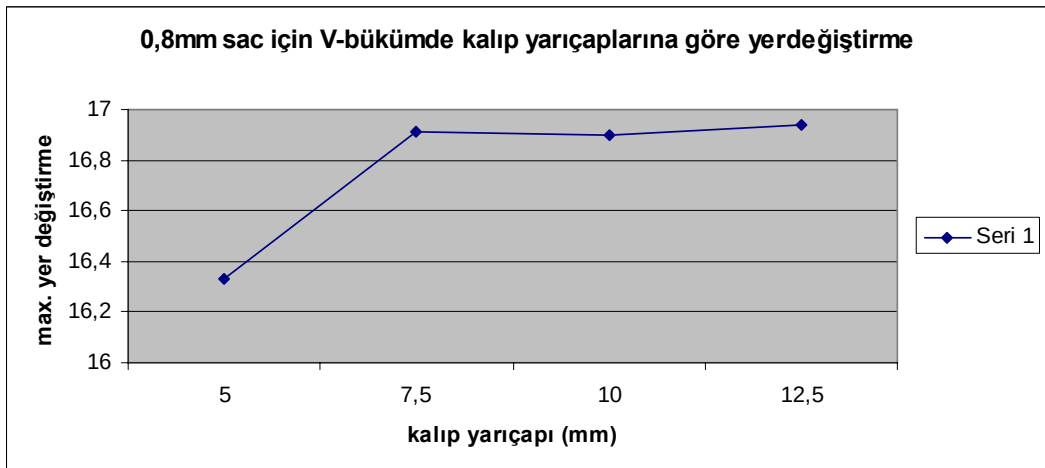


## 6.7.2 0,8mm Sac Metale Göre Analiz Sonuçları Ve Değerlendirmesi

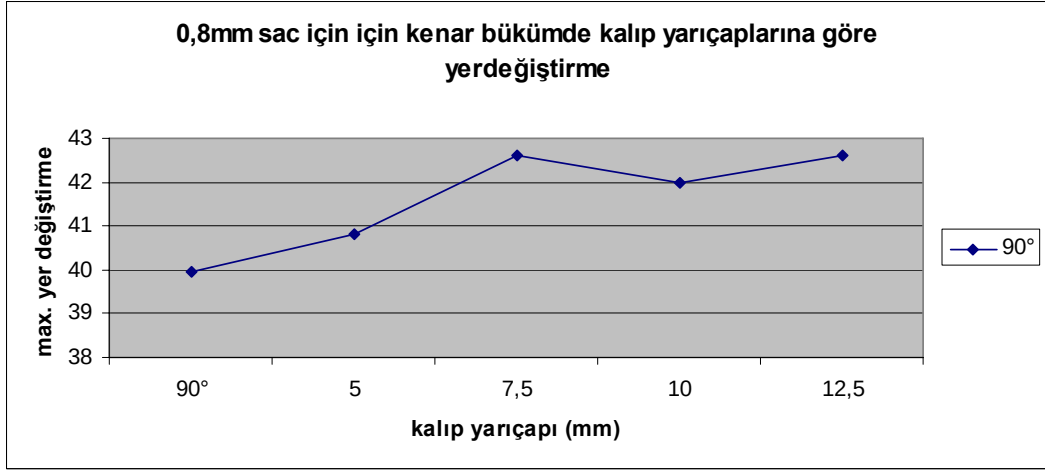
Çizelge 6.7.2.1 0,8mm’lik sac için V-tipi büküme göre analiz sonuçları

| 0,8mm sac için için V-tipi büküm |                            |                 |                          |
|----------------------------------|----------------------------|-----------------|--------------------------|
| erkek kalıp                      | “von misses” gerilme (Mpa) | plastik gerinim | max. yer değiştirme (mm) |
| R5                               | 278                        | 0,053           | 16,33                    |
| R7.5                             | 290                        | 0,055           | 16,91                    |
| R10                              | 258                        | 0,13            | 16,9                     |
| R12.5                            | 366                        | 1,02            | 16,94                    |

