



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**SAC METAL BÜKME İŞLEMİNDE KULLANILAN K-
FAKTÖRÜNÜN BELİRLENMESİ VE KALIP AŞINMA
SİMÜLASYONU**

EREN ARİF IŞIK

DANIŞMAN

DOÇ. DR. YILMAZ KÜÇÜK

BARTIN-2024



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**SAC METAL BÜKME İŞLEMİNDE KULLANILAN K-FAKTÖRÜNÜN
BELİRLENMESİ VE KALIP AŞINMA SİMÜLASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Eren Arif IŞIK

BARTIN-2024

BEYANNAME

Bartın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Doç. Dr. Yılmaz KÜÇÜK danışmanlığında hazırlamış olduğum “SAC METAL BÜKME İŞLEMİNDE KULLANILAN K-FAKTÖRÜNÜN BELİRLENMESİ VE KALIP AŞINMA SİMÜLASYONU” başlıklı yüksek lisans tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

25.01.2024

Eren Arif IŞIK

ÖNSÖZ

Tez konusunun belirlenmesi ve tez çalışmasını hazırlamamda destek ve yardımlarından dolayı danışman hocam Doç. Dr. Yılmaz KÜÇÜK' e teşekkür ederim.

Bugünlere gelmem için pek çok emeği olan, maddi ve manevi desteklerini asla esirgemeyen annem Şerife IŞIK' a, babam Ramazan IŞIK' a ve çalışmalarım esnasında desteğini esirgemeyen eşim Tuğba TOKAY IŞIK' a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarım kapsamında bana her türlü desteği sunan Emtis Endüstri Makina Tesis Tasarım İmalat ve İnşaat Sanayi ve Tic. Ltd. Şti. ' ne, mesai arkadaşlarıma ve büküm tezgâhı operatörü Alihan HACIOĞLU' na teşekkür ederim.

Eren Arif IŞIK

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SAC METAL BÜKME İŞLEMİNDE KULLANILAN K-FAKTÖRÜNÜN BELİRLENMESİ VE KALIP AŞINMA SİMÜLASYONU

Eren Arif IŞIK

Bartın Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Yılmaz KÜÇÜK

Bartın-2024,sayfa: 56

Tezin amacı sac levha tasarımlarında kullanılan ve büküm işleminde önemli rol oynayan k-faktörünün belirlenmesidir. Ayrıca bükümde kullanılan kalıpların kaç bükümde aşınacağı ve hangi zaman aralıklarla kontrol edilmesi gerektiğini belirlemek için kalıp aşınması simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Savunma sanayinde sıklıkla kullanılan Solidworks programının sac levha büküm işlemlerinde k-faktörü mevcuttur. Buradaki k-faktörü, parçanın bükümden önce lazer kesimden hangi boyda geleceğini belirler. Doğru ve uygun büküm için ve toleransa en yakın büküm işleminin gerçekleşebilmesi için k-faktörünün doğru belirlenmesi gerekmektedir. Savunma sanayinde çoğunlukla kullanılan AISI 304 paslanmaz, st37, AA5754-H111 alüminyum sac malzemelerinin farklı kalınlıklarda hangi k-faktörü kullanımının daha uygun olduğu ortaya çıkarılmıştır. Literatür taraması yapıldığında buradaki k-faktörü ile ilgili çok kısıtlı bilgi bulunmaktadır. Mevcut bilgiler ise genellikle 0,5 mm den 2 mm e kadar olan malzeme kalınlıkları için geçerli olup diğer kalınlıklar için sadece tahmin yürütülmeye bırakılmıştır. Yapılan çalışmalar sonrasında AA5754-H111 ve St37 malzemelerde 10 mm' ye kadar, AISI 304 paslanmaz malzemelerde ise 4 mm' ye kadar bükümde kullanılması gereken k-faktörleri belirlenmiştir. Tespit edilen k-faktörü değerlerine ilişkin doğrulama büküm işlemleri yapılmış ve karşılaştırmalı tablo şeklinde hazırlanmıştır.

Bu tez çalışması ile sac metal büküm işlemlerinde sıklıkla karşılaşılan doğru k-faktörü seçimi ve kalıp aşınması problemlerinin çözümüne yönelik bir tahmin sistematigi oluşturulmak istenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bükme, bükme kalıpları, k faktörü, kalıp aşınması, sac levha, simülasyon



ABSTRACT

M. Sc. Thesis

DETERMINATION OF K-FACTOR USED IN SHEET METAL BENDING PROCESS AND SIMULATION OF DIE WEAR

Eren Arif IŞIK

Bartın University

Graduate School

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Yılmaz KÜÇÜK

Bartın-2024, pp: 56

The aim of the thesis is to determine the k-factor, which is used in sheet metal designs and has an important role in the bending process. In addition, die wear simulation was carried out to determine how many bends the dies used in bending would wear out and at what time intervals they should be checked. The Solidworks program, which is frequently used in the defense industry, has a k-factor in sheet metal bending processes. The k-factor determines the size of the part that will be laser cut before bending. For correct and appropriate bending process closest to tolerance, the k-factor must be determined correctly. It has been revealed which k-factor is more appropriate to use in different thicknesses of AISI 304 stainless steel, st37, AA5754-H111 aluminum sheet materials, which are mostly used in the defense industry. When the literature is scanned, there is very limited information about the k-factor here. The available information is generally valid for material thicknesses from 0.5 mm to 2 mm, for other thicknesses it is only left to guess. After the studies, the k-factors that should be used in bending up to 10 mm in AA5754-H111 and St37 materials and up to 4 mm in AISI 304 stainless steel materials were determined. Verification bending operations regarding the determined k-factor values were carried out and prepared in the form of a comparative table.

With this thesis study, it was aimed to create a prediction system for solving the correct k-factor selection and die wear problems that are frequently encountered in sheet metal bending processes.

Keywords: Bending, bending dies, die wear, k factor, sheet metal, simulation



İÇİNDEKİLER

BEYANNAME	ii
ÖNSÖZ	iv
ÖZET	iv
ABSTRACT	vii
İÇİNDEKİLER.....	viiix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
TABLOLAR DİZİNİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Bükme İşlemi.....	1
1.2. Bükme Metotları.....	2
1.2.1. V - Bükme	3
1.2.2. U - Bükme	5
1.2.3. Kenar Bükme.....	6
1.2.4. Ezme Metodu.....	6
1.2.5. Oluk Bükme.....	6
1.3.Bükme İşlemini Etkileyen Faktörler.....	7
1.3.1. Malzeme Özelliklerinin Etkisi.....	7
1.3.2. Parça Dizaynı.....	7
1.3.3. Büküm Yarıçapı	8
1.3.4. Geri Esneme.....	8
1.4. Bükme Kalıpları.....	8
1.4.1. Ofset Bükme Kalıbı.....	9
1.4.2. Kavisli Bükme Kalıbı.....	9
1.4.3. Dar Açılı Bükme Kalıbı	10
1.4.4. Katlama Kalıbı	11
1.4.5. Kazboynu Stampalı Kalıp	11
1.4.6. Boşluklu Bükme Kalıp.....	12
1.5. Açınım Boyu Hesabı	12
1.6. K-Faktörü	13
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	16

3. MATERYAL VE YÖNTEM	21
3.1. Materyal.....	21
3.1.1. Alüminyum 5754 - H111 Özellikleri.....	21
3.1.2. St37 (S235JR) Özellikleri	22
3.1.3. AISI 304 Kalite Paslanmaz Çelik Özellikleri	22
3.2. Yöntem.....	23
3.2.1. Kullanılan Abkant Büküm Makinesi	24
3.2.2. Kullanılan Kalıplar	25
3.2.2.1. Kullanılan Alt Kalıplar	25
3.2.2.2. Kullanılan Üst Kalıp	26
3.3. Sac Metal Büküm Deneyleri	26
3.4. Doğrusal İnterpolasyonun Uygulanışı	28
3.5. Sonlu Elemanlar Analizi ile Kalıp Aşınma Simülasyonu.....	28
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	31
4.1. St37 (S235JR) Çeliği Bükümleri ve Sonuçları	31
4.2. AISI 304 Kalite Paslanmaz Çeliği Bükümleri ve Sonuçları.....	33
4.3. Alüminyum 5754-H111 Bükümleri ve Sonuçları.....	35
4.4. Kalıp Aşınması Simülasyon Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	43
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	52
KAYNAKLAR.....	54

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Sayfa No
1.1: Alt ve üst kalıp ile V büküm gösterimi	3
1.2: V yataklı kalıp görseli (üst - V genişliği 16 mm, alt - V genişliği 22 mm, sağ – V genişliği 35 mm, sol - V genişliği 50 mm).....	4
1.3: Serbest bükme (Diegel, 2002).....	4
1.4: U büküm prosesi (Suchy, 2006).....	5
1.5: Kenar bükme işlemi (Şahin, 2013).....	6
1.6: Oluk bükme işlemi uygulanmış sac metaller (Bozkurt, 2018).....	7
1.7: 90°' lik birden fazla bükümün tek seferde uygulanması.....	9
1.8: Kavisli kalıp ile bükülen bir sac malzeme	10
1.9: Dar açılı bükme kalıbı ile bükülen bir sac metal örneği	10
1.10: Katlama kalıbı kullanılarak bükülmüş bir sac metalin görünüşü	11
1.11: Kazboynu stampalı üst kalıp görseli (Bozkurt,2018).....	11
1.12: Açınım boyu bulmak için gerekli olan bilgiler görseli	13
1.13: k-faktörü oranının sac metal üzerinde gösterimi.....	14
1.14: 3 mm kalınlığında 60 mm yüksekliğinde ve 60 mm uzunluğunda SolidWorks programı kullanılarak oluşturulmuş bir parça tasarımı (a) ve k-faktörü 0,35 olarak girildiğinde parçanın açınım boyu uzunluğu (b).....	15
3.1: Bükümlerin gerçekleştirildiği hidrolik abkant pres.....	25
3.2: Hidrolik abkant preste alt ve üst kalıpla bükme işlemi	27
3.3: ANSYS programı kullanılarak oluşturulan bükme analizinde girilen koşullar	30
4.1: St37 (S235JR) çeliğinin öngörülen K değeri ve doğrusal interpolasyon hesaplanması sonucu ortaya çıkan uygun K değeri karşılaştırması	32
4.2: AISI 304 kalite paslanmaz çeliğinin öngörülen K değeri ve doğrusal interpolasyon hesaplanması sonucu ortaya çıkan uygun K değeri karşılaştırması	34
4.3: Alüminyum 5754-H111 malzemesinin öngörülen K değeri ve interpolasyon hesaplaması sonucu ortaya çıkan uygun K değeri karşılaştırması	36
4.4: 1,5 mm AISI 304 kalite paslanmaz çeliğinin verilen k-faktörlerine göre bükümleri....	39
4.5: 4 mm AISI 304 kalite paslanmaz çeliğinin 0,275-0,350 ve 0,425 k-faktörlerine göre bükümleri	39
4.6: 3 mm Alüminyum 5754 – H111 sacının doğrulama bükümü olan 0,409 ve 0,275-0,350-0,425 k-faktörlerine göre bükümleri.....	40

4.7: 5 mm Alüminyum5754 – H111 sacının doğrulama bükümü olan 0,341 ve 0,275-0,350-0,425 k-faktörlerine göre bükümleri.....	40
4.8: 6 mm Alüminyum5754 – H111 sacının 0,275-0,350-0,425 k-faktörlerine göre bükümleri	41
4.9: 6 mm Alüminyum5754 – H111 sacının 0,275-0,35-0,425 k-faktörlerine göre bükümleri sonrası ortaya çıkan çatlakların görünüşü.....	41
4.10: 3 mm St37 sacının doğrulama bükümü olan 0,192 ve 0,275-0,350-0,425 k-faktörlerine göre bükümleri.....	42
4.11: 5 mm St37 sacının 0,275-0,350-0,425 k-faktörlerine göre bükümleri.....	42
4.12: 6 mm St37 sacının 0,275-0,350-0,425 k-faktörlerine göre bükümleri.....	43
4.13: Alüminyum 5754 - H111, 3 mm sac metalin bir bükümü sonucu alt kalıpta ortaya çıkan deformasyon miktarı (mm).....	43
4.14: AISI 304 kalite paslanmaz, 3 mm sac metalin bükümü sonucu alt kalıpta ortaya çıkan deformasyon miktarı (mm).....	44
4.15: St37(S235JR) , 3 mm sac metalin bükümü sonucu alt kalıpta ortaya çıkan deformasyon miktarı (mm)	44
4.16: Alt kalıp radyusunda 0,05 mm aşınmanın oluşturduğu aç ı miktar ı	47
4.17: Alt kalıp radyusunda 0,1 mm aşınmanın oluşturduğu aç ı miktar ı.....	48
4.18: Alt kalıp radyusunda 0,15 mm aşınmanın oluşturduğu aç ı miktar ı	48
4.19: Alt kalıp radyusunda 0,2 mm aşınmanın oluşturduğu aç ı miktar ı	48

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo No	Sayfa No
1.1: Sertlik özelliklerine göre hava bükümü için k-faktörü tablosu	5
1.2: Bükme ucu değerleri ile K değeri bağlantısı	13
3.1: Alüminyum5754-H111 alaşımının kimyasal özellikleri (Kocaman, 2021)	21
3.2: Alüminyum5754-H111 alaşımının mekanik özellikleri (Kocaman, 2021).....	21
3.3: St37 çeliğinin kimyasal özellikleri (Kocaman, 2021).....	22
3.4: St37 çeliğinin mekanik özellikleri (Kocaman, 2021).....	22
3.5: AISI 304 kalite paslanmaz alaşımının kimyasal özellikleri (Şahin, 2013)	23
3.6: AISI 304 kalite paslanmaz alaşımının mekanik özellikleri (Şahin, 2013).....	23
3.7: Solidworks kullanılarak alınmış farklı k-faktörlerine göre oluşan açınım boyları	24
3.8: St37 (S235JR) numuneleri bükümünde kullanılan alt kalıplar	25
3.9: Alüminyum 5754 – H 111 numuneleri bükümünde kullanılan alt kalıplar	26
3.10: AISI 304 kalite paslanmaz numuneleri bükümünde kullanılan alt kalıplar	26
3.11: CK45 çeliğinin kimyasal kompozisyonu (% ağırlık).....	26
4.1: Farklı k-faktörleri kullanılarak bükülen St37 (S235JR) çeliğinin büküm sonu ölçüm sonuçları	31
4.2: St37 (S235JR) çeliğinin doğrusal interpolasyon hesaplaması sonucu ortaya çıkan K değerleri tablosu	31
4.3: Farklı k-faktörleri kullanılarak bükülen AISI 304 kalite paslanmaz çeliğinin büküm sonu ölçüm sonuçları	33
4.4: AISI 304 kalite paslanmaz çeliğinin doğrusal interpolasyon hesaplaması sonucu ortaya çıkan K değerleri tablosu	34
4.5: Farklı k-faktörleri kullanılarak bükülen Alüminyum 5754 – H111 alaşımının büküm sonu ölçüm sonuçları	35
4.6: Alüminyum 5754 – H111 alaşımının doğrusal interpolasyon hesaplaması sonucu ortaya çıkan K değerleri tablosu	35
4.7: Üç farklı sac metal bükümlerinin CK45 alt kalıbı radyusunda oluşturduğu büküm sayısına bağlı aşınma miktarları.....	45
4.8: Üç farklı sac metal bükümlerinin CK45 alt kalıbında en fazla aşınmanın olduğu bölgedeki büküm sayısına bağlı aşınma miktarları	46
4.9: Malzeme cinsine göre alt kalıbın radyusunda 0,05 mm, 0,1 mm ve 0,2 mm aşınma oluşturan büküm adetleri.....	46

4.10: Malzeme cinsine göre alt kalıpta en fazla aşınma olan bölgede 0,05 mm, 0,1 mm ve 0,2 mm aşınma oluşturan büküm adetleri	46
4.11: DIN-ISO 2768' e göre uzunluk ve büküm arasındaki tolerans tablosu	47
4.12: DIN-ISO 2768' e göre açı ve büküm arasındaki tolerans tablosu.....	47



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

mm	: milimetre
Mpa	: megapaskal
HV	: Vickers sertlik birimi
HB	: Brinell sertlik birimi
HRC	: Rockwell sertlik birimi
Si	: silisyum
Fe	: demir
Cu	: bakır
Mn	: manganez
Mg	: magnezyum
Cr	: krom
Zn	: çinko
Ti	: titanyum
Al	: alüminyum
C	: karbon
P	: fosfor
S	: kükürt
Ni	: nikel
SMAT	: Yüzey Mekanik Yıpratma Tedavisi

1. GİRİŞ

Otomotiv ve savunma sanayilerinde üretim aşamasında sıklıkla sac metal bükme işlemleri yapılmakta olup, bu işlemlerin önemli bir bölümü hidrolik abkant preslerle gerçekleştirilmektedir. Bu malzemeler alt ve üst kalıp arasında sıkıştırılarak istenen geometrik model elde edilmektedir. Bükümler malzemenin cinsine, kalınlığına, büküm boyuna ve farklı satıcılardan tedarik edilmelerine göre farklılık gösterebilmektedir. Bu farklılıklar sırasıyla şunlardır: Diğerine oranla sert olan malzemeyi bükmek için daha fazla kuvvet gerekir. Malzeme kalınlığı arttıkça büyük kalıpların kullanılması gerekir. Büküm boyu alt kanal kalıp açıklığından büyük olması gerekir. Farklı yarı mamul tedarikçilerinden temin edilen malzemelerin özellikleri farklılık gösterebilmektedir.

Malzemelerin mekanik özellikleri ve fiziksel özellikleri, doğrudan sacların şekillendirilme işlemlerini etkiler. Mekanik özellikler olarak; akma dayanımı, çekme dayanımı, sertlik, yüzde elastik uzama ve yüzde kesit daralması, kopma uzaması, gerinim hızı hassasiyeti, deformasyon sertleşme üssü vb. değerler gösterilebilir. Üretici firmalar tarafından verilen malzemenin ortalama mekanik özellikleri ile malzemenin gerçek mekanik özellikleri arasında %10-15 civarında farklılık görülebilmektedir (Aydemir, 2017). Bu durum, yapılacak bükümü doğrudan etkileyen bir etkidir. Bükümden önce lazer kesime gönderilen sac açınımı üzerinde tekrar değişiklik yapılması zordur. Parçanın açınımı kısa geldiyse tekrar uzatılması imkânsızdır. Eğer parça açınımı uzun geldiyse kesme ve tesviye işlemleriyle uygun form verilebilir fakat bu da iş yükünü artırır. Ayrıca hassas büküm gerçekleşmemiş olur.

1.1. Bükme İşlemi

Sac metal büküm işlemlerinde açınım boyunun belirlenmesi önemli bir unsurdur. Tolerans içerisinde doğru ve uygun açınım boyunu hesaplamak için araştırmacılar çoğunlukla sonlu elemanlar yöntemi ve nümerik yöntemler kullanmışlardır. Fakat nümerik yöntemlerin her süreç için geçerli olduğu konusu tartışmalı bir konu olmakla beraber, sonuca ulaşmak için tecrübe gerektirmektedir.

