

T.C

BİLECİKŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**PASLANMAZ ÇELİK SACLARIN DERİN ÇEKİLEBİLİRLİK KABİLİYETLERİNİN
SONLU ELEMANLAR ANALİZİ İLE İNCELENMESİ**

VELİ ARSLAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEZ DANIŞMANI

DR. ÖĞR. ÜYESİ EMRE ESENER

BİLECİK, 2021

10395757

T.C

BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**PASLANMAZ ÇELİK SACLARIN DERİN ÇEKİLEBİLİRLİK KABİLİYETLERİNİN
SONLU ELEMANLAR ANALİZİ İLE İNCELENMESİ**

VELİ ARSLAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEZ DANIŞMANI

DR. ÖĞR. ÜYESİ EMRE ESENER

BİLECİK, 2021

10395757

BEYAN

“Paslanmaz Çelik Sacların Derin Çekilebilirlik Kabiliyetlerinin Sonlu Elemanlar Analizi İle İncelenmesi”adlı yüksek lisans/doktora/sanatta yeterlik tezi/dönem projesinin hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel ahlak kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

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

Veli ARSLAN

.../.../ 2021

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının gerçekleştirilmesinde, yardımlarını ve görüşlerini hiçbir zaman esirgemeyen değerli danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Emre ESENER'e katkı ve emekleri için teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Bu tez çalışması ve tüm hayatım boyunca her zaman desteklerini hissettiğim sevgili annem, babam ve kardeşime sonsuz teşekkür ederim.

Son olarak çalışmalarım ve yaşımda beni sürekli motive eden hayat arkadaşım, sevgili eşime teşekkür ederim.

Veli ARSLAN

..../.../ 2021

ÖZET

PASLANMAZ ÇELİK SACLARIN DERİN ÇEKİLEBİLİRLİK KABİLİYETLERİNİN SONLU ELEMANLAR ANALİZİ İLE İNCELENMESİ

Sac metallerin derin çekme davranışının belirlenmesi endüstriyel açıdan oldukça önem arz etmektedir. Özellikle derin çekme ürünlerinin kullanıldığı beyaz eşya sektörü bu açıdan derin çekmenin oldukça önemli olduğu bir seri üretim endüstrisidir. Beyaz eşya sektöründe ağırlıklı olarak paslanmaz çelik malzemelerin kullanımı tercih edilmektedir. Bu kapsamda tez çalışmasında paslanmaz çelik malzemelerden 304 ve 430 kalitelerinin derin çekilebilirlikleri sonlu elemanlar analizleri ile incelenmiştir. Çalışma kapsamında parça tutucu kuvvet, sürtünme katsayısı ile kalıp ve zimba radüsleri proses parametreleri olarak incelenmiş ve bu parametrelerin derin çekme davranışına etkisi dikkate alınmıştır. Sonlu elemanlar analizlerinde Eta-Dynaform yazılımı kullanılmış ve plastisite modeli olarak günümüzde en sık kullanılan malzeme modellerinden birisi olan Hill-48 modeli tercih edilmiştir. Sonuçlar şekillendirme sınır diyagramları üzerinden incelenmiştir. Sonuç olarak çalışmada kullanılan her iki malzeme için de kullanılan proses parametrelerinin derin çekilebilirliklerine etkisi ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Paslanmaz Çelik, Derin Çekme, Sonlu Elemanlar Analizi

ABSTRACT

DETERMINING DEEP DRAWABILITY OF STAINLESS STEEL SHEETS USING FINITE ELEMENT ANALYSIS

Determining the deep drawing behavior of sheet metals have an importanceat industrial applications. Especially the whiteware sector where deep drawing products are used is a mass production industry where deep drawing is very important in this respect. In the whiteware sector, the use of stainless steel materials is generally preferred.In the study presented in this context, the deep drawability of 304 and 430 grades of stainless steel materials were examined by finite element analysis. In the scope of the study, blankholder force, friction coefficient and die and punch radius were examined as process parameters and the effect of these parameters on deep drawing behavior was taken into account. Eta-Dynaform commercial software was used for finite element analysis and Hill-48 model, which is one of the most frequently used material models, was preferred as plasticity model. The results are analyzed in terms of forming limit diagrams. As a result, the effect of the process parameters used for both materials used in the study on the deep drawability was revealed.

Keywords: Stainless Steel, Deep Drawing, Finite Element Analyses

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖN SÖZ.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER	iv
TABLolar LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
1.GİRİŞ	1
2. DERİN ÇEKME PROSESİ.....	3
2.1. Derin Çekme İşleminin Mekanığı	4
2.2. Derin Çekme Kabiliyetini Etkileyen Faktörler.....	6
2.2.1. Malzeme Özelliklerinin Etkisi	7
2.2.2. Kalıp Geometrisinin Etkisi.....	7
2.2.3. Proses Koşullarının Etkisi.....	9
2.2.3.1. Çekme Hızı.....	9
2.2.3.2. Çekme kuvveti	9
2.2.3.3. Pot Çemberi(Baskı Plakası) Kuvveti	10
2.2.3.4. Yağlama.....	11
2.2.3.5. Süzdürme Çubuğu.....	12
2.3. Derin Çekilme İşleminde Görülen Hatalar	13
2.4. Derin Çekme İşlemi	15
3. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ	16
3.1. Direkt yaklaşım.....	19
3.2. Varyasyonel yaklaşım.....	19
3.3 Ağırlıklı kalanlar yaklaşımı.....	20
3.4 Enerji dengesi yaklaşımı	20
3.5. Sisteme Etki Eden Kuvvetlerin Bulunması	23
3.5.1. Tekil Kuvvetler.....	23
3.5.2. Yayıllı Kuvvetler	23
3.5.3. Kütle Kuvvetleri.....	23
3.6. Sınır Şartlarının Belirlenmesi.....	23
3.7. Sistem Denkleminin Çözümü	23