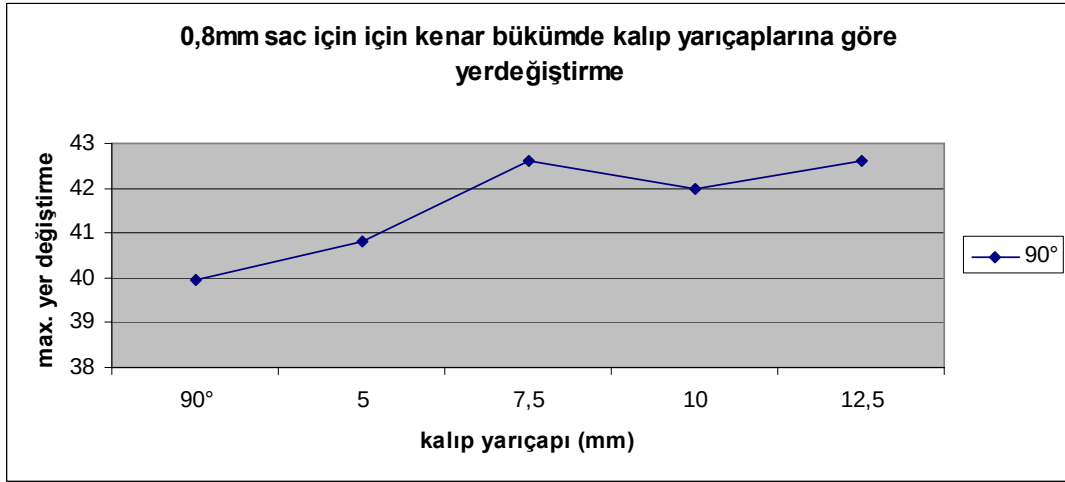
Çizelge 6.7.2.2 0,8mm’lik sac için V-bükümde kalıp yarıçaplarına göre yer değiştirme



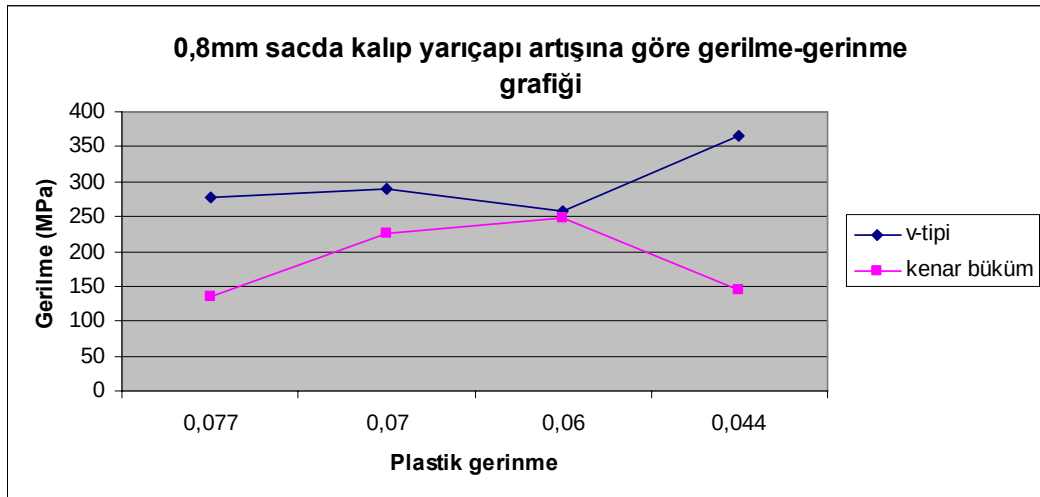
Çizelge 6.7.2.3 0,8mm'lik sac için kenar büküme göre analiz sonuçları