Malzemelerin sıcak veya soğuk olarak talaş kaldırılmadan kalıplar yardımıyla şekil verilmesine bükme işlemi denmektedir. Büküm esnasında sacın sadece bir bölümüne kalıcı deformasyon uygulanır. Sac metale uygulanan basınç sonucu oluşan gerilme, malzemenin akma dayanımının altında ise kalıcı şekil değişikliğine yol açmaz ve kuvvetin kalkmasıyla birlikte sac metal ilk formuna geri döner. Malzemenin akma gerilmesinin geçilmesiyle sac metal üzerinde kalıcı yani plastik deformasyon ve elastik geri kazanım yani geri yaylanma birlikte meydana gelmektedir. Sac metalin bükülmesi için gereken kuvvet, bükümün sağlanması için malzemenin gösterdiği dirençten daha büyük olmalı fakat olası kalıp hasarlarını önlemek için kalıp direncini geçmemelidir (Özdemir, 2010).

Bükme prosesinde; bükme kuvvetinin sacın üretim yönüne dik şekilde düz bir eksen etrafında uygulanması ile plastik deformasyon meydana gelmektedir. Bu durumda bükülmüş sac malzemenin iç yüzeyinde basma gerilmesi ve dış yüzeyinde çekme gerilmesi oluşur. Eşit kalınlığa sahip iki malzemeden bükme boyu uzun olan kısa olana oranla daha az miktarda plastiklik özelliğe sahiptir. (Yurci, 1991).

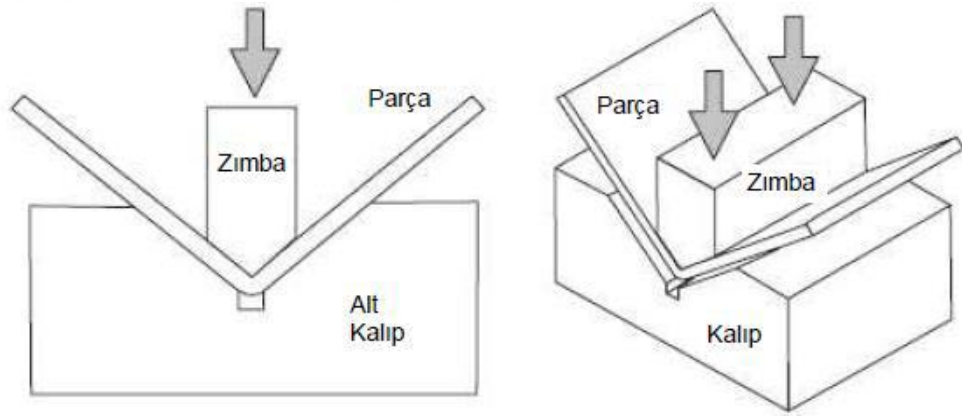
Sac malzemede genişliğin kalınlığa oranı arttığında büküm bölgesinin dış kısmında oluşan çekme gerilmesi değeri bükülen malzemenin dayanım sınırını aşabilmektedir. Bu oranın düşmesi ile beraber büküm bölgesinde iç kısımda genişlik artışı meydana gelmektedir. Nispeten kalın sac malzemelerde şekil bozukluğunun daha da belli olduğu görülmektedir. Bükümün yarıçapının artışıyla, bükmenin derecesinin azalmasıyla, bükülen malzemenin kalınlığının azalmasıyla, metal akışının da azaldığı bilinmektedir. İki aynı tür sac malzemeden genişliği az olanın büküm bölgesinde dış kısmında daha az, iç kısmında ise daha fazla metal akışı meydana gelmektedir. Sac malzemelerde büküm genişliği arttıkça bu durumun tam tersi meydana gelir. Sert sınıfa giren sac malzemeler büküm bölgesinde dış kısımda; yumuşak sınıfa giren sac malzemeler büküm bölgesinde iç kısımda daha fazla metal akışı meydana getirirler (Yurci, 1991).

1.2. Bükme Metotları

Sac metallere iki temel grupta bükme işleme uygulanabilir. Bunlar doğrusal alt ve üst kalıp iş birliğiyle oluşan bükümler ve dairesel hareketle oluşan bükümlerdir. Doğrusal alt ve üst kalıp bükümleri V - büküm ve U - büküm olarak ikiye ayrılırlar.

1.2.1. V - Bükme

V-bükme işleminde, sac malzeme üzerine üst kalıbın kuvvet uygulaması sonucu parçanın şekillenmesi sağlanır. Bu büküm işleminde kalıplar arası boşluğun parçanın kalınlığı kadar olması sağlanır. Bükülen parçanın büküm açısı üst kalıbın alt kalıba olan mesafesine göre ayarlanabilmektedir. Geri esnemeler dahil edilerek yapılan bükümler ile bükümün iç bölgesinde istenen geniş açı elde edilebilmektedir. 0,5 mm ile 25 mm sac kalınlığı arasındaki sac malzemelere bu büküm çeşidi ile istenen biçim verilebilmektedir. Sac malzeme alt ve üst kalıp arasında sıkıştırılabildiği için V bükme işleme geri esneme konusunda avantaj sağlamaktadır.



Şekil 1.1: Alt ve üst kalıp ile V büküm gösterimi

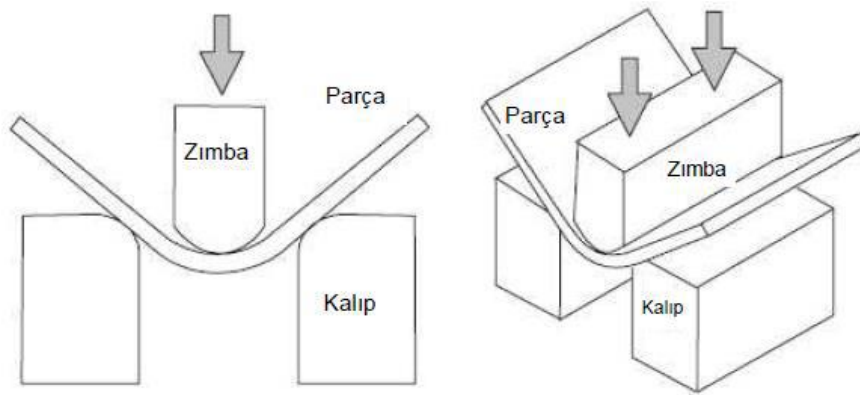
V kalıplar hidrolik abkant ile büküm işlemlerinde sıklıkla kullanılırlar. Bu kalıplar sac metal cinsine ve kalınlığına göre değişkenlik göstermektedir. Şekil 1.2’ de tek kalıpla bir çok kalınlığa sahip sac malzemelerin bükülebileceği bir X kalıbı bulunmaktadır. Bu tür bir kalıp dört farklı V alt kalıbın yerine kullanılabilmektedir. Dezavantajı ise sürekli farklı kalınlıklar ile bükümler gerçekleştiriliyorsa yönünün sürekli değiştirilmesi gerekmektedir.



Şekil 1.2: Dört farklı V kalıbı barındıran bir X kalıbı

Alt kalıbın hangi kanalının seçileceği teknik resimde yer alan bükme yarıçapına göre belirlenmektedir. Eğer teknik resim üzerinde bükme yarıçapı yer almıyorsa bükülecek malzemenin kalınlığına göre uygun V kalıbı seçilmektedir.

Bu büküm işleminde üst kalıp sac malzeme üzerine Şekil 1.3' te görüldüğü gibi dokunur ve V-bükümde olduğu gibi sonuna kadar gelmesi beklenmeden şekil verilir. Şekil verme işlemi alt kalıplardan destek alınarak gerçekleştirilir. Üst kalıp sac malzemenin üzerinden kalktığı anda geri esneme meydana gelir. Hava bükümü bir çok sac malzemeyi diğerlerine göre daha az ekipman ile bükebildiği için bu konuda avantaj sağlamaktadır.



Şekil 1.3: Serbest bükme (Diegel, 2002)

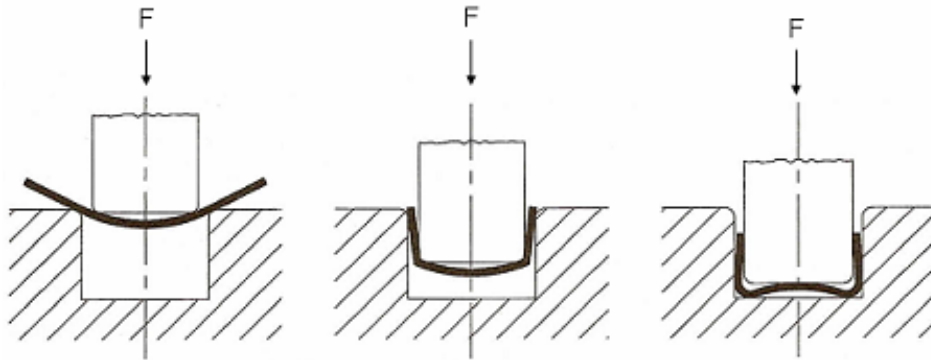
Bu büküm çeşidi için sac malzemelerin sertlik özelliklerine göre k-faktörü değerleri belirlenmiştir. Sac malzemelerin sertliği ve kalınlığı üzerine Tablo 1.1’ de k-faktörleri serbest bükme için kullanılmaktadır (Bozkurt, 2018).

Tablo 1.1: Sertlik özelliklerine göre hava bükümü için k-faktörü tablosu (Bozkurt, 2018)

Radyus	Yumuşak sac malzemeler	Orta sertlikte sac malzemeler	Sert sac malzemeler
Sac kalınlığına kadar	0,33	0,38	0,4
Sac kalınlığından 3 kat kalınlığa kadar	0,4	0,43	0,45
3 kat kalınlığından büyükse	0,5	0,5	0,5

1.2.2. U - Bükme

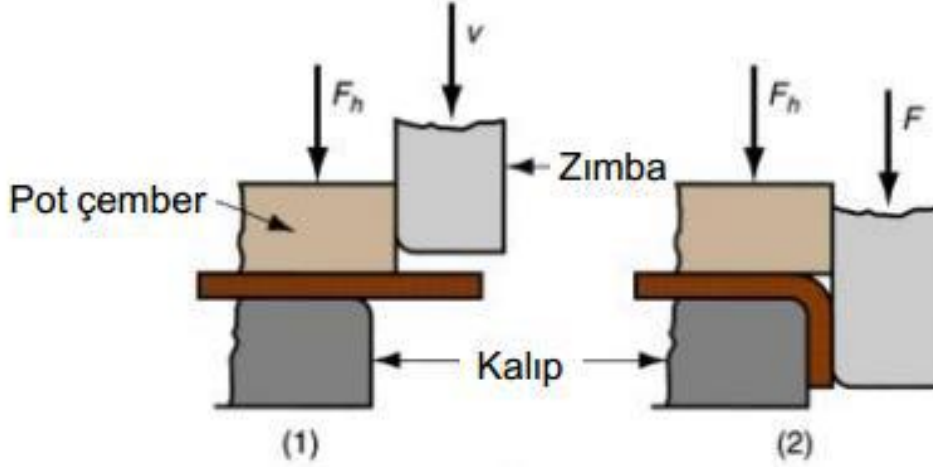
Tek bir kalıp ile U şeklinde sac malzemeler oluşturmak için U kalıpların kullanıldığı büküm şeklidir. Şekil 1.4 ‘te U bükümün aşamaları gösterilmiştir. U kalıpta yapılan büküm işlemleri, uygulanan kuvvetin, büküm radiusunun, kalıp açıklığının, kalıp derinliğinin ve kalıp radiusunun fonksiyonu olarak tanımlanabilir (Lange, 1985). Aynı açıdaki bükümler kıyaslandığında, U kalıp kullanılarak bükümde görülen şekil değiştirme miktarı, V kalıp kullanılarak bükümde görülen şekil değiştirme miktarından daha fazla olmaktadır (Şahin, 2013).



Şekil 1.4: U büküm prosesi (Suchy, 2006)

1.2.3. Kenar Bükme

Kenar bükme işleminde bükümün yapılması için birden fazla yükleme oluşmaktadır (Şekil 1.5). Sacın üst kısmına sacın sabitlenmesi için bir yük uygulanır. Daha sonra büküm için erkek kalıp saca kuvvet uygulayarak büküm işlemini gerçekleştirir (Karataş, 2019).



Şekil 1.5: Kenar bükme işlemi (Şahin, 2013)

1.2.4. Ezme Metodu

Ezme metodu işleminde sac malzeme, zımba ve dişi kalıp arasında kalacak şekilde ezilir ve büküm gerçekleştirilmiş olunur. Büküm işlemi yüksek tonajlı pres tezgahları yardımıyla gerçekleşir. 90° lik V bükme kalıbı yardımıyla büküm sağlanmaktadır. Ezme işleminin gerçekleştirilebilmesi için zımba ucu yarıçapının sac malzeme kalınlığından az olması gereklidir (Bozkurt, 2018).

1.2.5. Oluk Bükme

Oluk bükme işlemi, düz sac levhaların hem dayanımlarını artırmak hem de şekil verilmesi için uygulanır. Bu işlem kalıpları sayesinde tek seferde birden dörde kadar büküm işlemi gerçekleştirilebilmektedir. Oluk bükme uygulaması genellikle duvar panoları, çatı levhaları, gölgelik ürünlerinin üretilmesinde kullanılır.



Şekil 1.6: Oluk bükme işlemi uygulanmış sac metaller (Bozkurt, 2018)

1.3.Bükme İşlemini Etkileyen Faktörler

Büküm işleminin doğru bir şekilde yapılabilmesi için tasarım aşamasında, büküm hazırlığında ve büküm esnasında dikkat edilmesi gereken durumlar bulunmaktadır. Bu durumlar malzeme özelliklerinin etkisi, parça dizaynı, büküm yarıçapı ve geri esnemedir.

1.3.1. Malzeme Özelliklerinin Etkisi

Sac malzemenin homojen olmayan kalınlık değişimleri, akma gerilmeleri ve haddeleme yönleri bükme işlemini etkilemektedir. Sacın akma gerilmesi küçükse bükme kuvveti daha az, nispeten büyükse daha fazla bükme kuvvetinin uygulanması gereklidir. Bunun yanında akma gerilmesinin fazla olması malzemenin şekillendirilmesini zorlaştırır. Ayrıca sac malzemede kırılmalık ve geri esnemenin artmasına neden olur.

Bükülmesi gereken sac malzemenin hadde yönüne dik olması büküm için uygun olduğunu, hadde yönüne paralel olması da uygun olmadığını göstermektedir. Açının artması sac malzemenin bükme gerilmesine karşı koyma kabiliyetini iyileştirmektedir. Eğer kare kesilmiş bir sacın büküm esnasında haddeleme yönüne dikkat edilmezse bükülen parça üzerinde çatlakların oluşma ihtimali ortaya çıkmaktadır (Aydemir, 2017; Bozkurt, 2018).

1.3.2. Parça Dizaynı

Bükümü gerçekleştirecek sac malzemenin tasarımında dikkat edilmesi gereken noktalar bulunmaktadır. Büküm çizgisinin sac malzemenin kenarına yakın olması ve büküm çizgisine yakın deliklerin var olması doğru ve uygun bir bükümün gerçekleşmesini engelleyebilmektedir. Ayrıca büküm boyunun alt kalıp genişliğinden kısa olması da bükümün doğru gerçekleşmesini engelleyen faktörler arasında yer almaktadır.

1.3.3. Büküm Yarıçapı

Çoğu metalin r/s olarak bilinen bükme yarıçapı/kalınlık oranının yaklaşık olarak sabit kaldığı, çünkü plastiklik özelliğini r değerini sınırlayan başlıca etken olduğu bilinmektedir. Başka bir etken ise büküm esnasında meydana gelen pekleşmedir. Bükülen malzemede pekleşme durumu sac malzemenin çeşitlerine göre ve ısı işleme bağlı olarak değiştiği bilinmektedir. Büküm yarıçapı, bükülmek istenen sac malzemenin mekanik özelliklerine göre ve bükümün yapıldığı üst kalıbın şekline de bağlıdır (Bozkurt, 2018).

1.3.4. Geri Esneme

Sac malzemeye kalıbın üstten kuvvet uygulayarak şekil vermesinden sonra yukarı kalkması esnasında sacın elastik olarak değişime uğraması geri esneme olarak tanımlanmaktadır (Bozkurt, 2018).

Geri esnemenin fazla olması bükümün doğruluk toleransı dışında kalmasına neden olması istenmeyen bir durumdur. Geri esneme miktarlarının hesaplanıp bükümün o doğrultuda gerçekleştirilmesi gereklidir.

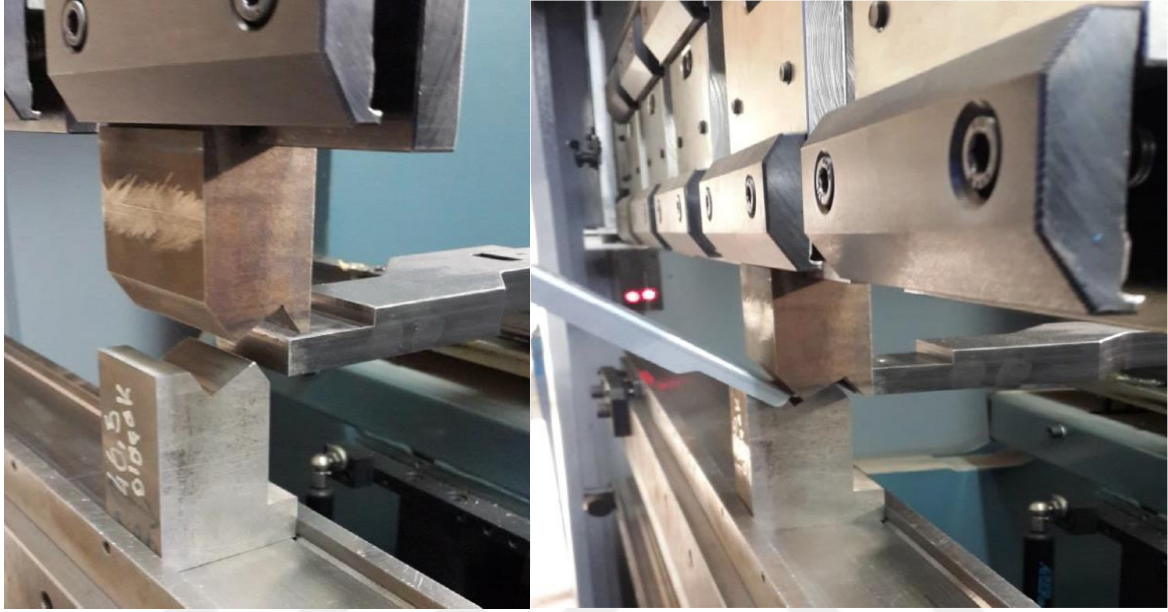
Geri esnemeyi etkileyen faktörler ise; sac malzemenin kalınlığı, sac malzeme üstünde üst kalıbın ütüleme olarak adlandırılan bekleme süresi, kullanılan kalıbın ölçüleri ve uygulanan yük parametreleri olarak belirtilmektedir (Hekim, 2016).