3.8. Sonlu Elemanlar Yönteminde Kullanılan Algoritmalar	24
4. UYGULAMA ÇALIŞMASI	25
4.1. Sonuçlar	28
5. DEĞERLENDİRME.....	35
KAYNAKLAR.....	36



TABLÖLÄRLİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 2.1. Paslanmaz sac kullanım alanları	7
Tablo 2.2. Çekme hızları	9
Tablo 2.3. Bazı malzemelerin pot çemberi basınç kuvvetleri	11
Tablo 3.1. Eksplisit ve implisit yöntemler arasındaki temel farklar.....	25
Tablo 4.1. Çalışmada kapsamında kullanılan proses parametreleri ve değerleri	26
Tablo 4.2. Çalışmada kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri	27



ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Derin çekme terimleri ve açıklamalar.....	4
Şekil 2.2. Çekme kalıbındaki işlev bölgeleri.....	4
Şekil 2.3. Derin çekmenin mekaniği.....	5
Şekil 2.4. Derin çekme esnasında parçada oluşan gerilmeler.....	6
Şekil 2.5. Çekme işlemi esnasında çekme sacına etki eden kuvvetler ve yırtılma.....	6
Şekil 2.6. Pot çemberi kuvvetinin, yırtılma ve buruşma hatalarının etkisi.....	10
Şekil 2.7. Şekillendirme işleminde yağlamanın etkisi.....	11
Şekil 2.8. Süzdürme çubuğunun kalıp içersinde gösterimi.....	12
Şekil 2.9. Akan sac malzemede süzdürme çubuğunda oluşan frenleme kuvveti ve bükme doğrulma işlemleri.....	13
Şekil 2.10. Derin çekme işleminde görülen çekme kusurlar.....	14
Şekil 2.11. Derin çekme terimleri ve açıklamalar.....	15
Şekil 3.1. Sonlu elemanlar metodu analiz yapılan elemanın temsili ağ yapısının gösterimi..	17
Şekil 4.1. Çalışma kapsamında kullanılan kalıp takımı.....	26
Şekil 4.2. Derin çekme kalıp takımının sonlu elemanlar modeli.....	27
Şekil 4.3. 200 kN parça tutucu kuvvet sonucunda şekillendirme sınır diyagramlarının karşılaştırılması.....	29
Şekil 4.4. 400 kN parça tutucu kuvvet sonucunda şekillendirme sınır diyagramlarının karşılaştırılması.....	29
Şekil 4.5. 600 kN parça tutucu kuvvet sonucunda şekillendirme sınır diyagramlarının karşılaştırılması.....	29
Şekil 4.6. 800 kN parça tutucu kuvvet sonucunda şekillendirme sınır diyagramlarının karşılaştırılması.....	30
Şekil 4.4. 0,08 sürtünme katsayısı kullanımı sonucunda şekillendirme sınır diyagramlarının karşılaştırılması.....	30
Şekil 4.8. 0,12 sürtünme katsayısı kullanımı sonucunda şekillendirme sınır diyagramlarının karşılaştırılması.....	31

Şekil 4.9. 0,16 sürtünme katsayısı kullanımı sonucunda şekillendirme sınır diyagramlarının karşılaştırılması.....	31
Şekil 4.10. 0,20 sürtünme katsayısı kullanımı sonucunda şekillendirme sınır diyagramlarının karşılaştırılması.....	31
Şekil 4.5. 8 mm zımba radüsü kullanımı sonucunda şekillendirme sınır diyagramlarının karşılaştırılması.....	32
Şekil 4.12. 12.7 mm zımba radüsü kullanımı sonucunda şekillendirme sınır diyagramlarının karşılaştırılması.....	32
Şekil 4.13. 15 mm zımba radüsü kullanımı sonucunda şekillendirme sınır diyagramlarının karşılaştırılması.....	33
Şekil 4.14. 8 mm kalıp radüsü kullanımı sonucunda şekillendirme sınır diyagramlarının karşılaştırılması.....	33
Şekil 4.15. 12.7 mm kalıp radüsü kullanımı sonucunda şekillendirme sınır diyagramlarının karşılaştırılması	34
Şekil 4.16. 15 mm kalıp radüsü kullanımı sonucunda şekillendirme sınır diyagramlarının karşılaştırılması	34

1.GİRİŞ

Metalik sacların çekme kalıplarında soğuk deformasyon ile şekillendirmesi esasına dayanan ve bir imalat yöntemi olan derin çekme; özellikle otomotiv, havacılık, gıda sanayi gibi sektörlerde kendisine uygulama alanı bulmaktadır. Otomobil kapısı, beyaz eşya parçaları ve kap formuna sahip üç boyutlu elemanların tek parça halinde seri üretimi söz konusu olduğunda, derin çekme yöntemi kullanılmaktadır. Bunun nedeni olarak ise günümüzde her alanda ekonomiklik ve hızlı üretim şartları aranmakta, bunun sonucu olarakta asgari girdiyle en fazla fayda sağlanmak istenmektedir. Derin çekme yöntemi, talaşlı imalat yöntemine göre bu noktada fazlasıyla artıları sahiptir. Diğer taraftanda günümüzde teknolojinin ilerlemesiyle derin çekme yöntemleri gelişmekte, ve kullanıcılarına daha iyi iş ekonomisi çıktıları sağlamaktadır (Özçelik, 2009: 5).

Derin çekme yönteminin kullanıldığı malzemelerin başında paslanmaz çelikler gelmektedir. Paslanmaz çelikler içlerinde östenitik ve ferritik yapı barındırdıklarından mukavemetleri ısıtılma işlemi ile yükseltilememektedir ama soğuk deformasyon yöntemiyle plastik deformasyona zorlanan paslanmaz sac malzeme pekleşir böylece sertliği ve mukavemet değerinde artış görülebilmektedir bu artış akma noktası değerini geçtiğinde ise malzeme plastik şekil değişimine uğramaktadır. Plastik deformasyon esnasında, malzeme yapısında dislokasyon hareketleri sonrası iç gerilmeler oluşur buda malzemenin mukavemetinde artış meydana getirmektedir (Dengiz, 2014: 23).