Çizelge 6.7.2.4 0,8mm'lik sac için kenar bükümde kalıp yarıçaplarına göre yer değiştirme



Çizelge 6.7.2.5 Büküm şekline göre 0,8mm'lik sacda gerilme-plastik gerinme grafiği

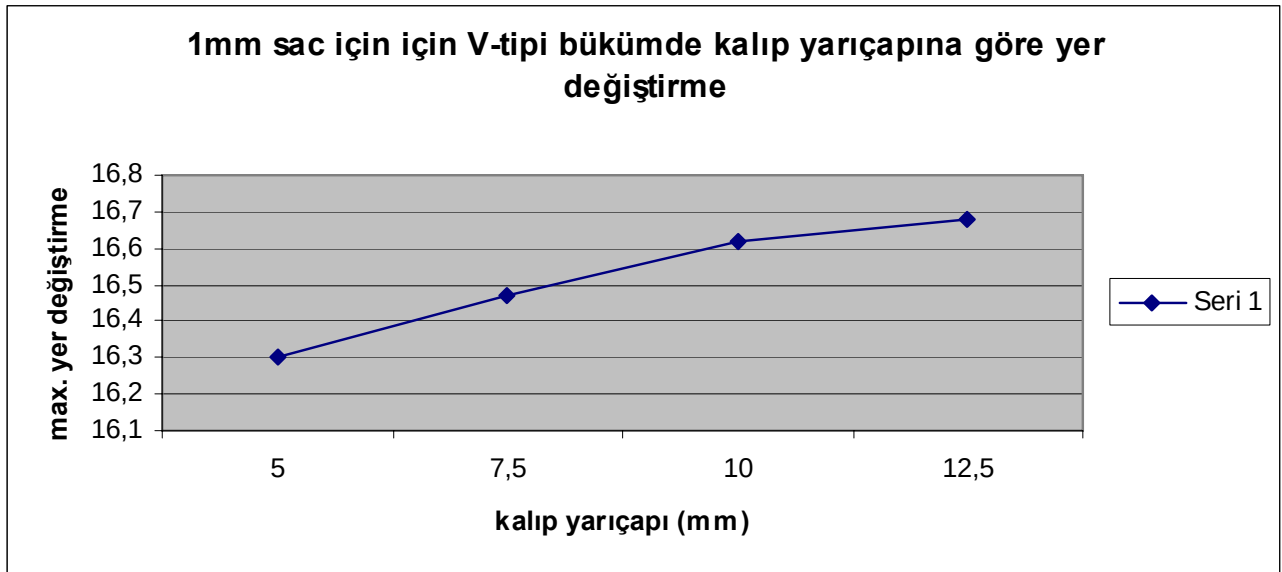


### 6.7.3 1mm Sac Metale Göre Analiz Sonuçları Ve Değerlendirmesi

Çizelge 6.7.3.1 1mm'lik sac için V-tipi büküme göre analiz sonuçları

| 1mm sac için için V-tipi büküm |                            |                 |                          |
|--------------------------------|----------------------------|-----------------|--------------------------|
| erkek kalıp                    | “von misses” gerilme (Mpa) | plastik gerilme | max. yer değiştirme (mm) |
| R5                             | 263                        | 0,065           | 16,3                     |
| R7.5                           | 271                        | 0,069           | 16,47                    |
| R10                            | 352                        | 0,48            | 16,62                    |
| R12.5                          | 510                        | 1,6             | 16,68                    |