1.4. Bükme Kalıpları

Sanayide bükme uzunluğu abkant preslerde 8000 mm' ye kadar; tonajlar ise 500 tona kadar yapılabilmektedir. Farklı kalıpların çıkarılıp takılabilmesi abkant preslerin en önemli avantajlarından biridir. Bu sayede en uygun alt ve üst kalıp rahatlıkla seçilip uygulanabilmektedir. Bu sayede çeşitli sac metallerin bükümü gerçekleştirilmektedir. Özellikle strok ayarının yapılabilmesi, hidrolik abkant preslerin aşırı yüklemesini engellemektedir (Bozkurt, 2018). Genellikle kullanılan büküm çeşitleri; 90° V bükme, ofset bükme, kavisli bükme, dar açılı bükme, katlama, bükme – katlama ve ardışık bükmelelerdir. (Yurci ME, 1991).

1.4.1. Ofset Bükme Kalıbı

Ofset bükme kalıp kullanılarak 90° lik birden fazla bükümler tek seferde yapılabilmektedir. Bu kalıp genellikle 3 mm kalınlığa kadar olan sac parçaların bükümünde kullanılır. Şekil 1.7' de ofset bükmeye örnek gösterilmiştir.



Şekil 1.7: 90° lik birden fazla bükümün tek seferde uygulanması

1.4.2. Kavisli Bükme Kalıbı

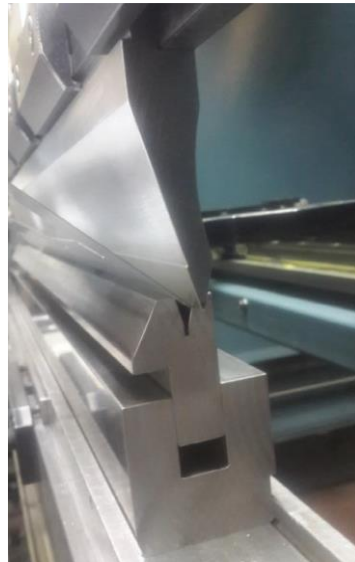
90° lik açığa sahip kalıp ve stampa ikilisi ile gerçekleştirilir. Stampa büküm esnasında kalıba oturduğunda bükülmüş parçanın iç radyusu, stampa ucunun belirli bir bölümüyle kesişir. Bu sayede sac malzemeye form verilmektedir. Üst kalıbın hızının fazla olması, daha küçük büküm yarıçapının oluşması ve bükülmüş sac malzemenin stampa kavisini daha iyi sarmasına neden olur.



Şekil 1.8: Kavisli kalıp ile bükülen bir sac malzeme

1.4.3. Dar Açılı Bükme Kalıbı

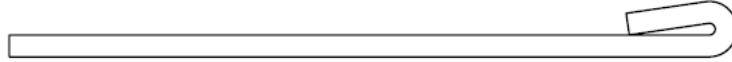
Dar açılı bükümde stampa ve kalıp birleşimi tam olarak sağlanmaz. Bu büküm katlama bükümü öncesi yapılan bir proses olarak görülebilmektedir. Amacı dâhilinde olabildiğince dar açı elde edilmek istenir. Dar açılı kalıpta bükülen malzemede sertleşme meydana gelir ve şekil verme esnasında kırılmalar meydana gelebilmektedir. Bu durum katlama işlemlerinde karşılaşılan en büyük dezavantaj olarak görülmektedir. Bu sebeple katlama işlemi genellikle ince kalınlıklardaki sac metallere uygulanır (Bozkurt, 2018).



Şekil 1.9: Dar açılı bükme kalıbı ile bükülen bir sac metal örneği

1.4.4. Katlama Kalıbı

Katlama kalıbı kullanılarak, sac metal ucunda bulunan çapağı içeri çevirme ve parçanın dayanımını artırması sağlanmaktadır. Sac malzemenin ucu 180° bükülerek birbirinin üzerine gelmesi sağlanır. Bu aşamadan önce dar açılı büküm gerçekleştirilmelidir.



Şekil 1.10: Katlama kalıbı kullanılarak bükülmüş bir sac metalin görünüşü

1.4.5. Kazboynu Stampalı Kalıp

Bu kalıplar genellikle ardışık bükümleri gerçekleştirilmesi için kullanılmaktadır. Kazboynu ve boşluklu olarak düzenlenebilen bazı stampa tipleri bulunmaktadır (Şekil 1.11).

Üst kalıplar genellikle düz olarak tasarlanırlar. Fakat bazı durumlar imalat kolaylığı sağlaması ve üst kalıbın dayanıklılığı artırmak için çıkıntılı olarak tasarlanmaktadır. Bu kalıp kullanılarak büküm esnasında önceden bükülmüş kısımlar kalıbın iç boşluğuna denk getirilir. Bu sayede bükülmüş sac metal başka bir bölgesinde daha bükülürken kalıp-sac metal çarpışması engellenir ve sağlıklı bir büküm gerçekleştirilir.



Şekil 1.11: Kazboynu stampalı üst kalıp görseli (Bozkurt,2018)

1.4.6. Boşluklu Bükme Kalıp

Bu bükme kalıbında üst kalıbın tam oturmasına gerek yoktur. Daha önceden hesaplanmış olan strok doğru şekilde uygulandığında parçanın istenen forma gelmesi sağlanmış olur. Dik kenarlı şekilde de üretilebilen bu kalıp genellikle V bükme şeklindedir.

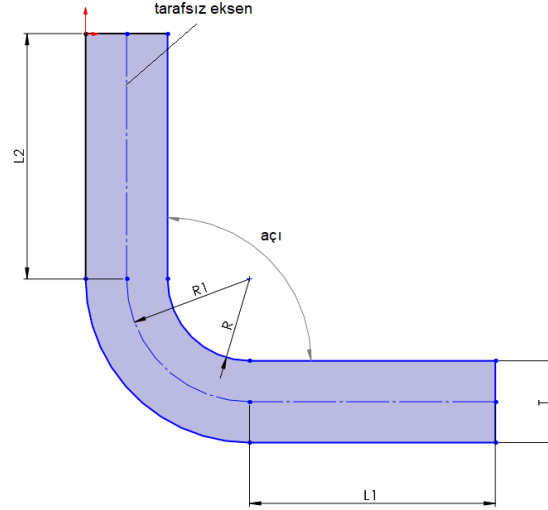
Boşluklu bükme kalıp kullanılırken istenen açılış üst kalıbın alt kalıba giriş derinliği ile ayarlanabilir. Kalıp açıklığının artışı ile uygulanan kuvvet azalmaktadır. Açıklığın azalması ise büyük kuvvetleri gerektirmektedir. 12 mm kalınlığa kadar olan sac metaller için kalıp açıklığı genellikle sac kalınlığının 8 katı olarak seçilir. Bu durum sac kalınlığı ile aynı bükme yarıçapı sağlamaktadır. Bu kalınlıktan daha büyük ve dayanımı daha yüksek olan sac metaller için kalıp açıklığı sac kalınlığının 10 katı olarak seçilmesini gerektirmektedir.

Bu büküm işlemi ile en az sayıda kalıp ile farklı büküm işlemleri mümkün olmaktadır. Fakat büküm sonrası sac metalin sertleşmesine ve geri esnemenin değişmesine neden olmaktadır (Bozkurt, 2018).

1.5. Açınım Boyu Hesabı

Büküm işlemi için, tasarlanan parçanın açınım boyunun bulunması gereklidir. Özellikle savunma sanayisindeki hassas işlerin sürdürülebilmesi için bu nokta çok önemlidir. SolidWorks, Inventor gibi tasarım yapılabilen programlar ile bükümlü parçanın açınımı alınabilmektedir.

Bükülen parçanın bükmeden önceki hali olan açınımının bulunması için bükülen kısım veya kısımların tarafsız eksen üzerinde tam boyu hesaplanabilmektedir. Bu hesabın yapılabilmesi için aşağıdaki şekilde belirtilen sac malzemesini, kalınlığını, bükmenin yarıçapı ve bükme açısını bilmemiz gereklidir.



Şekil 1.12: Açınım boyu bulmak için gerekli olan bilgiler görseli

Bükme için gerekli açının bulunmasında uygulanan yarıçap Tablo 1.2’ de görüldüğü gibi hesaplanabilir (Bozkurt,2018).

Tablo 1.2: Bükme ucu değerleri ile K değeri bağlantısı

Bükme Ucu Değerleri	K Değeri	Bükme Kavis Yarıçapı (mm)
Yarıçap, sac kalınlığı ile aynıysa	$K = 0,33 \times T$	$R1 = R + 0,33 \times T$
Yarıçap, sac kalınlığının 2 ile 4 katı arasıysa	$K = 0,42 \times T$	$R1 = R + 0,42 \times T$
Yarıçap, sac kalınlığının 4 katından fazlaysa	$K = 0,5 \times T$	$R1 = R + 0,5 \times T$

Bu formüllerde kullanılan elemanların açıklamaları ise şu şekildedir;

R = Büküm ucu yarıçapı, $R1$ = Tarafsız eksen büküm kavis yarıçapı ve T = Sac malzemesinin kalınlığı (mm), K = k-faktörü.

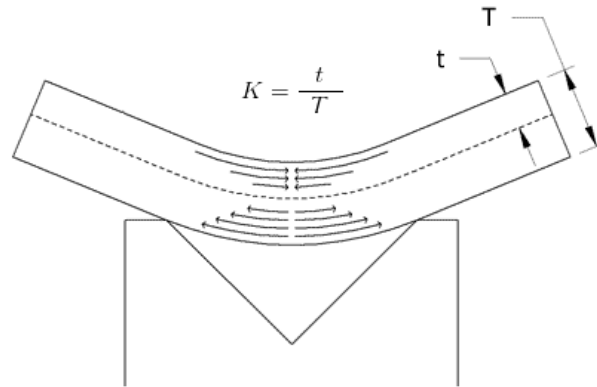
1.6. K-Faktörü

K-faktörü üretilmesi istenen parçanın bükümden sonra doğru ebatlara gelmesini sağlayan değer olarak açıklanabilir. Uygun büküm için gerekli olan; açınım sacın, alt ve üst kalıplar ile bükülmesi için doğru ebatlarda olmasıdır. Bu açınımı etkileyen ise büküm iznidir. Büküm iznini ise k-faktörü etkiler. K-faktörü sac levha parçasının kalınlığa göre nötr levhanın konumunu temsil eden bir orandır. Sac levha büküldükten sonra merkez çizgisinde kayma

meydana gelir ve nötr eksen oluşur. Nötr eksen bükme işleminden kaynaklanan çekme-basma deformasyonu etkisinin oluşmadığı kabul edilen sanal eksen olarak ifade edilebilir. Özetle k-faktörünün sayısal ifadesi bükme işlemi sonrası nötr eksen mesafesinin malzeme kalınlığına oranıdır (Bozkurt, 2018; Pekince, 2019).

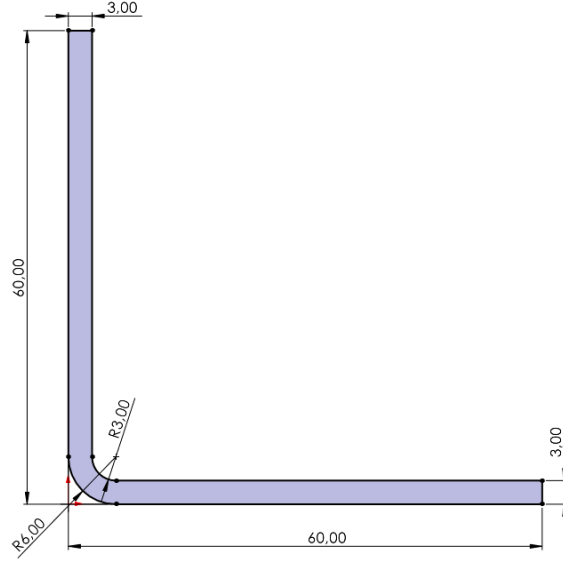
Sac metal bükümleri, k-faktörünün en fazla kullanıldığı üretim alanıdır. K-faktörünün kullanılan tüm malzemelerde ve tüm kalınlıklarda bilinmesi, tasarım biriminin hata toleransını en aza indirdiği bilinmektedir.

K-faktörü değeri için genellikle varsayımlar kullanılmaktadır. Bu varsayımlar kullanılan malzeme sertliğine veya büküm ucu yarıçapına göre değişmektedir. Matematiksel olarak olması gereken değeri ise 0 ile 0,5 değerleri arasındadır. Bu değişikliğin ana sebepleri arasında malzeme kalınlığının değişmesi ve sac malzemedeki nötr eksenin yeri gibi değerlerin farklı olmasından kaynaklanmaktadır. K-faktörü matematiksel olarak t / T şeklinde açıklanabilir (Çerçi, 2021).

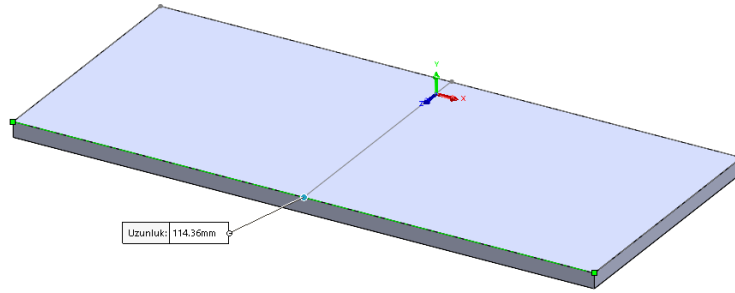


Şekil 1.13: k-faktörü oranının sac metal üzerinde gösterimi

K-faktörü için bir örnek vermemiz gerekirse genişliği farketmeksizin 60 mm yüksekliğinde, 60 mm uzunluğunda ve 3 mm kalınlıktaki bir parçayı SolidWorks programı kullanarak tasarlayalım. Büküm için kullandığımız k-faktörü olarak 0,35 değeri girilerek açınım oluşturulursa uzunluğu 114,36 mm olarak görülür. Eğer 0,5 değeri girilirse açınım boyunun 115,07 mm olduğu görülür. Sonuç olarak farklı k-faktörü değerleri ile farklı sac açınım değerlerinin oluştuğu görülmektedir. Ayrıca k-faktörü değeri arttıkça malzemenin açınım boyunun arttığı görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 1.14: 3 mm kalınlığında 60 mm yüksekliğinde ve 60 mm uzunluğunda SolidWorks programı kullanılarak oluşturulmuş bir parça tasarımı (a) ve k-faktörü 0,35 olarak girildiğinde parçanın açınım boyu uzunluğu (b)

K-faktörünün sac açınımda matematiksel olarak kullanılması ise aşağıdaki gibidir (Bozkurt, 2018).

$$BA = \frac{\pi \times \alpha (R + K \times T)}{180} \quad (1)$$

Burada kullanılan değerler şu şekilde açıklanmaktadır;

BA = büküm izni, π = pi değeri, α = büküm açısı, R = büküm yarıçapı (iç büküm yüzeyi), K = k-faktörü ve T = sac kalınlığı (mm).

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Son yıllarda yapılan araştırmalar bükmenin sac metal endüstrisinde önemli bir işlem olduğunu ve uygun bükümün nasıl yapılacağını incelemektedir. Araştırmalar doğru ve uygun bir büküm için sac açınım boyu hesabının bilinmesi gerektiğini vurgulamıştır. Sac metal bükümünde ancak k-faktörünün doğru bilinmesiyle ve uygulanmasıyla doğru sonuca ulaşıldığı görülmüştür.

Kovacevic vd. (2001) çalışmasında sonlu elemanlar yöntemiyle ANSYS programını kullanarak ve deneysel incelemeye dayalı lazerli sac bükme simülasyonu gerçekleştirmişlerdir. Simülasyon yardımıyla bükülme açısı, gerilim-gerinim dağılımı, artık gerilim ve sıcaklık parameter girişlerini sağlamışlardır. Lazer ışınlamı sırasında aşırı hızlı ısıtma ve soğutma prosesi ile bükülme etkisinin oluştuğunu bildirmişlerdir. Lazer ışınli taramanın sac levhayı başarılı bir şekilde bükebileceğini, sac levhanın mikro yapısına zararlı bir etkisinin olmadığını ve paslanmaz çelik bir sac levhada çatlak veya gözenek oluşturmadığını vurgulamışlardır.

Işıktaş (2011) çalışmasında V bükme kalıplarında DKP ve paslanmaz malzemelerinden 1, 1,5 ve 2 mm kalınlığındaki sac levhaları kullanarak bunların geri esneme değerlerini incelemiştir. Kalıp ve malzeme değişkenlerine göre geri esnemenin değiştiğini bildirmiştir. Malzeme kalınlığındaki artışın geri esnemeyi azalttığını tespit etmiştir. Bükme açısının artmasıyla geri esneme değerinin azaldığını belirtmiştir. Üst kalıp radyusunun büyümesiyle geri esnemenin arttığını belirtmiştir.

Dilipak vd. (2013) çalışmasında 4 mm kalınlığındaki S235JR çeliğini kullanarak 90° lik kalıplarda V bükümünü gerçekleştirmiştir. 5 farklı radyusa sahip zımba kullanılarak yapılan büküm işlemlerinde üst kalıbı sac levhanın üzerinde 30 saniye bekletilerek ve bekletmeden hemen bükcek şekilde uygulamışlardır. Numunelerini temperlenmiş, normalize edilmiş ve ısıl işlem görmemiş olmak üzere üç farklı şekilde hazırlamışlardır. Çalışma sonucu olarak üst kalıp yarıçapı arttıkça ileri esneme miktarının da azaldığını bildirmişlerdir.

Uslu (2014) çalışmasında 1 mm, 1,5 mm ve 2 mm kalınlığındaki DP800, DP600, DC01, DC04 ve DC05 sac malzemelerini 60°, 90° ve 120° kalıp açıları ile bükerek geri yaylanma

davranışlarını incelemiştir. Geri yaylanmanın, kalıp ve malzeme parametrelerine göre değiştiğini tespit etmiştir. Akma mukavemeti düşük sac malzemelerde geri yaylanmanın daha az oluştuğunu ve yüksek mukavemete sahip sac malzemelerde geri yaylanmanın daha fazla oluştuğunu belirtmiştir. Ayrıca malzeme kalınlığının artmasıyla geri yaylanmanın azaldığını tespit etmiştir.

Hekim (2016) çalışmasında V büküm kalıbında Al1050 H14 sac malzemesinin sıkıştırma kuvvetlerini ve hadde yönüne bağlı olacak şekilde geri yaylanma davranışını incelemiştir. Numune olarak 150x50 mm ebatlarında 3 mm sac kullanmışlardır. Sıkıştırma kuvveti arttıkça geri yaylanmanın azaldığını bildirmiştir. Geri yaylanmanın en az olduğu yön 45° hadde yönünde olduğunu ve geri yaylanmanın en fazla olduğu yön 90° hadde yönünde olduğunu belirtmiştir.