Sac metal prosesinde genellikle ince malzemeler kullanıldığından ve ürünlerin şekillerinin sabit olmamasından dolayı karşımıza birden fazla değişkenin olduğu problemler ortaya çıkmaktadır. Malzemenin hata olmadan şekil değiştirme yeteneği şekillendirilebilirliktir. Şekillendirilebilirlik tanımı süreç ve malzeme etkenleriyle direkt ilgilidir.Süreç parametrelerinden pot çemberi kuvveti, sürtünme faktörü, pres hızı ve kalıp şekilleri malzemelerin şekillendirilebilirliğindeki en fazla öneme sahip unsurlar olarak ortaya konulmaktadır (Lal vd., 2018: 4355; Kumara vd., 2018: 28030).

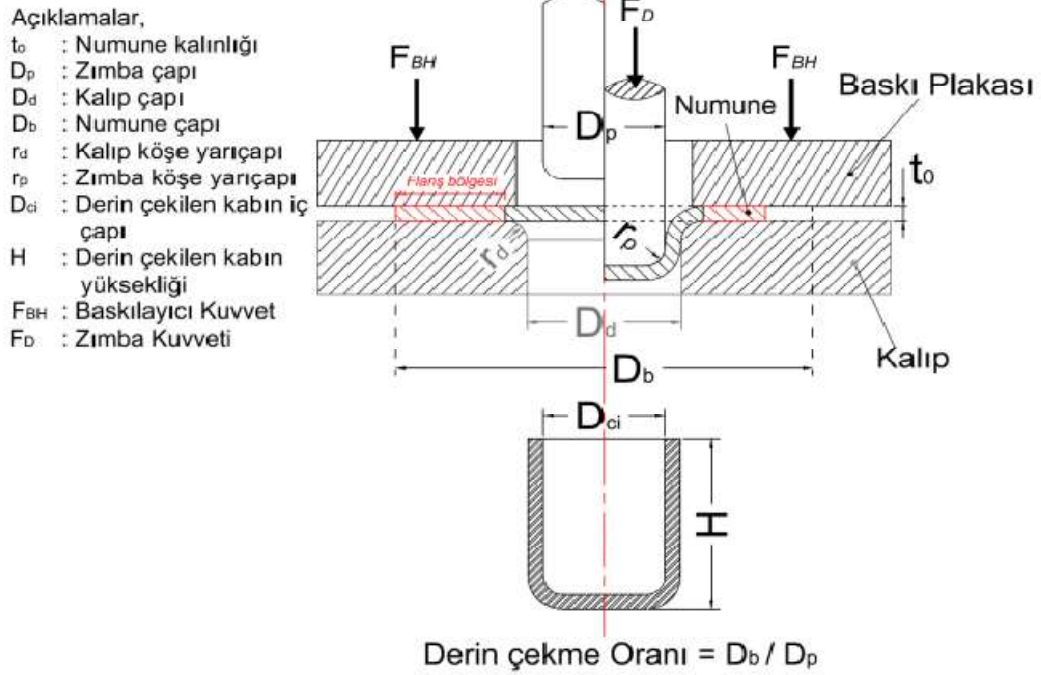
Sac şekillendirme sürecinde oluşan hatalar genelde yırtılma, şekil bozukluğu, buruşma, kırışma ve kulaklanma olarak bilinmektedir (Son vd., 2015: 151; Shi vd., 2018: 8). Mevcut olan hatalardan yırtılma hatası çoğunlukla pot çemberi kuvveti ve kalıp hızıyla, kırışma ve kulaklanma hatalarıysa pot çemberi kuvvetinden dolayı oluşmaktadır (Wang vd., 2016: 1254; Dewang vd., 2018: 6792). Şekil bozukluğu ise çoğunlukla malzemenin mekanik kabiliyeti ile ilgilidir (Özsoy vd., 2014: 3203).

Sac metal şekillendirme proseslerinde oluşan hataların tasarım sırasında bulunması ve düzeltilmesi gerekmektedir. Tasarım esnasında düzeltilemeyen hatalar ise sac parça üzerinde uygulama anında yapılma zarureti ortaya çıkarmaktadır buda hem maliyet hemde zaman israfına neden olmaktadır. Günümüz bilgisayar teknolojisi gelişmesiyle beraber artık imalat sürecinden önce çoğunlukla bilgisayar destekli mühendislik araçları tercih edilmeye başlanmaktadır. Bu gelişim sonucunda sonlu elemanlar tekniği mühendislik problemlerinin çözülmesinde en fazla tercih edilen yöntem olarak kullanılmaya başlanmıştır (Zhang vd., 2018: 117).

Sonlu elemanlar yönteminin en önemli sonucu tahmin etme kabiliyeti sağlamasıdır. Tahmin etme durumu sonlu elemanlar analizi sonunda oluşan verilerin gerçek deneysel malzemeye ne kadar yaklaştığını göstermektedir. Bu sebeple sonlu elemanlar sırasında kullandığımız süreç parametreleri ve koşulları gerçek durumlarla benzer olarak simülasyonlar gerçekleştirilmelidir. Bu işlem sonucunda tahmin kabiliyetini etkileyen parametreler prostesten ayrı olarak modelleme aşamalarından oluşan sonlu elemanlar analizi için gerekli hesaplama parametreleridir. Modelleme aşamasında hesaplama basamakları parametreleri sınır koşulları, malzemeyi temsil eden bilgiler ve malzemenin kalıcı şekil değişimini modelleyen plastisite modelinden oluşmaktadır. Bu parametrelerin saptanma durumu ve seçilme sebebi simülasyon hassasiyetini direkt ilgilendirmektedir (Dahale vd., 2018: 13295). Simülasyon doğruluğu üzerinde yapılan son çalışmalar incelendiğinde hesaplama parametrelerinin tahmin kabiliyeti üzerinde etkisi net bir şekilde görülmektedir (Ewing vd., 2002: 1871; He vd., 2019: 102).