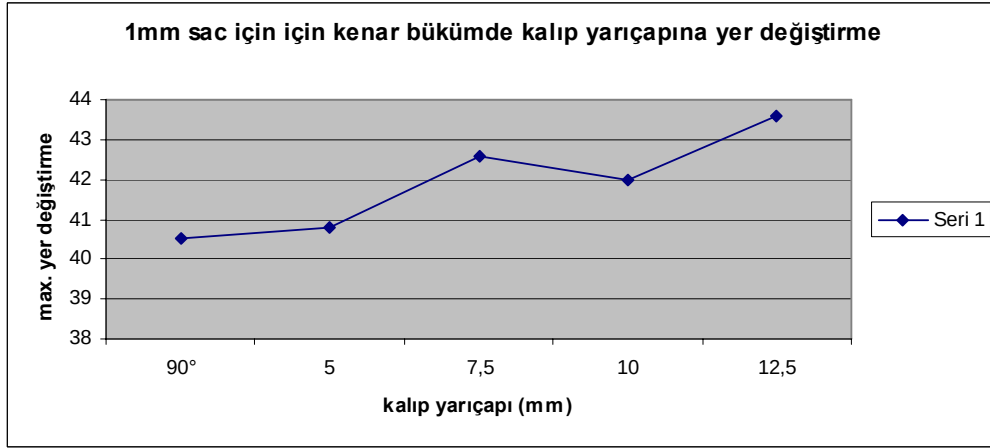
Çizelge 6.7.3.2.1mm'lik sac için V-bükümde kalıp yarıçaplarına göre yer değiştirme



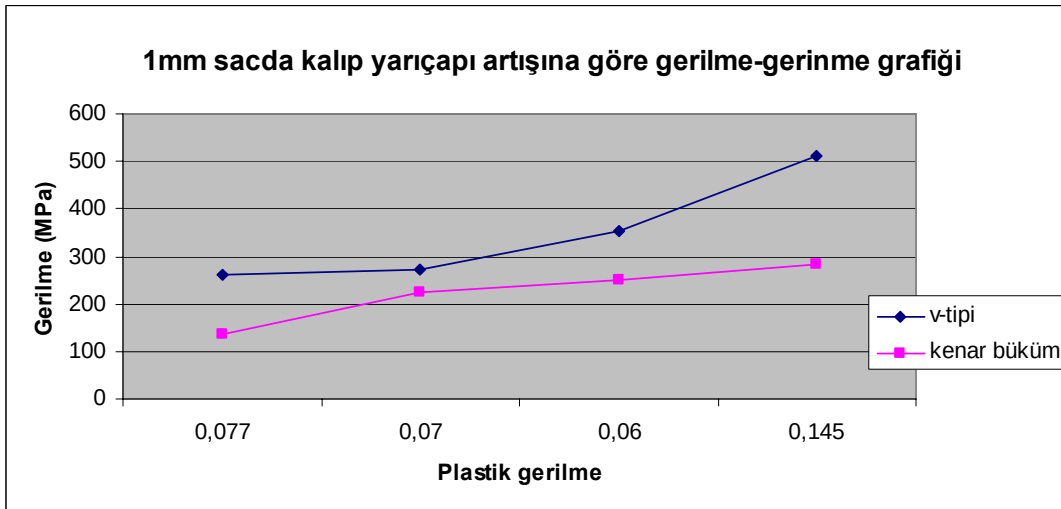
Çizelge 6.7.3.3 1mm'lik sac için kenar büküme göre analiz sonuçları

| 1mm sac için kenar büküm |                            |                 |                          |
|--------------------------|----------------------------|-----------------|--------------------------|
| erkek kalıp              | “von misses” gerilme (Mpa) | plastik gerinme | max. yer değiştirme (mm) |
| 90 derece                | 287                        | 0,76            | 40,5                     |
| R5                       | 135                        | 0,077           | 40,8                     |
| R7.5                     | 226                        | 0,07            | 42,6                     |
| R10                      | 249                        | 0,06            | 42                       |
| R12.5                    | 284                        | 0,145           | 43,6                     |

Çizelge 6.7.3.4 1mm'lik sac için kenar bükümde kalıp yarıçaplarına göre yer değiştirme