Aydemir (2017) çalışmasında Hardox 400 ve AISI 304L malzemelerinin mekanik özelliğine bağlı olacak şekilde bükme kuvvetleri miktarlarını incelemiştir. Bükme deneylerinden önce malzemelere çekme deneyi uygulayarak mekanik özelliklerini belirlemiştir. Bu değerleri firmaların teorik olarak verdiği değerler ile kıyaslamış ve söz konusu malzemelerin mekanik özelliklerinde tedarikçi firmaya göre farklılıklar oluştuğunu göstermiştir. Bu farklılıkların da sac malzemelerin büküm kuvvetlerini etkilediği belirtilmiştir. Herhangi bir tasarım yapılırken teorik değerlerin kullanılmaması ve deneysel sonuçlarla elde edilen değerlerin kullanılması gerektiği belirtilmiştir. Ayrıca bu çalışmada malzemelerin deney numunelerinde boyun artmasıyla bükme kuvvetindeki artış grafiğinin lineer ilerlemediği görülmüştür. Bunun da hataların ortaya çıkmasına neden olduğunu belirtmiştir. Hardox 400 numuneleri ile yaptığı büküm deneylerinde bükme boyuna bağlı olacak şekilde %5 daha fazla bükme kuvvetleri ile karşılaşırken, AISI 304L numuneleri ile yaptığı büküm deneylerinde %10 daha fazla bükme kuvvetlerinin okunduğunu belirtmiştir.

Bozkurt (2018) çalışmasında 1, 2, 3 ve 4 mm sac kalınlığı aralığındaki EN10130 DC01 çeliğin (1.0330 malzeme, soğuk haddelenmiş düşük karbonlu çelik) açınım boyu hesabının doğru yapılması için C++ yazılımı kullanarak program yazmıştır. Bu programa sac kalınlığının, büküm sayısının ve üst kalıbın radyusunun girilerek açınımın otomatik olarak hesaplandığını bildirmiştir. Ayrıca bükme kavis yarıçapının, sac malzemenin cinsine ve kalınlığa göre değiştiğini vurgulamıştır. Kullanılan üst kalıp ucu radyus değeri ile bükülecek parçanın iç bükümündeki radyusunun aynı değerde olması gerektiği belirtilmiştir. Alt

kalıpların malzeme kalınlaştıkça büyüdüğünü ama üst kalıbın 0,5 mm' den 15 mm' e kadar aynısının kullanıldığını, bu durumun çizilen ve tasarlanan üç boyutlu parka ile yapılan büküm arasında ölçüm farkına neden olduğunu ifade etmiştir.

Malyer & Kayral (2018) 1 mm kalınlığında AA6061 alüminyum alaşımının geri esneme özelliklerini araştırmışlardır. Numunelerinin bir bölümüne mikrodalga fırında, diğer bölümüne ise geleneksel fırında yaşlandırma işlemi uygulanmış ve sonrasında bükme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Isıtma oranının, malzemenin mekanik özelliklerine baskın etkisi olduğunu ve dolayısı ile mikrodalga fırında yaşlandırılarak bükülen numunelerde geri esnemenin daha az olduğunu belirtmişlerdir.

Şekerçi vd. (2018) çalışmalarında bükme işlemini yüzey alanında değişimin çok az ya da hiç olmadığı, doğrusal eksen etrafında gerçekleşen metalin plastik şekil değişimi olarak ifade etmişlerdir. Bükmenin düzgün bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için düzgün hizanın ve açıklığın olması gerektiğini vurgulamışlardır. Bükme işleminin en önemli faktörlerini; metali kırmadan verilebilecek en küçük bükme çapının belirlenmesi, metalin sertliğinin bilinmesi ve metalin kalınlığının belirlenmesi olarak belirtmişlerdir. Ayrıca bükülen malzemenin kesitinde oluşan değişimlerin genel olarak, malzemenin kalitesine, malzemenin kalınlığına, bükme açısına, bükme yarıçapına ve bükme kuvvetlerine bağlı olduğuna vurgu yapmışlardır.

Lu vd. (2018) çalışmalarında SMAT yönteminin paslanmaz çelik saclar üzerinde üç noktalı bükmede güçlendirici etkisini deneylerle incelemiş ve analiz etmişlerdir. Numunelerin bükülmesiyle desteklenen çalışmada oluklu şekil ve SMAT yöntemi birleşiminin bükülme sertliği, mukavemet ve sertleşme açısından önemli artış sağladığını belirtmişlerdir.

Pekince (2019) çalışmasında 3, 4, 5, 6 ve 8 mm kalınlıklarında St37-2, St52-3, DKP ve HRP sac malzemeleri, açınımları 100 mm olacak şekilde işlemiş ve oluşan bu sacları tam ortasından 90° olacak şekilde bükümüştür. Aynı kalınlığa sahip ve aynı alt kalıpla bükülen farklı malzemelerin k-faktörünün farklı olduğunu gözlemlediğini bildirmiştir. St37-2 sac malzemesinin farklı kalınlıklarında ve aynı alt kalıp ile bükülmesi sonucunda k-faktörünün değişiklik gösterdiğini belirtmiştir. Alt kalıpların değişken olmasının malzemenin radyus değerini değiştirdiğini ve k-faktörünü değiştirdiğini bildirmiştir. Ayrıca malzeme kalınlığı arttıkça k-faktörünün arttığını vurgulamıştır.

Basmacı & Sayın (2019) 1 ve 2 mm kalınlıktaki Bakır sac numunelerini V bükme kalıbı tasarlayarak 60°, 90° ve 120° açılarında 2 ve 4 mm bükme radyuslu kalıplarda bükmüşlerdir. Kalıp açısı ve levha kalınlığı arttıkça geri esneme miktarının azaldığını ve bükme radyusu arttıkça geri esnemenin arttığını gözlemlemişlerdir. Kalıp açısının artışı sonucu geri yaylanmanın azalmasının büküm işlemi sonrasında sac numunenin dış yüzeydeki şekil değişikliğine uğrayan bölgelerdeki uzama miktarı azalışından dolayı olduğuna vurgu yapmışlardır. Geri yaylanmanın azaltılmasının bükme radyusunun azaltılmasıyla elde edileceğini bildirmişlerdir.

Doğdu (2021) çalışmasında tüm mühendislik malzemelerinin k-faktörünün 0,27 - 0,5 arasında kabul gördüğünü bildirmiştir. K-faktörünü belirleyen unsurların en önemlisinin sac malzeme büküm iç yarıçap değeri olduğunu vurgulamıştır. Alüminyum sac malzemelerinde k-faktörünü belirlemek için yumuşak ve orta sert olarak değerlendirmek gerektiğini belirtmiştir. Ayrıca söz konusu çalışmada k-faktörü değerinin 0,5' ten büyük olamayacağını bunun sebebi olarak da plastic şekil değişimi için sac malzemeye büküm işlemi ile basma gerilmesine maruz bırakmak olduğu belirtilmiştir. Büküm işlemi sırasında asıl gerilmelerin sacın iç yüzeyinde oluşan basma gerilmeleri olduğu ifade edilmiştir. Sacın dış yüzeyinde oluşan gerilmelerin sacın iç kısmında oluşan basma gerilmelerinden büyük veya eşit olması gerektiğini bildirmiştir.

Çerçi (2021) çalışmasında bükme esnasında, sac malzemenin dış yüzeyinde çekme kuvveti etkisiyle uzama, iç kısımlarında ise basma kuvveti etkisiyle kısalma gerçekleştiğini belirtmiştir. K-faktörünü, büküm sabitini hesaplama yöntemi olarak malzeme kalınlığına olan mesafenin malzemenin kalınlığına oranı olarak açıklamıştır.

Al-Wahab & Baştürk (2021) çalışmasında 0,5, 0,7 ve 0,8 mm kalınlığındaki alüminyum numuneleri dikdörtgen, dairesel ve üçgen kalıplar kullanarak ve yağlayıcı da ekleyip bükerek geri esneme etkilerini incelemişlerdir. Sac kalınlığı artışının geri esnemeyi azalttığını bildirmişlerdir ve yağlayıcı türünün geri esnemeyi etkilemediğini vurgulamışlardır.

Küçükduvan (2022) çalışmasında sac levhaların birçok mekanik özelliğinin sacı şekillendirmede etkili olduğunu belirtmiştir. Sacın kalınlığının, akma gerilmesinin ve haddeleme yönünün bükme işlemini doğrudan etkilediğini açıklamıştır. Ayrıca bükülecek

sac malzemenin akma gerilmesinin büyük olmasının daha yüksek bükme kuvvetini gerektirdiğini bildirmiştir.

Literatür çalışmaları incelendiğinde, çalışmaların genelde bükümde geri esneme miktarlarının hesaplanması ve buna bağlı olarak gerekli bükme kuvvetleri, farklı alt ve üst kalıplar kullanılarak bulunan k-faktörlerinin karşılaştırması, C++ gibi yazılım programları kullanılarak k-faktörünü hesaplama üzerine yapıldığı görülmüştür. Numune olarak, S235JR, S355J2, DKP, HRP, AA6061 Alüminyum, EN10130 DC01, DC04, DC05, Hardox 400, Paslanmaz 304 L ve bakır gibi malzemelerin kullanıldığı görülmüştür. Bu çalışmada 0,8 mm' den 10 mm' e kadar St37 (S235JR) ve Alüminyum 5754 H111 sac malzemeleri, 0,8 mm' den 4 mm' e kadar AISI 304 kalite paslanmaz sac malzemeleri kullanılarak yapılan bükme işlemleri sonrasında doğru sonucu veren k-faktörlerinin hesaplanması yapılmıştır. Bu çalışma ile abkant pres kullanarak büküm işlemi yapan her firma kendi k-faktörlerini hassas bir şekilde hesaplayıp kullanabileceklerdir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışma başlangıcında önceden belirlenmiş k-faktörleri ile açınımları alınmış sac malzeme numuneleri 90° olacak şekilde bükülmüş ve büküm sonu boyları ölçülmüştür. Daha sonra bir öngörü k-faktörü belirlenerek bir numune daha alınmış ve yine 90° bükülerek büküm sonu boyları ölçülmüştür. Tüm bükümlerin sonrasında doğrusal interpolasyon hesaplaması ile yeni bir k-faktörü elde edilmiştir. Yapılan deneylerde doğrulama bükümleri de gerçekleştirilmiştir.

3.1. Materyal

Çalışma kapsamında bükme işlemleri için kullanılacak sac malzemeler, AISI 304 kalite paslanmaz için 0,8 mm, 1 mm, 1,5 mm, 2 mm, 2,5 mm, 3 mm ve 4 mm kalınlığında; St37 (S235JR) ve Alüminyum 5754 - H111 malzemeleri için ise 0,8 mm, 1 mm, 1,5 mm, 2 mm, 2,5 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm, 6 mm, 8 mm ve 10 mm kalınlığında tedarik edilmiştir.

3.1.1. Alüminyum 5754 - H111 Özellikleri

Yüksek kaynak kabiliyetine sahip olmasından dolayı özellikle kaynaklı birleşimlerde tercih edilirler. Yakıt tankı üretimi, gemi ve yat endüstrisi ile raylı taşıtlar gibi pek çok alanda yoğunlukla tercih edilirler. Alüminyum 5754 - H111 malzemesine ait kimyasal ve mekanik özellikler Tablo 3.1 ve Tablo 3.2’ de verilmiştir.

Tablo 3.1: Alüminyum5754-H111 alaşımının kimyasal özellikleri (Kocaman, 2021)

Elementler	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Diğer	Al
Kütlece %	0.27	0.36	0.08	0.29	2.8	0.05	0.13	0.04	0.03	Kalan

Tablo 3.2: Alüminyum5754-H111 alaşımının mekanik özellikleri (Kocaman, 2021)

Temper	Akma Mukavemeti (Mpa)	Çekme Mukavemeti (Mpa)	Uzama (%)	Sertlik (HV)
H111	126	216	25	86

3.1.2. St37 (S235JR) Özellikleri

St37 çeliklerinin DIN 17100 standardına göre yapılan çalışmalara göre çekme dayanım değeri 37 kg/mm² olarak belirlenmiştir. St ifadesi yapısında bulundurduğu karbon oranının % 0.2 olduğunu, 37 ifadesi ise malzemenin en az 37 kg/mm² çekme dayanımına sahip olduğu anlamına gelmektedir (Çaligülü vd, 2018).

Türkiye'de ve dünyada yer alan pek çok sayıdaki üretim alanlarında en çok tercih edilen malzemelerden birisi St37 çeliğidir. Tercih edilmelerinin başlıca nedenleri; kolay işlenebilir, kaynaklanabilir olması ve kesiminin sorunsuz olmasıdır. St37 çeliğinin kullanım alanları; otomotiv, beyaz eşya, kablo sektörü, kilit aksamaları olarak sıralanabilir (Akduman, 2021). St37 (S235JR) malzemesine ait kimyasal ve mekanik özellikler Tablo 3.3 ve Tablo 3.4' te verilmiştir.

Tablo 3.3: St37 çeliğinin kimyasal özellikleri (Kocaman, 2021)

Elementler	C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Ni	Cr
Kütlece (%)	0.09	0.013	0.428	0.02	0.0077	0.034	0.006	0.004	0.022

Tablo 3.4: St37 çeliğinin mekanik özellikleri (Kocaman, 2021)

Malzeme	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (HV)
St37 (S235JR)	297	377	44	167

3.1.3. AISI 304 Kalite Paslanmaz Çelik Özellikleri

Yüksek mukavemete sahip olan AISI 304 kalite paslanmaz çelik, yarı kararlı bir östenit alaşımıdır. Düşük sıcaklıklarda plastik deformasyon altında atom düzlemlerinin yer değiştirmesi ile martenit dönüşümüne karşı duyarlıdır. Bu durum sünekliğin ve yüksek mukavemetin çok iyi kombinasyonunu sağlamaktadır (Sun vd. 2012).

AISI 304 kalite paslanmaz çelikler iyi şekillendirilebilirlik ve mukavemete sahiptirler ayrıca iyi kaynaklanabilir ve iyi korozyon direnci gibi özellikleri sayesinde bir çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadırlar (Tekaslan vd, 2008).

Tablo 3.5: AISI 304 kalite paslanmaz alaşıminın kimyasal özellikleri (Şahin, 2013)

Elementler	Karbon (C)	Manganez (Mn)	Fosfor (P)	Kükürt (S)	Silisyum (Si)	Krom (Cr)	Nikel (Ni)
Kütlece (%)	0,08	2,0	0,045	0,030	1,0	18 – 20	8,0 – 10,5

Tablo 3.6: AISI 304 kalite paslanmaz alaşıminın mekanik özellikleri (Şahin, 2013)

Malzeme	Kopma Mukavemeti (MPa)	Akma Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (HB)
AISI 304	600	310	60	170

3.2. Yöntem

Solidworks programı kullanılarak üç farklı k-faktörü ile her kalınlık için üç farklı sac açınımı oluşturulmuştur. Bu k-faktörleri 0,275, 0,35 ve 0,425 değerleridir. Bu değerler k-faktörlerinin 0,200 ve 0,500 arasında olması beklendiği için 0,075 birim artırılarak seçilmiştir. Tedarik edilen sac numuneler 90° açısı yapacak şekilde bükülmüştür. Malzemeler, bükümden önce ve sonra detaylı olarak incelenmiştir. Oluşan bükümlere göre doğru bükümler için dördüncü bir açınım gerekliliği duyulmamış ve aynı k-faktörü değeri ile doğrulama bükümleri gerçekleştirilmiştir. Fakat tolerans dışı kalan bükümler için dördüncü bir öngörü k-faktörü belirlenmiştir. Belirlenen bu k-faktörlerine göre her kalınlık için bir adet daha malzeme tedarik edilerek yine 90° açısı yapacak şekilde bükülmüşlerdir. Tüm sonuçlar göz önüne alındıktan sonra doğrusal interpolasyon hesaplaması ile yeni bir k-faktörüne ulaşılmış ve bükme işlemi tekrarlanarak doğrulama bükümleri gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada, St37 (S235JR), Alüminyum 5754 H111 ve AISI 304 kalite paslanmaz sac malzemelerinin belirtilen her bir kalınlık için en uygun k-faktörünün belirlenmesi amaçlanmıştır. Büküm sonrası yükseklik ve genişlik değerleri 50x50 veya 75x50 mm olması istenmiştir. Tüm bükümler için ortaya çıkan sonuçlar ise tablo halinde oluşturulmuştur.

Çalışma, Solidworks programı ile bükme kalıplarının katı modeli oluşturulmasıyla devam etmiştir. Simülasyon programı desteği ile oluşturulan kalıp modeli için büküm işleminde oluşan sürtünme kaynaklı aşınma simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Belirli büküm adetleri sonrasında alt kalıptaki sürtünme kaynaklı deformasyon ölçülmüş ve tablo oluşturulmuştur. Ölçülen veriler birbiri ile kıyaslanmıştır.

Her malzemeden başlangıçta üç adet numune tedarik edilmiştir. 0,8 mm’ den 4 mm’ e kadar olan malzemeler için 50x50 L büküm şeklinde açınım alınmıştır. 5 mm’ den 10 mm’ e kadar olan malzemeler için 75x50 L büküm şeklinde açınım alınmıştır. Açınımlar 0,275-0,35 ve 0,425 k-faktörleri kullanılarak belirlenmiştir. Tablo 3.7’ de sırasıyla verilmiştir.

Tablo 3.7: Solidworks kullanılarak alınmış farklı k-faktörlerine göre oluşan açınım boyları

Malzeme Kalınlığı (mm)	Açınım Boyu (mm)		
	K: 0,275	K: 0,35	K: 0,425
0,8	98,4	98,5	98,59
1	98	98,12	98,24
1,5	97	97,18	97,36
2	96,01	96,24	96,48
2,5	95,01	95,3	95,6
3	94,01	94,36	94,72
4	92,01	92,48	92,95
5	115,01	115,6	116,19
6	113,02	113,72	114,43
8	109,02	109,96	110,91
10	105,03	106,21	107,38

3.2.1. Kullanılan Abkant Büküm Makinesi

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen büküm işlemlerinde hidrolik abkant pres kullanılmıştır. Makinenin özellikleri üretici firma tarafından şu şekilde verilmiştir. Baykal ürünü APHS 31200 modelidir. Genişlik ölçüsü 3800 mm, derinlik ölçüsü 1850 mm, yükseklik ölçüsü 2800 mm dir. Makine ağırlığı 10000 kg dır. Baskı gücü 200 kN dur. Büküm uzunluğu 3100 mm ve dört eksenlidir. Bükülen maksimum malzeme kalınlığı 10 mm dir. Dayama mesafesi olarak X eksen 1000 mm, R eksen 160 mm dir. Maksimum hareket hızı X ekseninde 350 mm/s, R ekseninde 240 mm/s ve Z ekseninde 1000 mm/s dir. Pozisyon hassasiyeti X ekseninde $\pm 0,03$ mm, R ekseninde $\pm 0,05$ mm ve Z ekseninde $\pm 0,05$ mm dir.