2. DERİN ÇEKME PROSESİ

Beyaz eşya, otomotiv ve çeşitli sektörleri başta olmak üzere seri üretimin alanına giren sac metal ürünlerin büyük kısmı kalıplama yöntemi ile üretim yapılmaktadır, bu yöntemlerin başında da derin çekme yöntemi gelmektedir (Karaağaç vd., 2009: 5). Sac parçaların üretiminde, malzemenin yüzey, biçim ve boyut toleranslarını sağlayarak, istenen nitelik seviyesine ulaşabilme durumu, üreticinin; sac malzeme özellikleri, parça ve takım geometrisi ve işlem parametreleri şeklinde sınıflandırılabilir ana faktörlerin bilinmesi için önemli bulunmaktadır. Sac malzemelerin şekillendirilmesinde parçalarda, kalıp aşınması sonucu yüzey ve biçim değişimlerinin yanında parçalarda boyunlanma veya aşırı incelme, kırışma, kulaklanma ve damarlanma oluşumu, geri esnemeye dayalı açısal sapmalar, yan cidarlardaki kıvrıklaşmalar, dönme veya burulma gibi çokça rastlanan sorunların, kalıpların üretimin deneyi bir şekilde analiz edilmesi hataların önlenmesinde önemli bir parametrelerdendir. Bu durumların anında tespit edilebilmesi ve çözümünün bulunabilmesi için, söz konusu etkenlerin tümüyle ve mühendislik bilimlerine dayalı bilgiler ile doğru tespit edilmesinin önemli olduğu, bugüne kadar yapılmış çok sayıdaki çalışmayla ortaya konmaktadır. Tek eksenli çekme deneyleri, sac parçalarda oluşan pekleşme davranışının etkilerinin ve bu etkilerin bağıntılarla görülmesi amacıyla kullanılan yöntemlerdendir. Fakat, sac şekillendirme olayında gerilme durumunun genellikle iki eksenli olması sebebiyle, malzeme davranışının ortaya konmasında bu iki eksenli gerilme durumunun olduğu deneylerin kullanılmasının analizlerde gerçeğe yakın sonuçların bulunabileceğini, farklı araştırmacılar tarafından ortaya konulmuştur (Erhu y vd., 2008: 289). Derin çekme işleminde, zımbanın hareketi sebebiyle parçanın tabanında iki eksenli çekme gerilmesi oluşmaktadır (Sümer, 2018: 5). Derin çekme sırasında, silindirik malzeme radyal çeki gerilmesi ve teğetsel bası gerilmesi etkisine uğrar. Bunun yanında malzemedeki buruşmayı önlemek için baskı plakası kuvveti uygulanmaktadır. Düz sac parçaların çekme kalıbı yardımıyla elde edilmesi sırasında, birden fazla operasyon ile oluşturuluyorsa, birbirini takip eden çok sayıda çekme işleminden oluşan bu imal usulüne derin çekme adı verilmektedir. Derin çekme işlemi basma, eğme, bükme gibi farklı biçimlendirme işlemlerinin bir araya gelmesiyle oluşmaktadır (Gürün, 2008: 35). Derin çekme operasyonunun temel terimleri Şekil 2.1’de gösterilmiş olup, bu şekillendirme işleminde ana amaç derin çekme mesafesini artırmaktır. Ancak derin çekme mesafesini arttırmak için malzeme çapı sınırsız olarak arttırılmamaktadır. Kullanılacak maksimum malzeme çapını derin çekme oranı ile belirlenmekte ve D_b / D_p formülü ile ifade edilmektedir (Erdem ve Kaftanoğlu, 2016: 82).

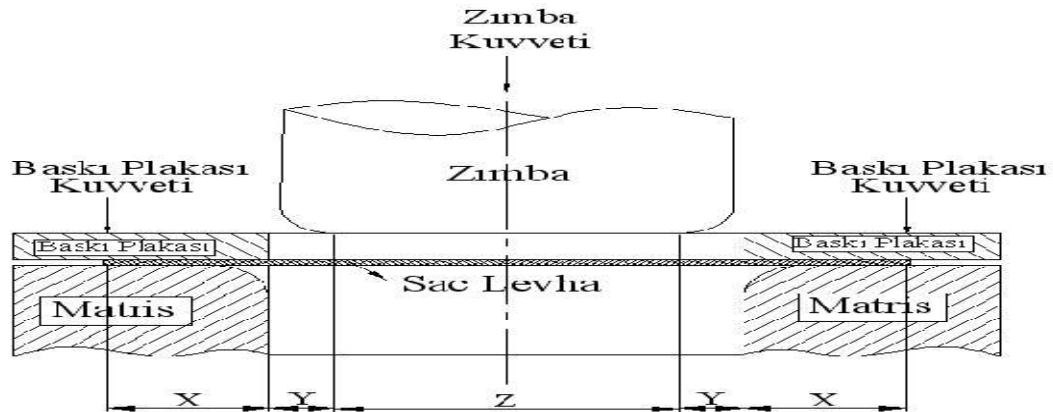


Şekil 2.1. Derin çekme terimleri ve açıklamalar

Kaynak: (Erdem ve Kaftanoğlu, 2016: 79)