Çizelge 6.7.3.5 Büküm şekline göre 1mm sacda gerilme-plastik gerinim grafiği

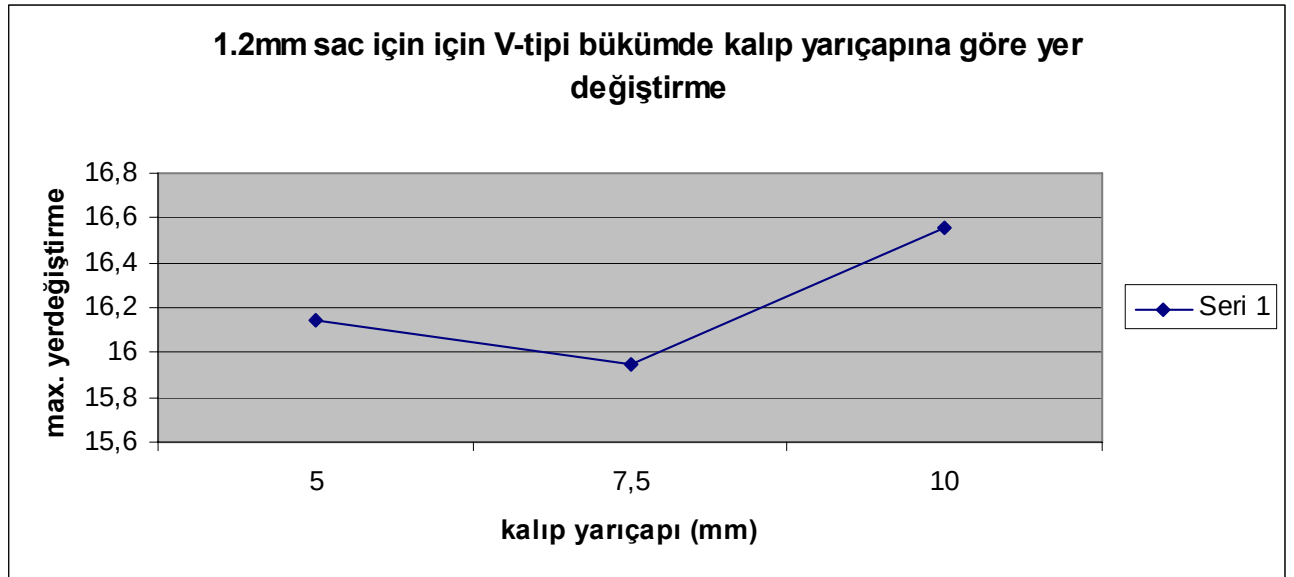


#### 6.7.4 1.2mm Sac Metale Göre Analiz Sonuçları Ve Değerlendirmesi

Çizelge 6.7.4.1 1.2mm'lik sac için V-tipi büküme göre analiz sonuçları

| 1.2mm sac için için V-tipi büküm |                               |                 |                          |
|----------------------------------|-------------------------------|-----------------|--------------------------|
| erkek kalıp                      | “von misses” gerilme (Mpa)    | plastik gerinme | max. yer değiştirme (mm) |
| R5                               | 228                           | 0,081           | 16,14                    |
| R7.5                             | 290                           | 0,07            | 15,95                    |
| R10                              | 443                           | 0,8             | 16,56                    |
| R12.5                            | kalıp sac uyuşmazlığı görüldü |                 |                          |