Şekil 3.1: Bükümlerin gerçekleştirildiği hidrolik abkant pres

3.2.2. Kullanılan Kalıplar

Büküm işlemi bir alt kalıp ve bir üst kalıp arasına yerleştirilen sac malzemenin, üst kalıbın basıncı ve alt kalıbın formu yardımı ile şekil değiştirmesi esasına dayanır. Kullanılacak kalıbın bükümden önce belirlenmesi önemlidir.

3.2.2.1. Kullanılan Alt Kalıplar

Kullanılan alt kalıp malzemenin özelliğine ve kalınlığına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Alt kalıplar CK45 malzemedan üretilmiştir ve sertlik değeri 51/54 HRC dir.

Tablo 3.8: St37 (S235JR) numuneleri bükümünde kullanılan alt kalıplar

St 37 sac kalınlığı (mm)	St37 Bükümünde Kullanılan Alt Kalıp
0,8	V10
1	V10
1,5	V12
2	V12
2,5	V12
3	V20
4	V20
5	V20
6	X35
8	X50
10	X50

Tablo 3.9: Alüminyum 5754 – H 111 numuneleri bükümünde kullanılan alt kalıplar

Alüminyum 5754-H111 sac kalınlığı (mm)	Alüminyum 5754 Bükümünde Kullanılan Alt Kalıp
0,8	V10
1	V10
1,5	V10
2	V12
2,5	V12
3	V20
4	V20
5	V20
6	X35
8	X35
10	X50

Tablo 3.10: AISI 304 kalite paslanmaz numuneleri bükümünde kullanılan alt kalıplar

AISI 304 sac kalınlığı (mm)	AISI 304 Bükümünde Kullanılan Alt Kalıp
0,8	V10
1	V10
1,5	V12
2	V12
2,5	V12
3	V20
4	V20

3.2.2.2. Kullanılan Üst Kalıp

Büküm çalışmalarının tümü 3,3 mm uç radyuslu üst kalıpla gerçekleştirilmiştir. Kullanılan üst kalıo CK45 malzemeden üretilmiştir ve sertlik değeri 51/54 HRC dir. Tablo 3.11’ de CK45 çeliğinin kimyasal kompozisyonu verilmiştir.

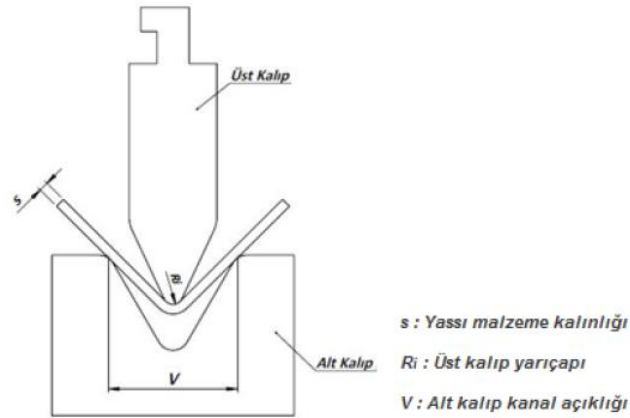
Tablo 3.11: CK45 çeliğinin kimyasal kompozisyonu (% ağırlık) (Akıncıoğlu vd., 2021)

Demir (Fe)	Karbon (C)	Silisyum (Si)	Manganez (Mn)	Krom (Cr)	Nikel (Ni)	Fosfor (P)	Kükürt (S)
Diğer	0,47	0,29	0,71	0,18	0,03	0,02	0,04

3.3. Sac Metal Büküm Deneyleri

Bükme deneylerinde kullanılan numune kalınlıkları ve boyları otomotiv ve savunma sanayinde sıklıkla kullanılan malzemeler esas alınarak belirlenmiştir. Malzeme genişliğinin

k-faktörünün değişimi üzerine etkisi bu tez kapsamında incelenmeyecektir. Deney numuneleri Tablo 3.7’ de verilen değerlere göre Alüminyum 5754 – H111 serisi ve St37 (S235JR) malzemelerinde her kalınlıkta seçilmiş üç k-faktörüne uygun; AISI 304 paslanmaz malzemede ise 4 mm kalınlığa kadar seçilmiş üç adet k-faktörüne uygun şekilde tedarik edilmiştir. Üç farklı k-faktöründen birinde tolerans değerlerine uygun bir büküm oluşmuşsa dördüncü olarak doğrulayıcı bir büküm daha yapılmıştır. Eğer üç farklı değerde de uygun bir oluşmamışsa, büküm sonucu değerlerine göre tablodan tahminde bulunarak yeni bir k-faktörü değeri ile açınım alınmıştır. Bu açınıma göre numune tedarik edilmiştir. Buna ek olarak ortaya çıkan tüm sonuçların üzerine doğrusal interpolasyon hesaplaması uygulanmış ve doğru k-faktörünün bulunması hedeflenmiştir. Tahmin edilerek ortaya çıkan k-faktörü değerleri ile doğrusal interpolasyon hesaplamaları sonucu ortaya çıkan k değerleri kıyaslanmıştır. Deneyler V bükme kalıbında ve kuru ortamda yapılmıştır. Doğrulayıcı bükümlerle sonuçlar desteklenmiştir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2: Hidrolik abkant preste alt ve üst kalıpla bükme işlemi (Aydemir, 2017)

Çalışma kapsamında yapılan bükümlerde büküm uzunluğu, büküm açısı, büküm hızı, farklı bir satıcıdan tedarik, sıcaklık gibi pek çok parametrenin etkisi de bulunmaktadır. Ortaya çıkan yüksek maliyet ve uzun deney süreleri göz önüne alındığında çalışma, üç farklı malzemenin farklı kalınlıklarda havada kuru bükümü olarak sadeleştirilmiştir.

Bükümde doğru ürüne ulaşılması için kullanılması gereken üst ve alt kalıpların önceden belirlenmesi gerekmektedir. Farklı radyuslu üst kalıplarla yapılan bükümlerde büküm boyu uzama ve kısaltmalarının görüleceği bilinmelidir. Malzeme tedarikinin aynı firmadan olmasına dikkat edilmelidir. Farklı üretici firma ürünlerinin mekanik özelliklerinin farklı

olduğu bilinmektedir. Mekanik özelliklerinin değişmesi uzamayı etkiler. Uzamanın değişmesi doğrudan k-faktörünü etkileyeceği için sac malzemenin açınımı etkilenmiş olur. Bu durum doğru ürünün oluşmasını engellemektedir. Bükümlerin hadde yönüne dik konumda yapılması da doğru ürün için dikkat edilmesi gereken durumlardan bir tanesidir. Bu yüzden lazer kesimlerin mümkünse hadde yönüne dik şekilde oluşmaları sağlanmalıdır. Sadece karşılıklı iki yönünden bükülecek sac malzemeler için bu durum mümkünken üç veya dört yönünde de büküm bulunan sac malzemelerde mümkün olmayacaktır. Tasarım yapılırken büküm yönüne göre hareket edilmeli gerekirse iki ya da üç parça şeklinde lazer kesim planı oluşturulmalıdır. Hadde yönüne paralel olacak şekilde kesilen sac metallerin bükümlerinde kopma ve çatlakların daha sık oluştuğu bilinmektedir. Ayrıca doğru ürüne ulaşmak için sac malzemelere uygun tonajda baskı gücü ile büküm yapılması gerekmektedir. Az tonajda istenen açı oluşmayabilirken fazla yüklemede sac malzemede ve kalıplarda hasarlar meydana gelebilmektedir. Fazla tonajda çalışan sağlığının da tehlikeye girdiği bilinmelidir. Yapılan tüm bükümlerin aynı şartlarda yapılması gerekmektedir. Kuru büküm ile yağlı büküm arasında bile k-faktörü değişikliği olabileceği bilinmektedir.

3.4. Doğrusal İnterpolasyonun Uygulanışı

Doğrusal (Lineer) interpolasyon, lineer polinomların kullanılması sayesinde, elde edilen verilerin bilinen noktalardan yeni veri üretilmesine yarayan bir eğri uydurma metodudur. Bilinen iki nokta arasındaki lineer interpolasyon denklemi şu şekilde uygulanabilmektedir;

$$\frac{\text{ilk değişken} - \text{son değişken}}{\text{ara değişken} - \text{son değişken}} = \frac{\text{ilk değer} - \text{son değer}}{\text{ara değer} - \text{son değer}}$$

Burada ilk değişken ve son değişken hangi k-faktörleri arasında ise o değerleri alır. İlk değer ve son değer ise bu iki k-faktörüne göre bükülen sacın büküm sonrası boyunun değerleridir. Ara değer birimi sonuca ulaşmak istediğimiz büküm boyu uzunluğu olan 50 mm değeridir. Ara değişken ise istediğimiz k-faktörüdür.

3.5. Sonlu Elemanlar Analizi ile Kalıp Aşınma Simülasyonu

Bükme işlemi, üst kalıbın kuvvet uygulayarak alt kalıbın da sabitliği sayesinde sac metale şekil verme isteğidir. Bu esnada üst ve alt kalıplarda ve bükülmesi istenen sac metalde

sürtünme kuvvetinden kaynaklanan aşınmalar meydana gelmektedir. Bükülen sac metalde oluşan deformasyon tek sefere mahsus olduğundan ve bir bükümde sürtünme kaynaklı deformasyon çok az olduğundan dolayı, büküm ölçüleri tolerans içinde olduğu sürece göz ardı edilebilmektedir. Fakat sürekli kullanılan alt ve üst kalıplarda aşınma kullanımla doğru orantılı olacak şekilde sürekli olarak artarak devam etmektedir. Zamanla kalıbın formu bozulacağı için bu durumun istenilen ölçüdeki bükümü doğrudan etkilediği bilinmektedir. Bükümlerin hassas şekilde devam etmesi için kalıplardaki aşınmaların dikkate alınması gerekmektedir.

Kalıplardaki deformasyon miktarlarının veya büküm adetlerinin kalıplarda ne kadar aşınma oluşturacağını bilmesi işletmeler için önem arz etmektedir. Bu sayede kalıp bakım ve onarım sürelerini de önceden kestirip, olası malzeme ve süre kayıplarının önüne geçilmesi istenmektedir.

ANSYS programı kullanılarak sonlu elemanlar analizi ile kalıp aşınma simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Analizde alt kalıpta oluşan deformasyon incelenmiştir, üst kalıp deformasyonunun olmadığı kabul edilmiştir.

Alt kalıp malzemesi CK45 olarak analiz girdilerine eklenmiş ve V20 kalıbı birebir modellenerek 50 mm uzunluğunda kesit alınmıştır. V20 alt kalıbı tercih edilmesinin nedeni ise seçilen üç farklı malzemenin 3 mm kalınlıktaki sac metallerinin aynı alt kalıpta bükülebilir olmasıdır. Bu sayede bükülen sac metallerin alt kalıpta bıraktığı aşınmanın birbirleriyle karşılaştırılması hedeflenmiştir.

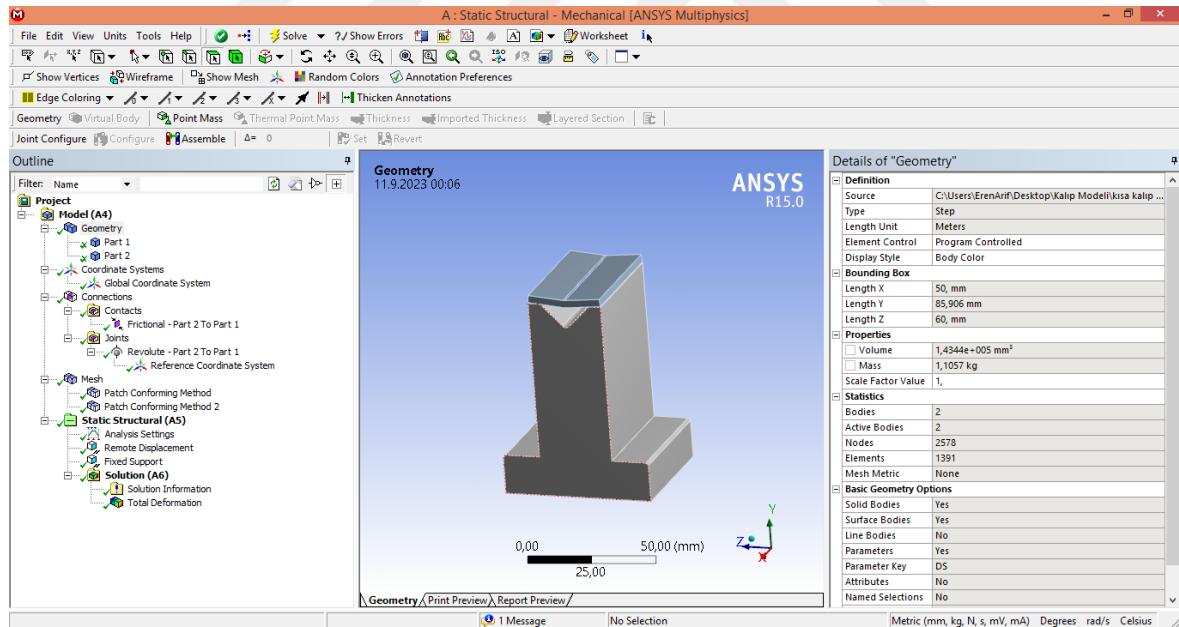
Analizde alt kalıp CK45 malzemesi olacak şekilde Alüminyum 5754 - H111, AISI 304 paslanmaz çeliği ve St37 (S235JR) malzemelerinin 30 mm en, 50 mm uzunluk ve 3 mm kalınlıkta bükümleri gerçekleştirilmiştir. Bükülmesi istenen sac metaller kalıp üzerinde yatay pozisyondayken üst kalıp tarafından kuvvet uygulanmış ve 90° açı yapacak şekilde bükümleri sağlanmıştır.

Program dâhilinde kalıpların sac metalle en uygun ilişkileri, yapıları ve hareket kabiliyetleri belirlenmiştir. Metal - metal arası girilebilir değer olan 0,6 sürtünme katsayısı girdilere eklenmiştir. Tüm parçalar ayrı şekilde mesh' lenmiş ve uygulanan mesh' ler olabildiğince

sık, ince ve düzenli yapıda olacak şekilde ayarlanmıştır. Bu sayede analizin gerçeğe daha yakın bir sonuç vermesi amaçlanmıştır.

İlk olarak analizlerini yapmak istediğimiz parçalara malzemeleri atanmıştır. Alt kalıbın aşınmasının bulunmak istendiği ve sac metalin bükülmesi istendiğinden malzemelerin esnek yapıda girdileri sağlanmıştır. Kontak yüzey olarak sacın alt yüzeyi ile alt kalıbın tüm üst yüzeyi sürtünmeli olarak ilişkilendirilmiştir. Eklemler olarak alt kalıbın radyus bölümleri ile sacın alt yüzeyinin teması sağlanmıştır. Buradaki temas, hareket sınırlayıcı olarak da kullanılmıştır. Tüm bunların yer aldığı ürün ağacı görseli Şekil 3.3 'te gösterilmiştir.

Bükülmesi istenen sac metal 90° açı yapana kadar, yer değiştirme yöntemiyle sacın ortasına -Y yönünde kuvvet uygulanmıştır. Büküm işleminin yapılabilmesi için alt kalıp alt yüzeyinden sabitlenmiş ve uygulanan kuvvete karşı hareketi engellenmiştir. Son olarak yapı analizi başlığının altına çözümlemek istediğimiz total deformasyon isteği girdilere eklenmiştir ve analizin oluşturulması sağlanmıştır.



Şekil 3.3: ANSYS programı kullanılarak oluşturulan bükme analizinde girilen koşullar

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Yapılan tüm bükümlerin sonuçları ve ortaya çıkan k-faktörleri tablolar halinde gösterilmiştir. Doğrusal interpolasyon hesaplamalarının nasıl yapıldığı anlatılmıştır. Tüm malzemeler ve kalınlıklar için yapılan denklemler eklenmemiş fakat işlem sonuçları tablo içerisinde gösterilmiştir.

4.1. St37 (S235JR) Çeliği Bükümleri ve Sonuçları

St37 (S235JR) çeliği ile yapılan bükümlerin sonuçları tablolar halinde gösterilmiş ve Şekil 4.1' de k-faktörü karşılaştırması yapılmıştır.

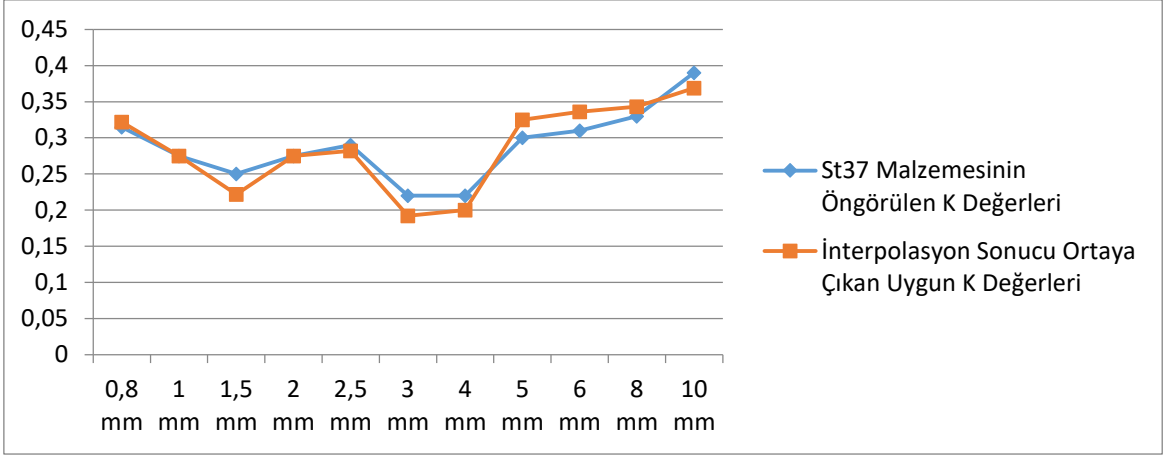
Tablo 4.1: Farklı k-faktörleri kullanılarak bükülen St37 (S235JR) çeliğinin büküm sonu ölçüm sonuçları

St37 (S235JR) sac kalınlığı (mm)	Ölçüm boyu (mm)			
	K: 0,275	K: 0,35	K: 0,425	Öngörülen K değeriyle ölçümü
0,8	49,93	50,04	50,09	0,315 = 49,99
1	50,00	50,07	50,12	0,275 = 50,00
1,5	50,12	50,29	50,35	0,250 = 50,03
2	50,00	50,15	50,24	0,275 = 50,00
2,5	49,98	50,20	50,32	0,290 = 50,02
3	50,30	50,57	50,69	0,220 = 50,03
4	50,33	50,46	51,40	0,220 = 50,02
5	49,65	50,17	50,48	0,300 = 49,89
6	49,78	50,05	50,19	0,310 = 49,91
8	49,55	50,05	50,35	0,330 = 49,95
10	49,03	49,84	50,45	0,390 = 50,09

Tablo 4.2: St37 (S235JR) çeliğinin doğrusal interpolasyon hesaplaması sonucu ortaya çıkan K değerleri tablosu

St37 (S235JR) sac kalınlığı (mm)	Doğrusal interpolasyon sonucu bulunan K değeri
0,8	0,322
1	0,275
1,5	0,222
2	0,275
2,5	0,282
3	0,192
4	0,200
5	0,325
6	0,336

8	0,343
10	0,369



Şekil 4.1: St37 (S235JR) çeliğinin öngörülen K değeri ve doğrusal interpolasyon hesaplanması sonucu ortaya çıkan uygun K değeri karşılaştırması

Tablo 4.1’ de 1 mm ve 2 mm St37 sacının bükümlerinde 0,275 k-faktöründe istenen sonuç elde edilmiştir ve büküm uzunluğu 50,00 mm olarak ölçülmüştür. Üçer açınım daha alınarak doğrulama bükümü yapılmıştır. Tüm numuneler $50,00 \pm 0,02$ mm aralığında ölçülmüşlerdir.