2.1. Derin Çekme İşleminin Mekanikliği

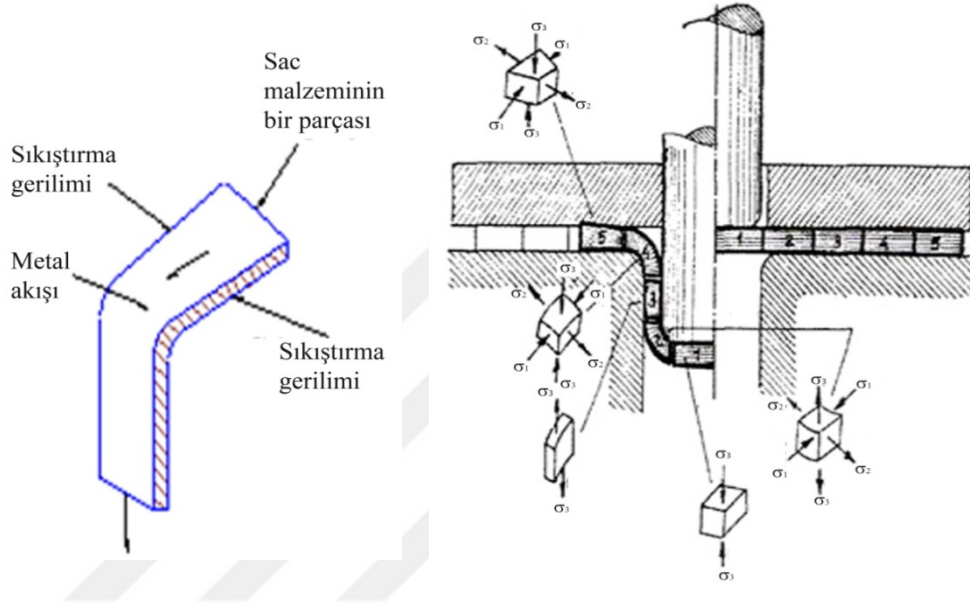
Çekme işleminde, sac malzeme matris (kalıp) üstüne yerleştirildikten sonra baskı plakası yardımıyla sabitlenmektedir. Sac malzeme, zımbanın uyguladığı kuvvetle beraber matris içersinde ilerler ve homojen bir şekilde zımbanın etrafına sarılması sağlanmaktadır. Bu proses işlemi sonucunda, matris içersinde ilerleyen sac levhanın şekillenmesi sağlanmaktadır. Çekme sacının X, Y ve Z olmak üzere üç ayrı kısma ayrılmış gösterimi Şekil 2.2’de bulunmaktadır.



Şekil 2.2. Çekme kalıbındaki işlev bölgeleri

Kaynak: (Erdoğan, 2017: 62)

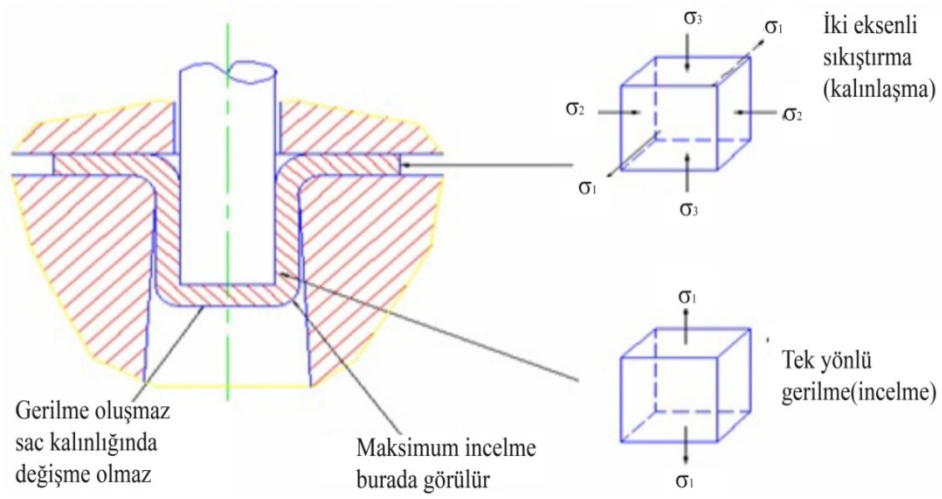
X ile gösterilen kısım levhanın matrisle temas bölgesidir. Y ile gösterilen kısımda çekme işlemi başladığında zımba ve matrisle temas bulunmamaktadır. Z ile gösterilen kısım ise zımbanın alt yüzeyiyle temas etmektedir. Derin çekme prosesinde sac levhanın baskı plakası ile temas ettiği yüzde sıkıştırmadan dolayı basma gerilmesi oluşmakta ve matrisin kalıp kısmında sac levha şekillenirken, çekme kuvvetinin etkisiyle sac levhada incelmeye yani metal akışı meydana gelmektedir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Derin çekmenin mekaniği

Kaynak: (Erdoğan, 2017: 63)

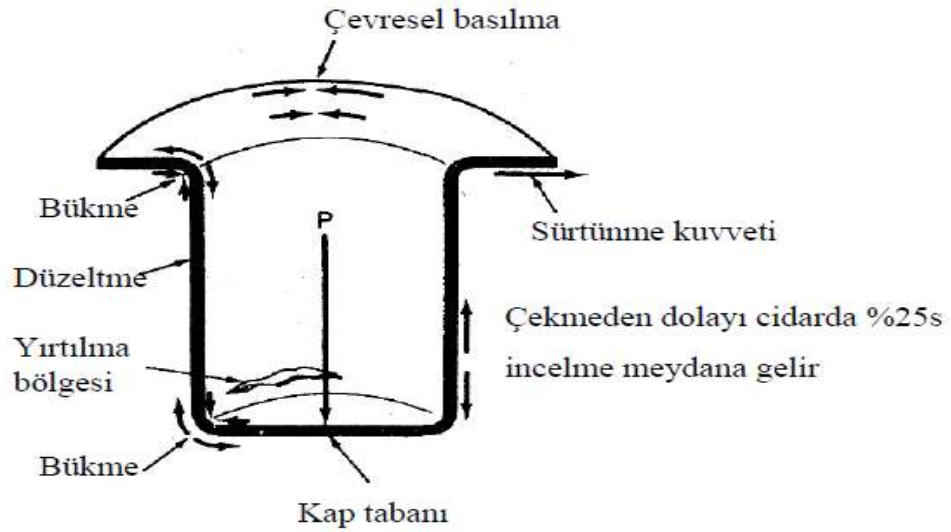
Derin çekme prosesi esnasında boylamsal bölgelerde yani zımbanın köşe kavis bölgelerinde tek yönlü gerilmelerin etkisiyle sac levhada en yüksek incelmeye görülmekte, zımba tabanında ise sac kalınlığında bir değişim olmamakta, sac levhanın baskı plakası ile bastırıldığı bölgede ise iki eksenli sıkıştırmadan dolayı sac levhanın kalınlığında artış meydana gelmektedir (Şekil 2.4)(Erdoğan, 2017: 45).