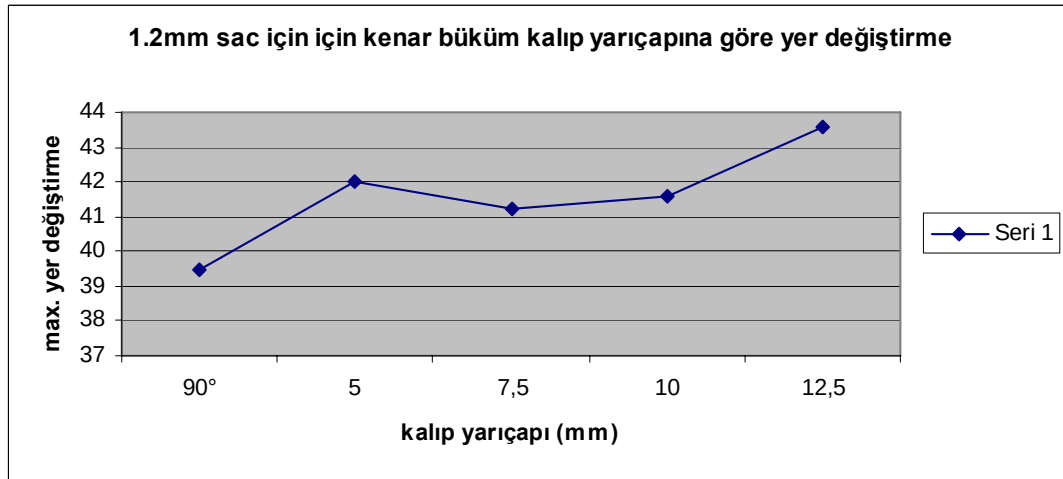
Çizelge 6.7.4.2.1.2mm'lik sac için V-bükümde kalıp yarıçaplarına göre yer değiştirme



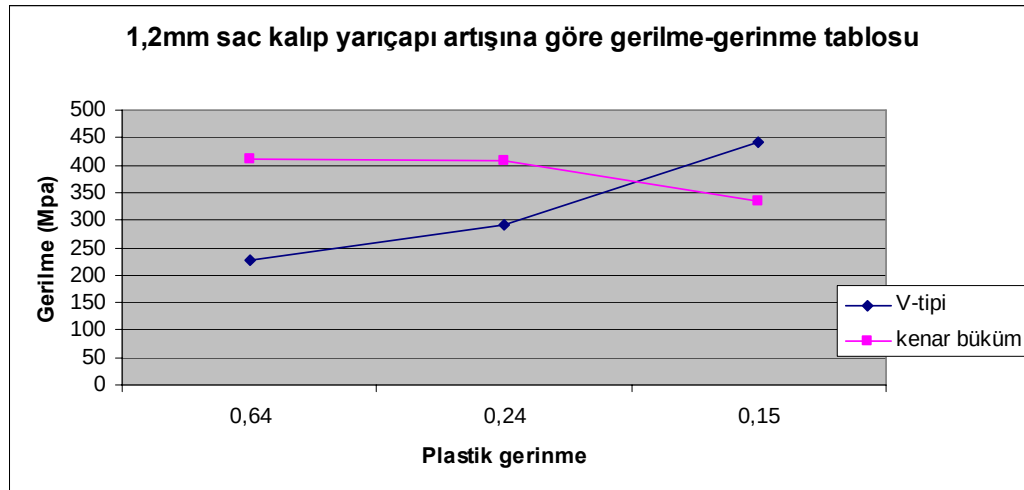
Çizelge 6.7.4.3 1.2mm'lik sac için kenar büküme göre analiz sonuçları

| 1.2mm sac için kenar büküm |                            |                 |                          |
|----------------------------|----------------------------|-----------------|--------------------------|
| erkek kalıp                | “von misses” gerilme (Mpa) | plastik gerinme | max. yer değiştirme (mm) |
| 90 derece                  | 443                        | 0,282           | 39,5                     |
| R5                         | 410                        | 0,64            | 42                       |
| R7.5                       | 408                        | 0,24            | 41,2                     |
| R10                        | 335                        | 0,15            | 41,6                     |
| R12.5                      | 284                        | 0,145           | 43,6                     |

Çizelge 6.7.4.4 1.2mm'lik sac için kenar bükümde kalıp yarıçaplarına göre yer değiştirme



Çizelge 6.7.4.5 Büküm şekline göre 1.2mm sacda gerilme-plastik gerinim grafiği



## 7. SONUÇ

Bu tezde farklı büküm yöntemleri, farklı erkek kalıpları ve farklı sac kalınlıklarıyla yaklaşık 40 adet analiz yapılmıştır. Analiz sonuçları incelendiğinde şu sonuçlar elde edilmiştir.