0,8 mm, 2,5 mm, 5 mm, 6 mm, 8 mm St37 sacının bükümlerinde doğru bükümün 0,275 ve 0,35 k-faktörü değerleri arasında olduğu ve 0,425 değerine uzak olduğu gözlemlenmiştir. Uygun büküme ulaşmak için yeni k-faktörleri öngörülmüş ve birer açınım tedarik edilerek tekrar bükülmüştür. Elde edilen sonuçlar ile doğrusal interpolasyon hesaplaması kullanılarak yeni k-faktörleri elde edilmiş ve bu değerler ile doğrulama bükümü için üçer açınım daha tedarik edilmiştir. Tüm numuneler $50,00 \pm 0,02$ mm aralığında ölçülmüşlerdir.

1,5 mm, 3 mm ve 4 mm St37 sacının bükümlerinde k-faktörlerinin 0,275 ve 0,425 arasında olmadığı gözlemlenmiştir. Bu değerler 0,275 altında kaldığından dolayı bu sac açınımları için öngörü k-faktörleri 0,275 altında değerlerden alınan açınımlar tedarik edilerek tekrar bükülmüştür. Elde edilen sonuçlar ile doğrusal interpolasyon hesaplaması kullanılarak yeni k-faktörleri elde edilmiş ve bu değerler ile doğrulama bükümü için üçer açınım daha tedarik edilmiştir. Tüm numuneler $50,00 \pm 0,02$ mm aralığında ölçülmüşlerdir.

10 mm St37 sacının bükümünde doğru bükümün 0,35 ve 0,425 k-faktörü arasında olduğu ve 0,275 değerinin doğru bükümden çok uzak olduğu gözlemlenmiştir. Uygun büküme ulaşmak

için dördüncü bir k-faktörü olarak 0,390 öngörülmüş ve açınım tedarik edilerek tekrar bükülmüştür. Sonuç olarak istenen 50,00 mm değeri 50,09 mm olarak ölçülmüştür. Tablo 4.2’ de interpolasyon hesaplamaları sonucu k-faktörü 0,369 bulunmuştur. Doğrulama için üç adet açınım daha tedarik edilip bükülmüştür. Numuneler $50,00 \pm 0,03$ mm aralığında ölçülmüşlerdir.

Pekince (2019) yaptığı çalışmada St37 bükümleri yaparak bunların k-faktörlerini belirlemiştir. 2 mm için k-faktörünü 0,6 mm; 3 mm için k-faktörünü 0,53; 4 mm için k-faktörünü 0,28; 5 mm için k-faktörünü 0,31 ve 6 mm için k-faktörünü 0,41 bulduğunu bildirmiştir. Bulduğu k-faktörlerini şekil 4.2 ile karşılaştırdığımızda sonuçların çok azının sadece yakın olduğu, çoğunun birbirinden tamamen farklı olduğu görünmektedir. Bu durumun başlıca nedeni kullanılan farklı alt kalıplardır. Pekince (2019) çalışmasında 2 mm için V16; 3 mm için V26; 4 mm için V35 alt kalıbını kullanırken bu çalışmada 2 mm için V12; 3 mm için V20; 4 mm için V20 alt kalıbı kullanılmıştır. Dolayısıyla aynı kalınlıklardaki k-faktörü tablosu iki çalışmada farklı alt kalıplar kullanılarak oluşturulmuştur. K-faktörü değerlerinin birbirine yakın olmaması bu nedenle açıklanabilir.

Şekil 4.1 incelendiğinde 3 mm ve 4 mm St37 sacının k-faktörlerinde nispeten diğerlerine göre daha düşük değerde olduğu görülmüştür. Bu durumun kullanılan alt kalıbın bu kalınlıklarda V20 değerine çıkarılmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Alt kalıbın değişmesinin bulunan k-faktörünü etkilediği bilinmektedir (Pekince, 2019).

4.2. AISI 304 Kalite Paslanmaz Çeliği Bükümleri ve Sonuçları

AISI 304 kalite paslanmaz çeliği ile yapılan bükümlerin sonuçları tablolar halinde gösterilmiş ve Şekil 4.2’ de k-faktörü karşılaştırması yapılmıştır.

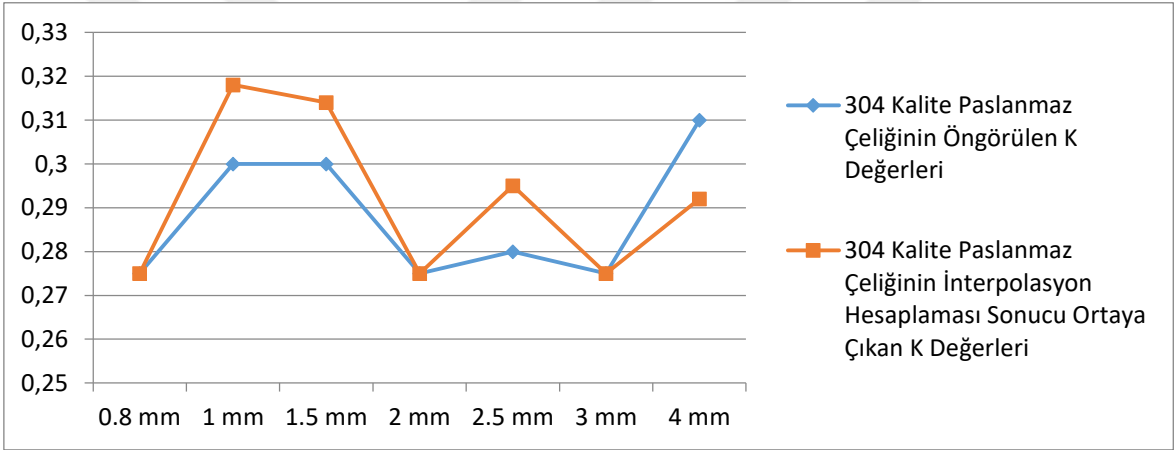
Tablo 4.3: Farklı k-faktörleri kullanılarak bükülen AISI 304 kalite paslanmaz çeliğinin büküm sonu ölçüm sonuçları

AISI 304 sac kalınlığı (mm)	Ölçüm boyu (mm)			
	K: 0,275	K: 0,350	K: 0,425	Öngörülen K değeriyle ölçümü
0,8	50,00	50,11	50,19	0,275 = 50,00
1	49,96	50,03	50,10	0,300 = 49,97
1,5	49,89	50,10	50,18	0,300 = 49,95
2	50,00	50,24	50,43	0,275 = 50,00

2,5	49,97	50,08	50,25	0,280 = 49,98
3	50,00	50,15	50,32	0,275 = 50,00
4	49,97	50,10	50,24	0,310 = 50,05

Tablo 4.4: AISI 304 kalite paslanmaz çeliğinin doğrusal interpolasyon hesaplaması sonucu ortaya çıkan K değerleri tablosu

AISI 304 sac kalınlığı (mm)	Doğrusal interpolasyon sonucu bulunan K değeri
0,8	0,275
1	0,318
1,5	0,314
2	0,275
2,5	0,295
3	0,275
4	0,292



Şekil 4.2: AISI 304 kalite paslanmaz çeliğinin öngörülen K değeri ve doğrusal interpolasyon hesaplaması sonucu ortaya çıkan uygun K değeri karşılaştırması

Tablo 4.3' te 0,8 mm, 2 mm ve 3mm AISI 304 kalite paslanmaz sacının bükümlerinde 0,275 k-faktöründe istenen sonuç elde edilmiştir ve büküm uzunluğu 50,00 mm olarak ölçülmüştür. Üçer açınım daha alınarak doğrulama bükümü yapılmıştır. Tüm numuneler $50,00 \pm 0,02$ mm aralığında ölçülmüşlerdir.

1 mm, 1,5 mm, 2,5 mm ve 4 mm AISI 304 kalite paslanmaz sacının bükümlerinde doğru bükümün 0,275 ve 0,35 k-faktörü değerleri arasında olduğu ve 0,425 değerinde uzak olduğu gözlemlenmiştir. Uygun büküme ulaşmak için yeni k-faktör değerleri öngörülmüş ve birer açınım tedarik edilerek tekrar bükülmüştür. Elde edilen sonuçlar ile doğrusal interpolasyon hesaplaması kullanılarak yeni k-faktörleri elde edilmiş ve bu değerler ile doğrulama bükümü

için üçer açınım daha tedarik edilmiştir. Tüm numuneler $50,00 \pm 0,02$ mm aralığında ölçülmüşlerdir.

4.3. Alüminyum 5754-H111 Bükümleri ve Sonuçları

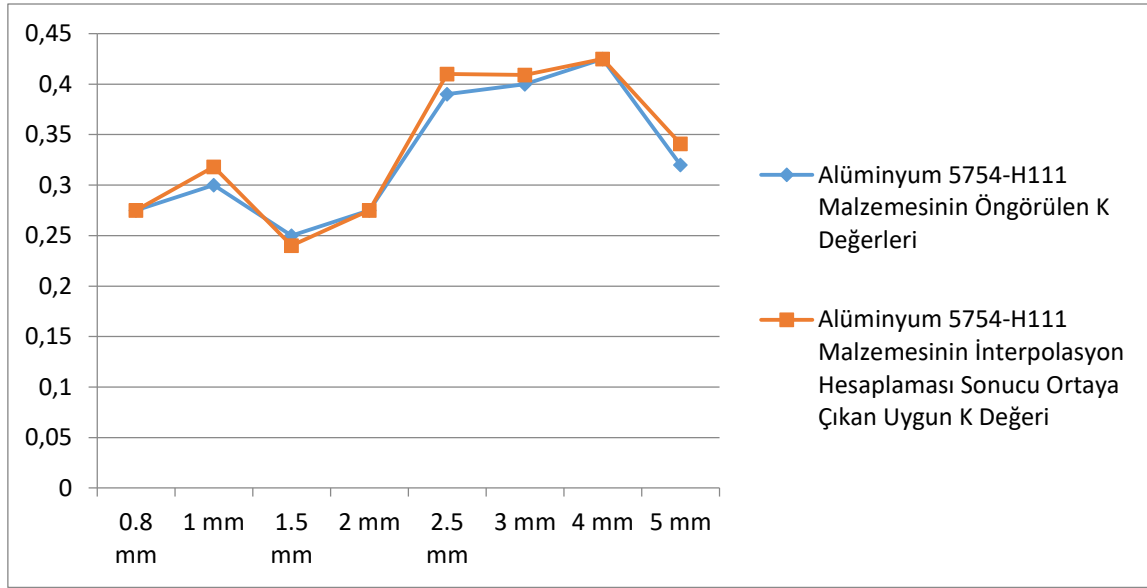
Alüminyum 5754 – H111 ile yapılan bükümlerin sonuçları tablolar halinde gösterilmiş ve Şekil 4.3’ te k-faktörü karşılaştırması yapılmıştır.

Tablo 4.5: Farklı k-faktörleri kullanılarak bükülen Alüminyum 5754 – H111 alaşımının büküm sonu ölçüm sonuçları

AA5754 - H111 sac kalınlığı (mm)	Ölçüm boyu (mm)			
	K: 0,275	K: 0,35	K: 0,425	Öngörülen K değeriyle ölçümü
0,8	50,00	50,07	50,12	0,275 = 50,00
1	49,93	50,05	50,08	0,300 = 49,98
1,5	50,04	50,11	50,29	0,250 = 50,01
2	50,00	50,12	50,28	0,275 = 50,00
2,5	49,33	49,80	50,05	0,390 = 49,94
3	49,38	49,70	50,08	0,400 = 49,96
4	49,18	49,57	50,00	0,425 = 50,00
5	49,54	50,06	50,79	0,320 = 49,90
6	48,82 - Yırtık	49,65 - Yırtık	40,90 - Yırtık	Uygulanmadı
8	Koptu	Koptu	Koptu	Uygulanmadı
10	Koptu	Koptu	Koptu	Uygulanmadı

Tablo 4.6: Alüminyum 5754 - H111 alaşımının doğrusal interpolasyon hesaplaması sonucu ortaya çıkan K değerleri tablosu

AA5754 - H111 sac kalınlığı (mm)	Doğrusal interpolasyon sonucu bulunan K değeri
0,8	0,275
1	0,318
1,5	0,240
2	0,275
2,5	0,410
3	0,409
4	0,425
5	0,341



Şekil 4.3: Alüminyum 5754-H111 malzemesinin öngörülen K değeri ve interpolasyon hesaplaması sonucu ortaya çıkan uygun K değeri karşılaştırması

Tablo 4.5’ te 0,8 mm, 2 mm Alüminyum5754 - H111 sacının bükümlerinde 0,275 k-faktöründe ve 4 mm Alüminyum5754 – H111 sacının bükümlerinde 0,425 k-faktöründe istenen sonuç elde edilmiş ve büküm uzunluğu 50,00 mm olarak ölçülmüştür. Üçer açınım daha alınarak doğrulama bükümleri gerçekleştirilmiştir. Tüm numuneler $50,00 \pm 0,02$ mm aralığında ölçülmüşlerdir.

1 mm ve 5 mm Alüminyum5754 – H111 sacının bükümlerinde doğru bükümün 0,275 ve 0,35 k-faktörü değerleri arasında olduğu ve 0,425 değerine uzak olduğu gözlemlenmiştir. Uygun büküme ulaşmak için yeni k-faktörleri öngörülmüş ve açınım tedarik edilerek tekrar bükülmüştür. Elde edilen sonuçlar ile doğrusal interpolasyon hesaplaması kullanılarak yeni k-faktörleri elde edilmiş ve bu değerler ile doğrulama bükümü için üçer açınım daha tedarik edilmiştir. Tüm numuneler $50,00 \pm 0,02$ mm aralığında ölçülmüşlerdir.

2,5 mm ve 3 mm Alüminyum5754 – H111 sacının bükümlerinde doğru bükümün 0,35 ve 0,425 k-faktörü değeri arasına olduğu gözlemlenmiştir. Uygun bükümler için yeni k-faktörü değerleri öngörülmüş ve açınım tedarik edilerek tekrar bükülmüştür. Elde edilen sonuçlar ile doğrusal interpolasyon hesaplaması kullanılarak yeni k-faktörü değerleri elde edilmiş ve bu değerler ile doğrulama bükümü için üçer açınım daha tedarik edilmiştir. Tüm numuneler $50,00 \pm 0,02$ mm aralığında ölçülmüşlerdir.

1,5 mm alüminyum 5754 sacının bükümlerinde üç farklı k-faktörünün de aralığında olmadığı ve 0,275 değerinden daha az olması gerektiği gözlemlenmiştir. Uygun büküme ulaşmak için dördüncü bir k-faktörü olarak 0,250 değeri öngörülmüş ve açınım tedarik edilerek bir büküm daha yapılmıştır. Sonuç olarak istenen 50,00 mm değeri 50,01 mm olarak ölçülmüştür. Elde edilen tüm sonuçlar üzerine doğrusal interpolasyon hesaplaması kullanılarak yeni k-faktörü elde edilmiş ve doğrulama bükümü için üçer açınım daha tedarik edilmiştir. Tüm numuneler $50,00 \pm 0,02$ mm aralığında ölçülmüşlerdir.

6 mm ve 8 mm Alüminyum 5754-H111 sacının bükümünde ve 10 mm Alüminyum 5754-H111 sacının bükümünde uygun sonuçlar alınamamıştır. 6 mm Alüminyum 5754-H111 sacının bükümlerinde büküm sonrası dış büküm bölgesinde çatlaklar tespit edilmiş ve kullanıma uygun olmadığı görülmüştür. 8 mm ve 10 mm Alüminyum 5754-H111 saclarının bükümlerinin tüm numunelerinde kopma meydana geldiği ve kullanım dışında oldukları gözlenmiştir. Tüm numuneler uygun olmadığından dolayı dördüncü bir büküm için öngörü açınım yapılmamıştır.

Metaller, atomların belirli bir nizamda bir araya gelerek oluşturdukları kristal kafeslerden oluşurlar. Normalde kopmanın sağlanması için gereken kuvvetin deney için kullanılan kuvvetlerden daha fazla olduğu bilinmektedir. Aradaki fark dislokasyon olarak adlandırılan kafes hatalarına bağlanarak açıklanabilir (Küçükdoğan, 2022). Bükme işlem ile bükme bölgesinde oldukça yüksek oranda plastik deformasyon gerçekleşmektedir. Bunun sonucunda atom düzlemlerinin yer değiştirmesi ve mikroyapıda tane morfolojisinin basma yönüne dik doğrultuda uzaması ve kristal kafes çarpılmaları neticesinde bükme bölgesindeki dislokasyon oranı dramatik şekilde artarak mikroçatlak oluşumuna neden olabilmektedir. 6 mm, 8 mm ve 10 mm Alüminyum 5754 – H111 sac bükümlerinde görülen çatlak ve kopmaların bir nedeninin bu olduğu bilinmektedir. Bir diğer neden ise bu kalınlıklardaki Alüminyum 5754 – H111 sacı için uygun alt ve üst kalıbın kullanılmaması olarak açıklanabilir. Ayrıca sac metalin soğuk şekillendirilmesi esnasında oluşan dislokasyonlar malzemenin akma gerilmesini artırır. Bu sayede de malzemenin mukavemet kazandığı bilinmektedir (Şen vd, 2015). Pekleşme adı verilen bu durum büküm esnasında oluşan yırtılmalara neden olarak gösterilebilir.

Doğru sonuca ulaşamayıp tahmin edilen k-faktörleri ile doğrusal interpolasyon hesaplaması ile bulunan k-faktörlerinin; başlangıçta belirlenen üç farklı k-faktörüne göre

nispeten birbirine yakın değerler olduğu görülmektedir. Bu durum, tahmin edilen k-faktörlerinin doğru büküm için gerekli olan k-faktörlerine yakın olduğunu göstermektedir.