Şekil 2.4. Derin çekme esnasında parçada oluşan gerilmeler

Kaynak: (Erdoğan, 2017: 64).

Silindirik kapların derin çekilmesi esnasında çekme sacına etki eden kuvvetler ve yırtılma bölgeleri Şekil 2.5’de görülmektedir (Ulu, 2008: 50).



Şekil 2.5. Çekme işlemi esnasında çekme sacına etki eden kuvvetler ve yırtılma

Kaynak: (Ulu, 2008: 52)

2.2. Derin Çekme Kabiliyetini Etkileyen Faktörler

Derin çekme kabiliyetini etkileyen faktörler üç grupta toplanabilir:

1. Malzeme özelliklerinin seçimi
2. Kalıp geometrisi
3. Proses(İşlem) koşulları

2.2.1. Malzeme Özelliklerinin Etkisi

Şekillendirilecek ürünün kalın olması, daha fazla incelmeye olanak sağlayacağından çekme oranını arttırıcı yönde etkide bulunmaktadır. Malzemeye şekil vermede bir önemli faktörde tane yapısının ince oluşu, mümkün mertebe tek fazlı oluşu derin çekme kabiliyetini olumlu yönde etkileyen faktörlerdendir. Derin çekme işleminde kullanılan düşük karbonlu çeliklerde kimyasal bileşimin önemli etkisi vardır. Bu çeliklerde P, S, N, Sb, As, Cr, Si gibi elementler derin çekme kabiliyetini azaltıcı yönde etki etmektedir. Deformasyon (Şekil değiştirme) sertleşmesi üssü (n) ve deformasyon hızı duyarlılığı üssü (m) değerlerinin yüksek olması derin çekme işlemine olumlu etkiler verirken etkinlikleri fazla olmamaktadır (Sümer, 2018). Derin çekme prosesinde genellikle sac malzeme kullanılmasına rağmen yerine göre paslanmaz, bakır alaşımlı malzemeler ve alüminyum malzemelerde kullanılmaktadır. Derin çekme prosesinde üretim yapılan türlerden biri olan paslanmaz çelikler, korozyon dirençlerinin iyi olması sebebiyle beyaz eşya ve gıda sektörleri başta olmak üzere kapsamlı bir kullanım yeri bulunmaktadır. Paslanmaz çelik malzemelerin özellikleri ve kullanım alanları ile ilgili bilgiler Tablo 2.1’de gösterilmektedir (Mutlu, 2012: 41).

Tablo 2.1. Paslanmaz Sac Kullanım Alanları

SINIFLANDIRMA	ÖZELLİKLERİ	KULLANIM ALANLARI
304	Paslanmaz çeliğin temel çeşididir. 400 °C’ ye kadar yüksek oksidasyon sağlar. Mekanik direnç ve sürtünme mukavemeti çok iyidir. 304 iyi korozyon direnci, sıcaklığa direnci, düşük sıcaklık derecelerindeki mukavemeti ve mekanik özellikleri ile bilinmektedir.	Mutfak eşyaları, evye, dahili borularda, sıcak su kazanlarında, banyo küvetleri, kazanlar, otomobil parçaları (silecek, susturucu vb.) tıbbi aletler, inşaat malzemelerinde kullanılmaktadır.
304L	304L, 304 çeliğin düşük karbonlu versiyonudur. Normal koşullarda korozyon direnci 304’le aynıdır. Gerilim giderme ve kaynak sonrası taneler arası korozyona karşı direnci mükemmeldir.	Kimya sanayinde kullanılan makine ve ekipmanlarda, yüksek tanelerarası korozyon direncine ihtiyaç duyulan kömür ve ısıtım işlem uygulaması zor olan parçalarda kullanılmaktadır.
309	Bakır ilavesi ile anti-mikrobik özelliğe ve iyi çekilebilirliğe sahiptir. Hijyenik ortam ihtiyaç duyulan derin çekme ürünlerde kullanışlıdır.	Termos, mutfak evyeleri, çaydanlık, yiyecek servis gruplarında, kapı tokmaklarında kullanılmaktadır.
310	1100 °C’a kadar sıcaklıklarda oksidasyon mukavemeti yüksektir.	Fırın parçaları ve yüksek sıcaklıklara dayanıklı ekipmanlar, kimya, petro kimya endüstrisi.
316	600°C’a kadar sıcaklıklara dayanıklıdır. Mekaniksel kopma ve bütülme mukavemeti oldukça iyidir. Bünyesindeki molibdenen dolayı oksidasyon ve asitlere dayanıklıdır.	Kimya, petro kimya endüstrisi, buhar kazanları, ısıya mukavim eşanjörler, çeşitli kazan uygulamaları.
409	Ti ilavesi ile iyi kaynaklanabilirlik ve çekilebilme özellikleri sağlamaktadır.	Otomobil, Egzost boruları ılık su teçhizatlarında kullanılmaktadır.
430	İyi yüzey görünümü sağlar. Nikel içermediğinden müknatıslanabilmektedir.	Dekoratif amaçlı kullanımlar, parlak yüzey uygulamalarında kullanılmaktadır.
430J1L	Mo, Yi ve Nb ilavesi iyi korozyon direnci ve yüksek sıcaklık oksidasyon direnci sağlamaktadır.	Çamaşır makinesi tamburları, otomobil egzozları, elektrik aletleri parçalarında kullanılmaktadır.
630	Çökeltme sertleştirilmesi(Yaşlandırma) paslanmaz çelik grubuna girer. İçerisinde krom ve nikel olan östenitik ve martensitik yapı bulunmaktadır.	Bu tip paslanmaz çelik, pompa ve vana şaftlarında, mutfak aletleri üretimi ve kimyasal tesislerde yaygın olarak tercih edilmektedir.