1. V-tipi bükümde aynı erkek kalıplarda sac kalınlığı arttıkça sacdaki deformasyonların azaldığı görülmektedir.
2. V-tipi bükümde sac kalınlığı arttıkça gerilme ve plastik gerinme değerlerinin arttığı görülmektedir.
3. V-tipi bükümde saca uygulanan erkek kalıp yarıçapı arttıkça sac metaldeki deformasyonlar artmaktadır.
4. Kenar bükümde aynı erkek kalıplarda sac kalınlığı arttıkça sacdaki deformasyonların arttığı görülmektedir.
5. Kenar bükümde sac kalınlığı arttıkça gerilme ve plastik gerinme değerlerinin arttığı görülmektedir.
6. Kenar bükümde saca uygulanan erkek kalıp yarıçapı arttıkça sac metaldeki deformasyonlar artmaktadır.
7. Kenar büküm ve V-tipi bükümde aynı erkek kalıp ve aynı sac için gerinme değerleri aynı çıkmasına rağmen, gerilme değerleri V-tipi bükümde daha yüksek seviyede çıkmaktadır.
8. İnce sac metallerde V-tipi bükümde gerilme daha fazla çıkarken, kalın sac metallerde kenar bükümde gerilme daha fazla çıkmaktadır.
9. Kalıp yarıçapı artmasıyla gerilme ve plastik gerinim değerleri artışı hızlanmaktadır.
10. Aynı sac kalınlığında kalıp yarıçapı artırılarak yapılan analizlerde erkek kalıp yarıçapı arttıkça malzemedeki maksimum yer değiştirme yani deformasyonlar artmaktadır.
11. Kenar büküm yönteminde saca verebileceğimiz büküm açısı en fazla 90° olduğundan sacdaki gerilme değerleri aynı malzeme ve kalınlıkları için daha düşük seviyede çıkmıştır.
12. V- bükümde büküm açısı daha yüksek seviyelere gelebildiği için gerilme değerleri aynı malzeme için daha yüksek değerlerde gözükmemektedir.

## 8. DEĞERLENDİRMELER

Büküm makineleri incelendiğinde makine çeşidi, erkek kalıp yarıçapı ve sac kalınlığının, maliyet, verimlilik ve kaliteyi etkileyen unsurlar olduğu görülmektedir.

Bu bağlamda makine çeşidi, erkek kalıp yarıçapı ve sac kalınlığının sonlu elemanlar analizi yöntemine göre incelendiğinde verimliliği ne şekilde etkilediği ortaya çıkmıştır.

Analiz kısmında oluşan deformasyonlara göre veriler incelenip yorum yapılmıştır. Bu analizlerin ışığı altında ulaşılan veriler ve yorumlar ile büküm yöntemi, kalıp seçimi ve sac kalınlıklarına göre sac metalin işlenmesinde metalde oluşan deformasyonlar görülerek, üretimde sac kalınlıkları ve kalıp seçiminin daha doğru yapılması sağlanacaktır.

Sonuç olarak sac metalde sac kalınlığı arttıkça kenar bükümde deformasyonların artması, V-tipi bükümde de deformasyonların azaldığından dolayı kalın sac metallerde V-tipi bükümün seçilmesi, ince sac metallerde is kenar bükümün seçilmesi işlenebilme kolaylığı ve malzeme kalitesi bakımından daha yararlı olacaktır.

Aynı kalıp ile büküm yapıldığında gerilmenin az olması önemseniyor ise kenar tipi bükümün seçilmesi gerekmektedir.