Doğrusal interpolasyon hesaplamasının yapılması hassas bükümlerin gerçekleştirilmesi için gerekli bir çalışmadır. Buradaki hedef, numune bükümlerle doğru ve uygun k-faktörünün aralığını belirlemek ve o aralık için matematiksel yaklaşımda bulunarak sonuca ulaşmaktır. 1,5 mm AISI 304 kalite paslanmaz çeliğini ele alırsak;

$$\frac{50,10-49,89}{50-49,89} = \frac{0,35-0,275}{x-0,275} \quad (2)$$

denklemi sonucunda x değerinin 0,314 olduğu hesaplanmıştır. 1,5 mm AISI 304 kalite paslanmaz çeliğinin büküm yapılan firma bünyesinde doğru k-faktörünün 0,314 olduğu anlaşılmıştır. Tüm numuneler için hesaplamalar aynı şekilde yapılmış ve k-faktörleri bu şekilde ortaya çıkarılmıştır.

Öngörü k-faktörleri ve doğrusal interpolasyon ile hesaplanan k-faktörleri incelendiğinde St37 ve Alüminyum5754 – H111 malzemeleri için bu değerlerin yakın olduğu görülmüştür. Ancak AISI 304 kalite paslanmaz sacının ise bazı kalınlıklarda iki k-faktörü arasında nispeten daha fazla fark olduğu belirlenmiştir. Bu durumun doğru sonuca ulaşmak için bir engel olduğu düşünülmemektedir. Çünkü yapılan işlem, eldeki veriler ile öncelikle doğru k-faktörün hangi aralıkta olduğu belirlemek ve sonrasında bu aralıkta bir öngörü bükümü gerçekleştirmektir. Daha sonra tüm bu veriler ile doğrusal interpolasyon hesaplaması yapmak ve doğru büküm için uygun k-faktörünü belirlemektir. Yani öngörü k-faktörü bizi doğru sonuca götüren önemli bir veri olarak görülmektedir.

Pekince (2019) çalışmasında aynı tür malzemenin bükümünde farklı alt kalıp kullanımının k-faktörü değerini değiştirdiğini bildirmiştir. Bunun sebebi alt kalıbın radyus değerini değiştirmesi ve bu durumun doğrudan k-faktörünü etkilemesidir. Radyusun büyümesi sacın açınım boyunu kısaltmakta ve küçülmesi ise sacın açınım boyunu artırmaktadır. Bu çalışmada kullanılan alt kalıpların yerine farklı alt kalıpların kullanılması durumunda k-faktörlerinin değişebileceği düşünülmektedir.



Şekil 4.4: 1,5 mm AISI 304 kalite paslanmaz çeliğinin verilen k-faktörlerine göre bükümleri



Şekil 4.5: 4 mm AISI 304 kalite paslanmaz çeliğinin 0,275-0,350 ve 0,425 k-faktörlerine göre bükümleri



Şekil 4.6: 3 mm Alüminyum5754 – H111 sacının doğrulama bükümü olan 0,409 ve 0,275-0,350-0,425 k-faktörlerine göre bükümleri



Şekil 4.7: 5 mm Alüminyum5754 – H111 sacının doğrulama bükümü olan 0,341 ve 0,275-0,350-0,425 k-faktörlerine göre bükümleri



Şekil 4.8: 6 mm Alüminyum5754 – H111 sacının 0,275-0,350-0,425 k-faktörlerine göre bükümleri



Şekil 4.9: 6 mm Alüminyum5754 – H111 sacının 0,275-0,35-0,425 k-faktörlerine göre bükümleri sonrası ortaya çıkan çatlakların görünüşü

6 mm Alüminyum5754 – H111 sacının tüm k-faktörlerine göre açınımlarında Şekil 4.9’ da görüldüğü üzere çatlaklar gözlenmiştir. Bu durum bükümde istenmeyen bir sonuçtur. Sağlıklı bir sonuç alınamadığı için öngörü k-faktörü ve doğrusal interpolasyona göre hesaplama k-faktörü uygulamaları burada gerçekleştirilememiştir. 6 mm Alüminyum5754 – H111 sacının X35 alt kalıbında ve 3,3 mm radyuslu üst kalıp ile bükümünün uygun olmadığı

ortaya çıkarılmıştır. Üst kalıp radyusu artırılarak yapılacak bükümlerde malzemede oluşan radyusun artırılması ile uygun bükümün yapılabileceği düşünülmektedir.



Şekil 4.10: 3 mm St37 sacının doğrulama bükümü olan 0,192 ve 0,275-0,350-0,425 k-faktörlerine göre bükümleri



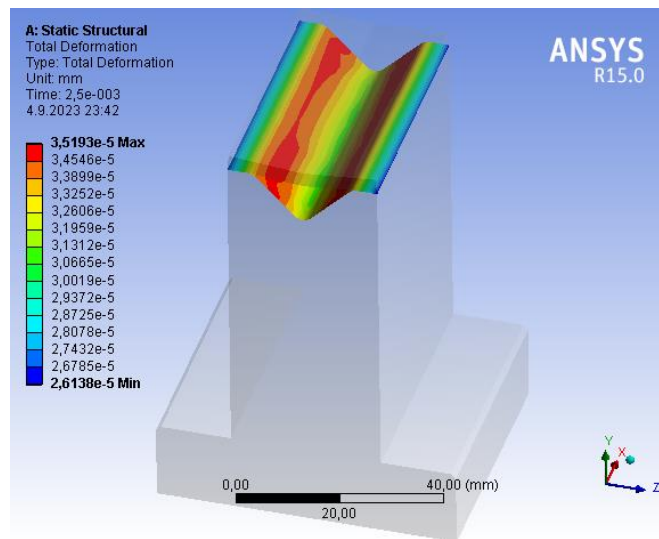
Şekil 4.11: 5 mm St37 sacının 0,275-0,350-0,425 k-faktörlerine göre bükümleri



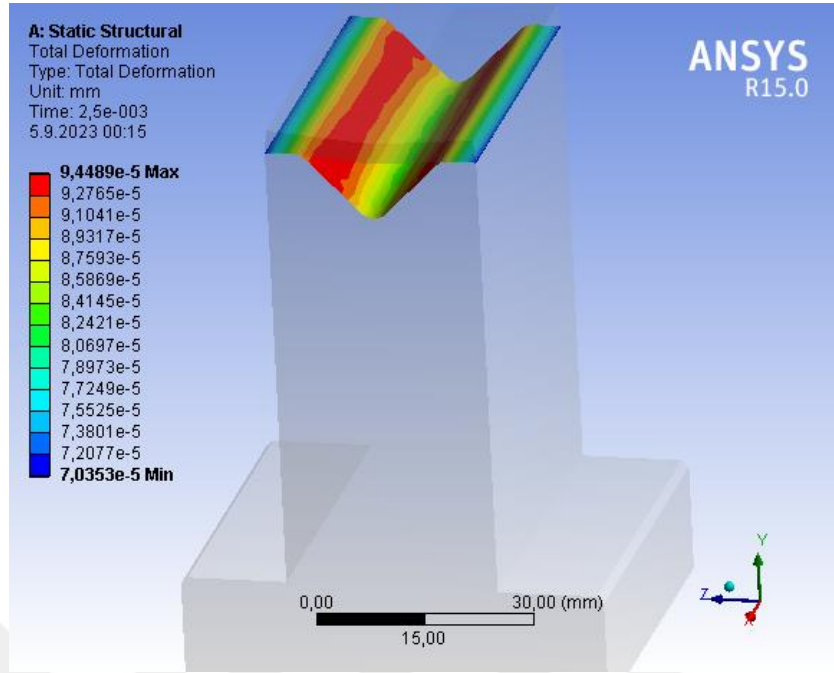
Şekil 4.12: 6 mm St37 sacının 0,275-0,350-0,425 k-faktörlerine göre bükümleri

4.4. Kalıp Aşınması Simülasyon Sonuçlarının Değerlendirilmesi

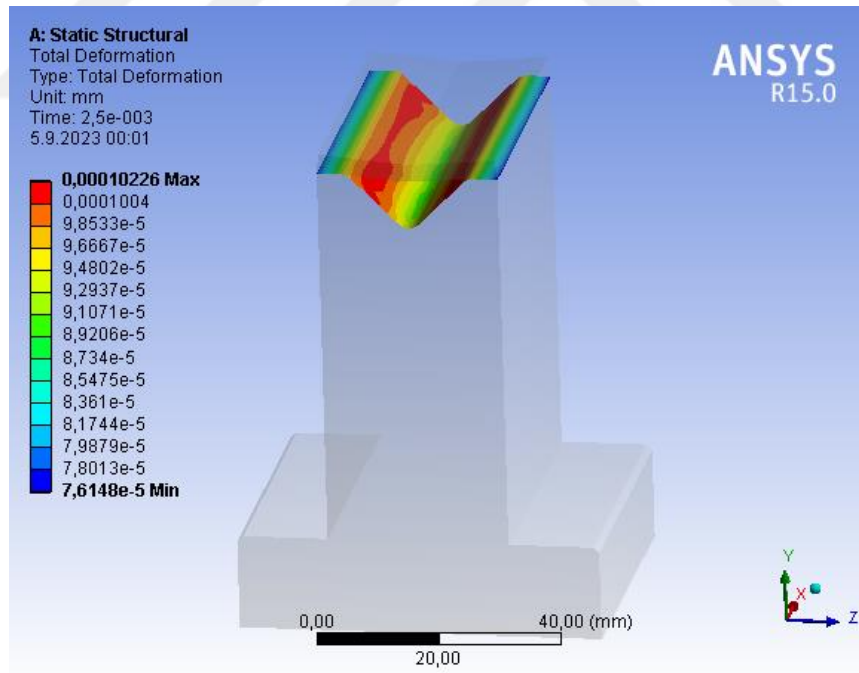
Alt kalıpta ortaya çıkan deformasyon miktarları iki açıdan incelenmek istenmiştir. Bunlardan biri alt kalıbın radyus bölgeleri diğeri ise alt kalıbın en fazla aşınmaya uğrayan bölgeleridir.



Şekil 4.13: Alüminyum 5754 - H111, 3 mm sac metalin bir bükümü sonucu alt kalıpta ortaya çıkan deformasyon miktarı (mm)



Şekil 4.14: AISI 304 kalite paslanmaz, 3 mm sac metalin bükümü sonucu alt kalıpta ortaya çıkan deformasyon miktarı (mm)



Şekil 4.15: St37(S235JR) , 3 mm sac metalin bükümü sonucu alt kalıpta ortaya çıkan deformasyon miktarı (mm)

Üç farklı malzeme ile yapılan aşınma analizinde de radius bölgelerinde oluşan aşınmanın, kalıbın en fazla aşınan bölgesi olan iç yüzeyinden daha az olduğu görülmektedir. Bükülen

malzemenin açısı statik olarak iki radyustan destek aldığından ve 90° bükümünü sonlandırdığından dolayı radyus bölgelerinde ortaya çıkan aşınmanın bilgisi önem arz etmektedir.

ANSYS sonuçlarına göre en fazla aşınmanın St37 sacı bükülürken ortaya çıktığı, bunu sırasıyla AISI 304 kalite paslanmaz çeliğin ve Alüminyum5754 – H111 alaşımının izlediği görülmüştür.

Alt kalıbı radyus aşınmaları için verileri incelediğimizde; St37 sacı bükümünde CK45 alt kalıbı radyusunda oluşan aşınma miktarı, Alüminyum5754 – H111 sacı bükümünde ortaya çıkan aşınmaya göre yaklaşık 2,9 kat fazla olduğu görülmüştür. Ayrıca AISI 304 kalite paslanmaz sacı bükümünde oluşan aşınma miktarı, Alüminyum5754 – H111 sacı bükümünde ortaya çıkan aşınmaya göre yaklaşık 2,68 kat fazla olduğu belirlenmiştir. Bu durum St37 veya AISI 304 kalite paslanmaz çelik sacı bükerken kullanılan alt kalıp radyusu formunun Alüminyum5754 – H111 sacına bükümlerine göre daha hızlı bakım onarım görmesi anlamına da gelmektedir. Tablo 4.7’ de radyus aşınma detayları verilmiştir.

Alt kalıpta en fazla aşınmanın olduğu bölgeleri incelediğimizde, aşınma miktarı en fazla olan bükümün yine St37 ile oluştuğu belirlenmiştir. En az aşınmanın ise Alüminyum5754 – H111 sacı bükümünde oluştuğu görülmüştür. Tablo 4.8’ de en fazla aşınma verileri gösterilmiştir.

Üç farklı sac metalin 1, 10000, 25000 ve 50000 adet bükümüne göre alt kalıbın radyus bölgesindeki aşınması ve alt kalıptaki en yüksek aşınmaların miktarı belirlenerek tablo halinde gösterilmiştir.

Tablo 4.7: Üç farklı sac metal bükümlerinin CK45 alt kalıbı radyusunda oluşturduğu büküm sayısına bağlı aşınma miktarları

Bükümü yapılan sac malzeme	Deformasyon miktarı (mm)			
	1 büküm	10000 büküm	25000 büküm	50000 büküm
AA5754 - H111 alüminyum alaşımı	0,0000326	0,326	0,815	1,63
AISI 304 paslanmaz çelik	0,0000875	0,875	2,187	4,375
St37 (S235JR) çelik sac	0,0000948	0,948	2,37	4,74

Tablo 4.8: Üç farklı sac metal bükümlerinin CK45 alt kalıbında en fazla aşınmanın olduğu bölgedeki büküm sayısına bağlı aşınma miktarları

Bükümü yapılan sac malzeme	Deformasyon miktarı (mm)			
	1 büküm	10000 büküm	25000 büküm	50000 büküm
AA5754 - H111 alüminyum alaşımı	0,0000351	0,351	0,875	1,75
AISI 304 paslanmaz çelik	0,0000944	0,944	2,36	4,72
St37 (S235JR) çelik sac	0,0001022	1,022	2,555	5,11

Büküm adedinin önemi kadar, aşınmanın hangi malzemede kaçınıcı adetlerden sonra olacağını hesaplamak ya da tahmin edebilmek de işletme için işin planlanmasında önemli rol oynayacağı bilinmektedir. Alt kalıbın radyusunda ve en fazla aşınmanın olduğu bölgelerde 0,05 mm, 0,1 mm ve 0,15 mm deformasyon için gerekli büküm sayıları da her malzeme için farklı olacak şekilde tablo halinde verilmiştir.

Tablo 4.9: Malzeme cinsine göre alt kalıbın radyusunda 0,05 mm, 0,1 mm ve 0,2 mm aşınma oluşturan büküm adetleri

Deformasyon (mm)	0,05 mm aşınma için büküm adedi	0,1 mm aşınma için büküm adedi	0,2 mm aşınma için büküm adedi
Alüminyum 5754 - H111	1533	3067	6125
AISI 304 kalite paslanmaz	571	1142	2285
St37 (S235JR)	527	1054	2108

Tablo 4.10: Malzeme cinsine göre alt kalıpta en fazla aşınma olan bölgede 0,05 mm, 0,1 mm ve 0,2 mm aşınma oluşturan büküm adetleri

Deformasyon (mm)	0,05 mm aşınma için büküm adedi	0,1 mm aşınma için büküm adedi	0,2 mm aşınma için büküm adedi
Alüminyum 5754 – H111	1424	2849	5699
AISI 304 kalite paslanmaz	529	1059	2117
St37 (S235JR)	489	978	1955

Büküm yapıldıktan sonra DIN-ISO 2768 tablosuna göre uzunluk ve açı doğruluğu kontrolü gereklidir.

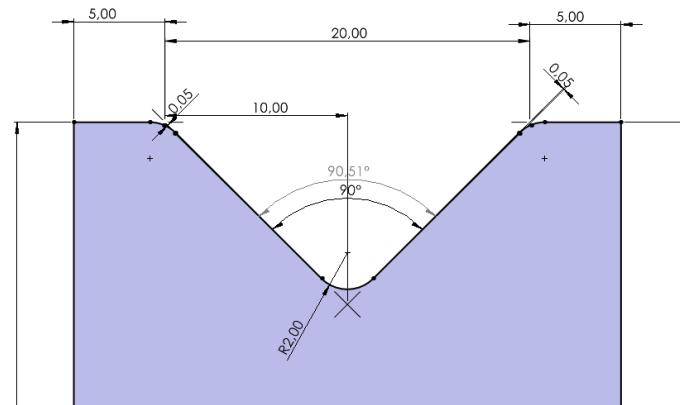
Tablo 4.11: DIN-ISO 2768' e göre uzunluk ve büküm arasındaki tolerans tablosu

Uzunluk (mm)	F (fine)	M (medium)	C (coarse)	V (very coarse)
0,6 - 3	$\pm 0,05$	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	-
3 - 6	$\pm 0,05$	$\pm 0,1$	$\pm 0,3$	$\pm 0,5$
6 - 30	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,5$	± 1
30 - 120	$\pm 0,15$	$\pm 0,3$	$\pm 0,8$	$\pm 1,5$
120 - 400	$\pm 0,2$	$\pm 0,5$	$\pm 1,2$	$\pm 2,5$
400 - 1000	$\pm 0,3$	$\pm 0,8$	$\pm 2,0$	$\pm 4,0$
1000 - 2000	$\pm 0,5$	$\pm 1,2$	$\pm 3,0$	$\pm 6,0$
2000 - 4000	-	$\pm 2,0$	$\pm 4,0$	$\pm 8,0$

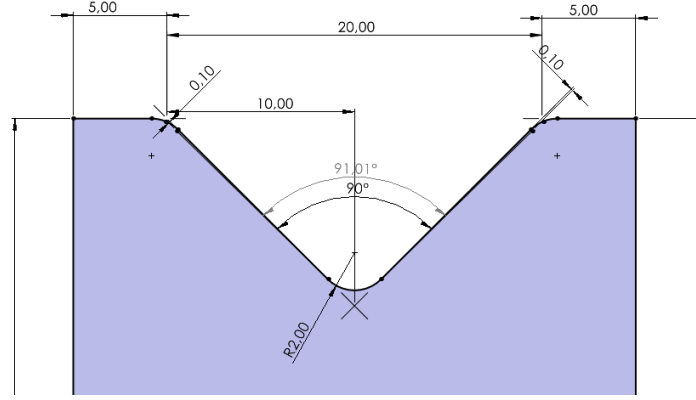
Tablo 4.12: DIN-ISO 2768' e göre açı ve büküm arasındaki tolerans tablosu

Uzunluk (mm)	F (fine)	M (medium)	C (coarse)	V (very coarse)
10 mm e kadar	$\pm 1^\circ$	$\pm 1^\circ$	$\pm 1^\circ 30'$	$\pm 3^\circ$
10 - 50	$\pm 0^\circ 30'$	$\pm 0^\circ 30'$	$\pm 1^\circ$	$\pm 2^\circ$
50 - 120	$\pm 0^\circ 20'$	$\pm 0^\circ 20'$	$\pm 0^\circ 30'$	$\pm 1^\circ$
120 - 400	$\pm 0^\circ 10'$	$\pm 0^\circ 10'$	$\pm 0^\circ 15'$	$\pm 0^\circ 30'$
400 ve üzeri	$\pm 0^\circ 5'$	$\pm 0^\circ 5'$	$\pm 0^\circ 10'$	$\pm 0^\circ 20'$

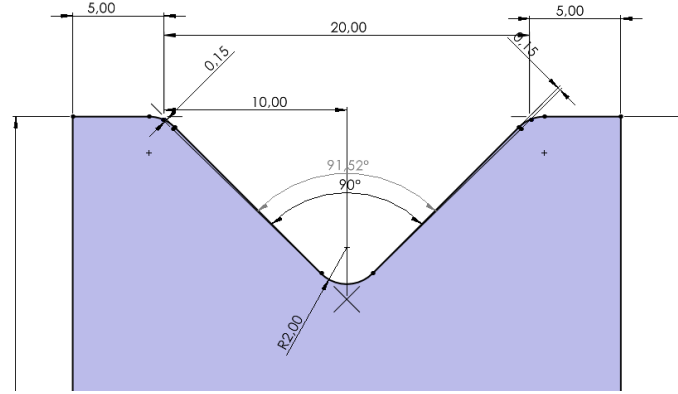
Tablolar göz önüne alındığında F (fine) için 15 mm' ye bükülecek parçanın bükümden sonra $15 \pm 0,1$ mm uzunluğunda olması ve 90° bükümü için $90^\circ \pm 0^\circ 30'$ olması beklenmektedir. Solidworks programında kalıptaki deformasyona göre oluşacak açılar belirlenmiştir.