Kaynak: (Mutlu, 2012: 35)

2.2.2. Kalıp Geometrisinin Etkisi

Sacın şekillendirme prosesinde kalıp ve zımba radüsü en önemli etkenlerdendir. Zımba üzerindeki ufak bir radüs, sacın üzerinde keskin bölgelerin kolayca elde edilmesine olanak sağlamaktadır (Esener, 2006). Zımba ve kalıpta derin çekme işlemini etkileyen önemli parametreler; kalıp eğrilik yarıçapı (R_k), zımba eğrilik yarıçapı (R_z) ve zımba ile kalıp arasındaki boşluk (e) mesafesidir. Sac malzemenin kalıp içine girerken temas ettiği ilk yer kalıp eğrilik yarıçapıdır ve malzemenin şekillenmesinde önemli bir rolü bulunmaktadır. Bu değer sac malzemenin kalıp içinde kolayca hareket etmesine olanak sağlamalıdır. Kalıp eğrilik çapının arması derin çekme kuvvetini azaltmakta ve derin çekme oranını önemli miktarda artırmaktadır. Bununla birlikte bu değerın aşırı derecede artırılması kalıbın sıkıştırma etkisini azaltmakta ve sac malzeme üzerinde hasar riski artmaktadır (Demiray, 2006: 57). Derin çekme prosesinde tespiti için;

Çelik için, birinci kademedede;

$$R_k = 0,8\sqrt{(d_o - d_z)t_o} \quad (2.1)$$

Alüminyum ve alaşımlarının mekanik özellikleri daha zayıf olduğundan R_k değeri çeliğe kıyasla % 10 kadar büyük alınabilmektedir.

$$R_k = 0,9\sqrt{(d_o - d_z)t_o} \quad (2.2)$$

Bağıntıları kullanılmaktadır. Burada t_o malzemenin orijinal kalınlığıdır. İkinci ve daha sonraki yeniden çekme işlemlerinde;

$$R_k = \frac{d(n-1) - d_n}{2} \quad (2.3)$$

Bağıntısından kalıp eğrilik yarıçapı tayin edilir. Burada d_n parçanın son çapı $d_{(n-1)}$ ise parçanın bir önceki yeniden derin çekme işlemindeki çapıdır.

Sacın zımba tarafından hasara uğratılmaması için zımba kenarı uygun şekilde yuvarlatılması gerekmektedir.

$$R_z = (5 \text{ ile } 10) t_o \quad (2.4)$$

Alınabilir.

Kalıp boşluk mesafesi için ampirik denklemlerin kullanılması tavsiye edilmektedir;

$$\text{Çelik için } e = t_o + 0,07\sqrt{10t_o} \quad (2.5)$$

$$\text{Alüminyum için } e = t_o + 0,02\sqrt{10t_o} \quad (2.6)$$

$$\text{Isıya dayanıklı alaşımlar için } e = t_0 + 0,20\sqrt{10t_0} \quad (2.7)$$

$$\text{Diğer demir dışı malzemeler için } e = t_0 + 0,04\sqrt{10t_0} \quad (2.8)$$

Bağıntılarından yararlanılabilmektedir (Erdoğan, 2017: 40).

2.2.3. Proses Koşullarının Etkisi

Zimba yapılandırmaları, kalıp ürün boşlukları, pot çemberi kuvveti ve süzdürme çubuğu gibi şekillendirme prosesinde etkili olan unsurlar, sac malzemenin biçimlendirme işleminin sınırlarını belirlediği için önemli parametrelerdendir (Özçelik, 2008: 64).

2.2.3.1. Çekme Hızı

Sac malzemelerin çekme hızları sıklıkla deneysel sonuçlara göre oluşturulmaktadır. Çekme prosesinde malzemenin, şekildeğişimine uğrayabilmesi için belirli bir zamana ihtiyacı bulunmaktadır. Aksi durumda malzemede hasar oluşabilmektedir. Çekme hızı çekilecek sacın malzemesine, kalınlığına ve sürtünme değerine göre belirlenebilmektedir (Tablo 2.2)(Özdilli, 2018: 49).

Tablo 2.2. Çekme hızları [mm/dak]

Malzeme	Tek Etkili	Çift Etkili
Alüminyum	175	100
Pirinç	200	100
Bakır	150	85
Çelik	55	35~55
Çinko	150	40

Kaynak: (Özdilli, 2018: 49)

2.2.3.2. Çekme kuvveti

Çekme kuvveti, çekilen malzemenin sac kalınlığına ve cinsine göre değişmektedir. Bununla birlikte çekme kuvvetinin hesaplanmasında; baskı plakası kuvveti, zimba ve kalıp radüsleri, yağlama ve çekme boşluğu gibi parametreler etkili olmaktadır. Çekme kuvvetini hesaplanmasında aşağıdaki formül kullanılmaktadır (Koçar, 2014: 52).