Yapılması istenen bükümde daha küçük kalıp yarıçapı seçilmesi bükümün daha az kuvvet uygulayarak yapılmasına olanak sağlamaktadır. Bu nedenle erkek kalıp yarıçapının gerekmedikçe düşük yarıçapta seçilmesi, işlem kolaylığı açısından daha uygun olacaktır. Bu da maliyete yansımaktadır.

Kenar tipi büküm standart 90° kenar bükümler için her zaman aynı açıya ulaştığından dolayı hem pratik hem de işlenebilirlik açısından kolaylık sağlayacaktır. V-tipi bükümlerde ise uygulanan işlem süresine göre 0° dan 165° ye kadar çok geniş alanda çalışılabildiğinden dolayı farklı çalışma açılarında V-tipi büküm makinelerinin daha uygun olduğu görülmektedir.

Yapılan analizlerde sac kalınlığı ve kalıp yarıçapına göre büküm çeşitleri incelenmiştir. Bunun yanı sıra farklı malzeme çeşitleri ve farklı kalıp şekillerine göre de büküm analizleri yapılarak uygun tipte büküm çeşitleri değerlendirilebilir.

## KAYNAKLAR

1. Behrouzi, A., Shakeri, M., Mollaei Dariani, B., (2008), “Inverse Analysis of Springback in Sheet Metal Forming by Finite Element Method”
2. Gajjar, Himanshu V., Gandhi, Anish H., Raval, Harit K., (2007), “Finite Element Analysis of Sheet Metal Airbending Using Hyperform LS-DYNA”
3. Giraud-Moreau, L., Borouchaki, H., Cherouat, A., (2007), “Adaptive remeshing for sheet metal forming in large plastic deformations with damage”
4. Groover, Mikell P., (2007), “Fundamentals of Modern Manufacturing Shearing and Bending”
5. Janke, S., (2005), “Analysis of a Sheet Metal Bucket Elevator Head”, University of Southern Queensland Faculty of Engineering and Surveying
6. Jingjing, X., Xiumei, W., Ping, Z., Yimin, W., (2003), “Springback Prediction in Sheet Metal Forming Combined Finite Element Method with Data Mining Technique”
7. Kurtulus, N., (2004), “Sac Formlamada Simulasyon”
8. Masuda, H., Yoshioka, Y., Furukawa, Y., (2001) “Preserving Form-Features in Interactive Mesh Deformation”
9. Öztekin, D., (2008), “Kimyasal Tanker Kargo Tanklarının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Yapısal Analizi”
10. Turgut, S., (2003), “Otomotiv Döküm Parçasının ve Kalıbının Tasarımı ve Analizi”
11. Vural, M., (2001), “EUT 231 Üretim Yöntemleri”, İTÜ Makina Fakültesi

## INTERNET KAYNAKLARI

- [1] <http://www.budinoks.com.tr> (2009)
- [2] <http://www.trumpf.com> (2009)
- [3] <http://www.salvagninigroup.com> (2009)
- [4] <http://www.bilgiustam.com> (2009)
- [5] <http://www.simulia.com> (2009)

## ÖZGEÇMİŞ

|                             |                   |                                                              |
|-----------------------------|-------------------|--------------------------------------------------------------|
| Doğum tarihi                | 13.05.1981        |                                                              |
| Doğum yeri                  | İstanbul          |                                                              |
| Lise                        | 1996-1999         | Beşiktaş Lisesi                                              |
| Lisans                      | 1999-2004         | Kocaeli Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü              |
| Yüksek Lisans               | 2006-2009         | Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Tasarım ve İmalat Bölümünde |
| <b>Çalıştığı kurum(lar)</b> |                   |                                                              |
|                             | 2006-2007         | Osel Elektrikte Ltd Şti.                                     |
|                             | 2008-Devam ediyor | Fagor Endüstriyel A.Ş.                                       |