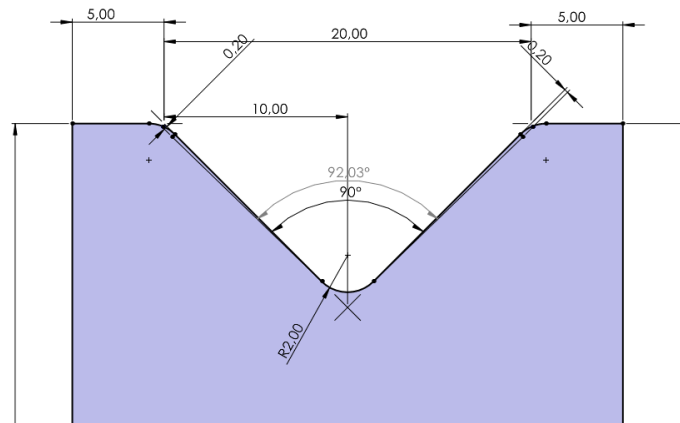
Şekil 4.16: Alt kalıp radiusunda 0,05 mm aşınmanın oluşturduğu açı miktarı



Şekil 4.17: Alt kalıp radyusunda 0,1 mm aşınmanın oluşturduğu açı miktarı



Şekil 4.18: Alt kalıp radyusunda 0,15 mm aşınmanın oluşturduğu açı miktarı



Şekil 4.19: Alt kalıp radyusunda 0,2 mm aşınmanın oluşturduğu açı miktarı

Şekiller incelendiğinde 0,05 mm aşınmanın alt kalıbı $90,5^\circ$; 0,1 mm aşınmanın alt kalıbı 91° ; 0,15 mm aşınmanın alt kalıbı yaklaşık $91,5^\circ$ ve 0,2 mm aşınmanın alt kalıbı yaklaşık 92° yaptığı görülmüştür.

Tablo 4.9' a göre 1533 adet Alüminyum5754 – H111 sac malzemesi büküldüğünde alt kalıbın radyusunda 0,05 mm aşınma meydana geldiği görülmektedir. Şekil 4.16 incelendiğinde ise 0,05 mm aşınmanın 50 mm uzunluğundaki CK45 alt kalıbında açığı $0,5^\circ$ artırdığı görülmektedir. Tablo 4.12' ye bakıldığında ise F ve M toleranslarının $\pm 0,5^\circ$ olduğu anlaşılmaktadır. Yapılan çalışmada F ve M toleransına göre yaklaşık 1533 adet Alüminyum5754-H111 sacının toleransa uygun bükülmesinin mümkün olduğu görülmektedir. C toleransına göre ($\pm 1^\circ$) ve 0,1 mm aşınma ile yaklaşık 3067 adet ve V toleransına göre ($\pm 2^\circ$) ve 0,2 mm aşınma ile 6125 adet Alüminyum5754 – H111 sacının toleransa uygun bükülebileceği görülmektedir.

Tablo 4.9' a göre 571 adet AISI 304 kalite paslanmaz çelik sac malzemesi büküldüğünde alt kalıbın radyusunda 0,05 mm aşınma meydana geldiği görülmektedir. Şekil 4.16 ve Tablo 4.12 incelendiğinde yaklaşık 571 adet AISI 304 kalite paslanmaz sacının F ve M toleranslarına uygun bükülmesinin mümkün olduğu anlaşılmaktadır. C toleransına göre ($\pm 1^\circ$) ve 0,1 mm aşınma ile yaklaşık 1142 adet, V toleransına göre ($\pm 2^\circ$) ve 0,2 mm aşınma ile yaklaşık 2285 adet AISI 304 kalite paslanmaz sacının toleransa uygun bükülebileceği görülmektedir.

Tablo 4.9' a göre 527 adet St37 sac malzemesi büküldüğünde alt kalıbın radyusunda 0,05 mm aşınma meydana geldiği görülmektedir. Şekil 4.16 ve Tablo 4.12 incelendiğinde yaklaşık 527 adet St37 sacının F ve M toleranslarına uygun bükülmesinin mümkün olduğu anlaşılmaktadır. C toleransına göre ($\pm 1^\circ$) ve 0,1 mm aşınma ile yaklaşık 1054 adet, V toleransına göre ($\pm 2^\circ$) ve 0,2 mm aşınma ile yaklaşık 2108 adet St37 sacının toleransa uygun bükülebileceği görülmektedir.

Tablo 4.10' a göre alt kalıpta en fazla aşınmanın olduğu yüzeyde 1424 adet Alüminyum5754 – H111 sac malzemesinin 0,5 mm aşınma meydana getirdiği görülmektedir. 2849 adet büküm sonrasında aşınmanın 0,1 mm olduğu, 5699 adet büküm sonrasında aşınmanın 0,2 mm olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 4.10' a göre alt kalıpta en fazla aşınmanın olduğu yüzeyde 489 adet St37 sac malzemesinin 0,05 mm aşınma meydana getirdiği görülmektedir. 978 adet büküm sonrasında aşınmanın 0,1 mm olduğu, 1955 adet büküm sonrasında aşınmanın 0,2 mm olduğu anlaşılmaktadır.

Bu adetlerin bükümde geçilmesi durumunda toleransın karşılanmayacağı bilinmelidir. Kalıp bakım-onarımına alınmalı ya da yeni bir kalıp ile büküme devam edilmesi gerekmektedir. Bükülen malzemelerin geometrisine göre yarıçap aşınması değerleri ya da en fazla aşınan bölgeye göre karar verilmesinin uygun olduğu düşünülmektedir.

$$BA = \frac{\pi \times \alpha (R + K \times T)}{180} \quad (3)$$

denklemin göz önüne alınarak bir hesap yapılmak istenmiş ve bu sayede aşınmaya bağlı büküm sonrası değişen açı değerinin k-faktörüne etkisi incelenmiştir.

Doğru bükümün gerçekleşmesi için doğru BA değerinin bilinmesi gereklidir. Denkleminde k-faktörü dışında diğer değerler sabit ve istenen değerler olduğundan dolayı 90° büküm için büküm izni (BA) değerinin değişmemesi k-faktörünün değişmesine bağlı kalmaktadır. Daha önce k-faktörü 0,409 olarak hesaplanmış 3,3 mm üst kalıp yarıçapı kullanılarak 3 mm Alüminyum 5754 - H111 sac metalinin 90 ° bükülecek bir parçası için;

$$BA = \pi \times 90^\circ (3,3 + 0,409 \times 3) / 180 \quad (4)$$

$$BA = 7,1109 \text{ mm} \quad (5)$$

olarak bulunmuştur. Aynı malzeme için bükümün iç yüzeyi açısının aşınmadan kaynaklı 0°30' artarak 90°30' olduğu ve dış yüzeyde kalan 89°30' değeri için BA değeri;

$$BA = \pi \times 89,5^\circ (3,3 + 0,409 \times 3) / 180 \quad (6)$$

$$BA = 7,0714 \text{ mm} \quad (7)$$

olarak hesaplanmıştır. Arada 0,0395 mm lik bir yay uzunluğu farkının olduğu görülmüştür. Büküm açısı azaldığından dolayı BA değeri azalmıştır ve bu beklenen bir durumdur. Aşınmaya bağlı olarak alt kalıpta 0°30' lik değişim olduğu düşünülürse BA değeri 7,0714 mm alınarak 90° büküm yapılmaya çalışıldığında k-faktörü;

$$7,0714 = \pi \times 90^\circ (3,3 + K \times 3) / 180 \quad (8)$$

$$K = 0,400 \quad (9)$$

olarak bulunmuştur. Bu durum aşınmaya bağlı 0°30' açılı artışında, bükme boyu 15 mm olması istenen Alüminyum 5754 – H111 sacının k-faktörünün 0,400 olarak kullanılması gerektiğini göstermektedir. DIN-ISO 2768' e göre F ve M toleransları için k-faktöründe bu düzenleme yapılabilir. C ve V toleransı kullanan işletme ise hesaplamaları tabloya göre düzenleyip kullanabileceği düşünülmektedir.

Bu çalışma ile bükümlerini DIN-ISO 2768 açılı ve büküm toleransı tablosuna göre yapan işletmeler alt kalıptaki aşınmanın açısını belirledikten sonra istedikleri hassasiyet için k-faktörü düzenlemesi yapabileceklerdir.

Yapılan çalışma ile aşınmanın açısı belirlendikten sonra k-faktörü düzenlemesinin yapılabildiği görülmüştür.

Alt kalıptaki aşınmanın sac metal bükümünde bükülen parçanın iç açısını arttırdığından ve açılı farkının direkt olarak k-faktörünü etkilediği görüldüğünden dolayı; kalıptaki aşınma miktarının k-faktörünü etkileyeceği ve doğru açınımla yanlış bükümlerin ortaya çıkabileceği anlaşılmıştır. Daha ayrıntılı bir simülasyon yapılarak aşınmaların sac malzemenin açısına ve k-faktörüne olan etkisi incelenebilir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Her büküm makinesinin hassasiyeti farklıdır. Kullanılan alt ve üst kalıbın zamanla aşınmalarını da göz önüne alırsak yapılan çalışmalar sadece firma bünyesinde doğruluk gösterebileceği bilinmelidir. Aynı kalıplar ve aynı büküm makinesi kullanılsa bile, firmalar bakımlarını aynı periyotta yapmayabilir ve kalıp aşınmaları tamamen aynı olmayacağı için k-faktörleri de birbirinden farklı olması beklenmektedir.

Yapılan tüm büküm çalışmaları dikkate alındığında şu sonuçlar görülmüştür;

- Malzemenin açınımı için gerekli olan k-faktörü, malzeme cinsine ve kalınlığa bağlı olarak farklılık gösterdiği tespit edilmiştir.
- Alüminyum5754 – H111, St37(S235JR) ve AISI 304 kalite paslanmaz çelik kullanılarak yapılan ve 3,3 mm üst kalıp radyusu kullanılarak bükülen tüm malzemeler için bulunan k-faktörü değerleri 0,192 ile 0,425 değerleri arasında olduğu ortaya çıkarılmıştır.
- 0,275-0,350-0,425 k-faktörlerine göre açınım alıp malzemenin bükülmeleri ile alınan sonuçlara göre tahmin etme metoduyla bile doğru büküme çok yakın değerlerin ortaya çıkabileceği görülmüştür.
- Doğrusal interpolasyon hesaplaması ile bulunan k-faktörleriyle üçer adet yapılan tüm doğrulama bükümleri $50,00 \pm 0,03$ mm aralığında ölçülmüşlerdir.
- Bünyesinde abkant büküm yapabilen her işletme bu çalışma ile kendi k-faktörlerini belirleyerek doğru ve hassas büküm gerçekleştirebileceği ortaya çıkarılmıştır.
- ANSYS programı ile yapılan aşınma simülasyonu ile aşınmaya bağlı olarak k-faktöründe değişikliklerin yapılabileceği öngörülmüştür.

Bu çalışmanın ardından gelecekteki diğer araştırmacılara önerilebilecek çalışmalar;

- Farklı malzemeler kullanarak, bunların k-faktörü değerindeki davranışı ortaya çıkarmak,
- Farklı programlar kullanarak ortaya çıkarılan k-faktörlerinin güvenilirliklerini karşılaştırmak amaçlı deneyler yapmak,

- Alınan sac açılımının lazer kesiminde yatay, dikey ve açılı konularak kesilmesiyle ortaya çıkabilecek k-faktörü farklarını belirlemek,
- Büküm kısmına çok yakın ya da büküm kısmında olan parça dizaynına göre sac açılımında bağlantı elemanı boşluğu veya slot gibi durumların k-faktörüne etkisini incelemek,
- Bükülecek olan numunelere sıcaklık girdisi yaparak bu bükmenin k-faktörüne etkisini araştırmak,
- Farklı alt ve üst kalıplar kullanarak ortaya çıkan büküm sonuçlarına göre k-faktörü tablosu oluşturmak,
- Farklı bir bükme metodunun k-faktörüne etkisini incelemek,
- Analiz programında daha detaylı aşınma analizi ortaya çıkarmak olarak sıralanmaktadır.

KAYNAKLAR

- Akduman, M. (2021). Düşük Karbonlu ST37 Yapı Çeliğinin Isıl İşlem Sonrası Yapısı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Karabük, 64 s.
- Akıncıoğlu, S., Öner, G., Yandayan, T. (2021). CNC işleme merkezlerinde hataların iş esasıyla yaklaşımla düzeltilmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 9: 92-103.
- Al-Wahab, D. A. & Baştürk, S. (2021). Experimental investigation of drawbead effect on springback in profile of double circular, rectangular and triangular bending sheet metal forming processes. *AURUM Journal of Engineering Systems and Architecture*, 5(1): 51-64.
- Aydemir, F. (2017). Abkant Preslerde Büküm Parametrelerinin Tespiti. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Bursa, 103 s.
- Basmacı, G., Sayın, L. (2019). Bakır Sac Levhaların "V" Bükme Yöntemi İle Şekillendirilmesiyle Oluşan Geri Esneme Miktarının Deneysel Olarak İncelenmesi. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi* 11: 3 (2019): 147-154.
- Bozkurt, C. (2018). Sac Büküm İşleminde Açınım Boyu Problemlerinin Azaltılmasına Yönelik Araştırma. Yüksek Lisans Tezi, Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Bolu, 66 s.
- Çalığıülü, U., Türkmen, M., Çanakçı, A. ve Gökdaş, M. (2018). PTA Kaynak Yöntemi ile Birleştirilen OPTİM 700 MC-St37 Malzemelerinin X-Ray Radyografisi. *The 1st International Engineering and Technology Symposium*. Batman.
- Çerçi, E. (2021). Makara İle Sac Şekillendirme Sistemi ve Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Karabük, 75 s.
- Dilipak, H., Özdemir, M., Sarıkaya M. (2013). Effects of Material Properties and Punch Tip Radius on Spring-Forward in 90° V Bending Processes. *Journal of Iron and Steel Research, International*. 20: 64-69.
- Doğdu, M. (2021). Saclarda Değişken Faktörlerin Doğal Frekansa Etkisinin Karşılaştırılmalı Olarak Sonlu Elemanlar Metoduyla İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Bursa, 79 s.
- Hekim, A. (2016). Sac Bükmede Geri Yaylanmanın Sonlu Eleman Yöntemi İle İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Hitit Üniversitesi, Çorum, 66 s.
- Işıktaş, A. (2011). Farklı Kalınlıklardaki DKP ve Paslanmaz Sacların Farklı Açılarda Yapılan V – Bükme İşlemindeki Geri Yaylanmalarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir, 71 s.
- Karataş, E. (2009). Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Sac Metalin Büküm Şekillerine Göre

- Deformasyonunun İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gebze İleri Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, Türkiye.
- Kocaman, A. G. (2021). Alüminyum Alaşımlarında Bilyeli Dövme İşleminin Mekanik ve Yüzey Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Sakarya, 48 s.
- Kovacevic, R., Hu, Z., Labudovic, M., Wang, H., (2001). Computer simulation and experimental investigation of sheet metal bending using laser beam scanning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41(4): 589-607.
- Küçükdoğan, R. (2022). Servo Caka Makinesinin Tasarımı ve Yapısal Optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Konya, 88 s.
- Lange, K. (1985). *Handbook of Metal Forming*, McGraw-Hill, New York, 9-16.
- Lu, J., Mai, S. P., Wen, C. S. (2018). Surface-modified steel sheets and corrugated panels in three-point bending. *International Journal of Mechanical Sciences*, 142-143: 10-20.
- Malyer, E., Kayral, S. (2018). Isıl işlemin AA6061 Alüminyum Alaşımı Sac Metal Malzemenin Şekillendirilmesine Etkilerinin İncelenmesi. *DÜMF Mühendislik Dergisi* 9 : 2 (2018): 741-751.
- Osmanoğlu, T. (2012). AISI 304 ve 430 Kalite Paslanmaz Çeliklerin Mikroyapılarına, Mekanik Özelliklerine ve Korozyon Davranışlarına Soğuk Deformasyonun Etkileri. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, 77 s.
- Pekince, D. (2019). Sac Metal Bükümlerinde "K" Faktörünün Mukavemeti Olarak İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Karabük, 78 s.
- Suchy, I. (2006). *Handbook of Die Design, 2nd Ed.*, Inc, McGraw-Hill Book Company, s. 86-88.
- Sun, X., Shen, Y. F., Li, X. X., Wang, Y. D., Zuo, L. (2012). Twinning and martensite in a 304 austenitic stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, 552: 514-522.
- Şahin, Ç.Ö. (2013). Sac Levhaların V-Bükme Sonucu Geri Yaylanma Davranışlarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 110 s.
- Şekerçi, E.M., Meşeci, E.Y., Düzkaya, E., Örs, D. (2018). Sac Metal Şekillendirme ve Uygulamaları. Bitirme Çalışması, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, 38 s.
- Şen, M., Yıldırım, E., Çebi, H., Özdemir, C. (2015). Çift Fazlı Çeliklerden Üretilen Otomotiv Sac Parçalarının Dizaynında Geri Esnemeyi Optimize Edebilmek İçin Sac Kalınlığına Bağlı Olarak Büküm Radyüslerinin Belirlenmesi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi* 12: 2, (2015): 75-95.
- Tekaslan, Ö., Gerger, N., Şeker, U. (2008). AISI 304 Östenitik Paslanmaz Çeliklerde Kesme

Parametrelerine Bağlı Olarak Yüzey Pürüzlülüklerinin Araştırılması. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. 2008, 10: 3-12.

Uslu, E. (2014). Sac Malzemelerin Bükülmesinde Geri Yaylanma Davranışının Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 95 s.