$$P_z = \pi * d * s * m * \sigma \quad (2.9)$$

Burada;

d : Zimba çapı (mm),

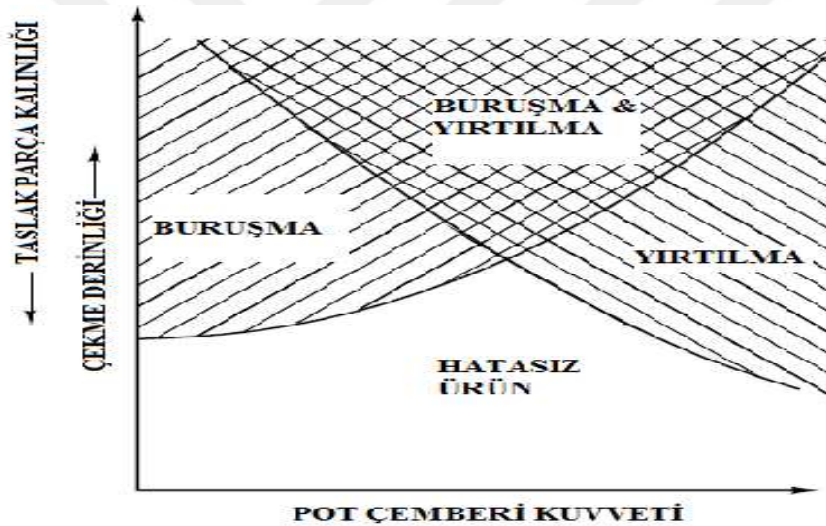
s :Sac malzeme kalınlığı (mm)

m :Katsayı,

σ :Sac malzemenin kopma gerilmesi (N/mm^2)

2.2.3.3. Pot Çemberi(Baskı Plakası) Kuvveti

Pot çemberi ile kalıp arasına konulan sac malzeme pot çemberi tarafından uygulanan kuvvet ile sıkıştırılmaktadır. Pot çemberi bu kuvveti; yay kuvveti, hidrolik ya da pnömatik sistemler ile sağlanmaktadır. Pot çemberi kuvvetinin uygun seçilmesi sac malzemede oluşabilecek kırışma ve yırtılma hatalarını ortadan kaldırmaktadır. Pot çemberi kuvvet değerinin düşük veya yüksek seçimi malzemede kırışma ve yırtılmalara sebep olmaktadır (Şekil 2.6)(Yıldız, 2017: 42).



Şekil 2.6. Pot çemberi kuvvetinin, yırtılma ve buruşma hatalarının etkisi

Kaynak: (Yıldız, 2017: 42)

Pot çemberi kuvveti farklı malzemelere göre değişiklik göstermektedir. Pot çemberine uygulanan kuvvet, etki ettiği yüzey alanın değerine bağlı olarak basınç birimi şeklinde ifade edilmektedir. Tablo 2.3’de bazı malzemelerin ortalama olarak basınç değerleri bulunmaktadır (Suchy, 2006: 711).

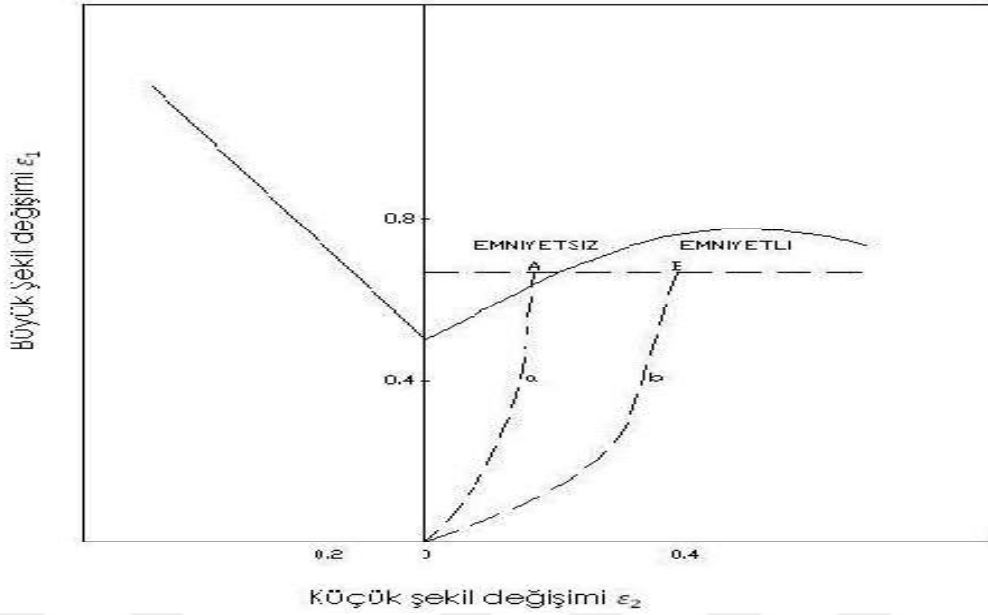
Tablo 2.3. Bazı malzemelerin pot çemberi basınç kuvvetleri

Malzeme Türü	Basınç Değeri (MPa)
Derin çekme çeliği	2.0–3.0
Düşük karbonlu çelik	3.5
Alüminyum ve alaşımları	0.85–1.40
Alüminyum alaşımları, özel	3.5
Paslanmaz Çelik, genel	2.0–5.0
Paslanmaz Çelik, östenik	7.0
Bakır	1.25–1.75
Pirinç	1.40–2.0

Kaynak: (Suchy, 2006: 711)

2.2.3.4. Yağlama

Çekme prosesinde yağlama; sac malzeme, baskı plakası ve kalıp arasında sürtünme kuvvetini en aza indirerek çekme prosesinin daha düşük bir kuvvetle yapılmasını sağlayarak, aşınmanın azalmasını ve dolayısıyla elde edilmek istenen ürünün kaliteli olmasına olanak tanımaktadır (Göl, 2005: 49). Yağlayıcı malzeme gerekli viskozite değerinde ve yağ filmi dayanımında değilse veya içersinde korozif özellikler bulunduruyorsa sac levhada, çatlak, çizik veya olumsuz yüzey oluşumları gözlenebilmektedir. Bununla birlikte yağlama deformasyon oranının iyileşmesine katkı sağlamaktadır. Şekil 2.7’de görüldüğü gibi bir malzemede yağlayıcı kullanılarak deformasyon bölgesini “a” ile gösterilen emniyetsiz bölgeden “b” ile gösterilen emniyetli bölgeye taşınabilmektedir (Gündü, 2000: 56).

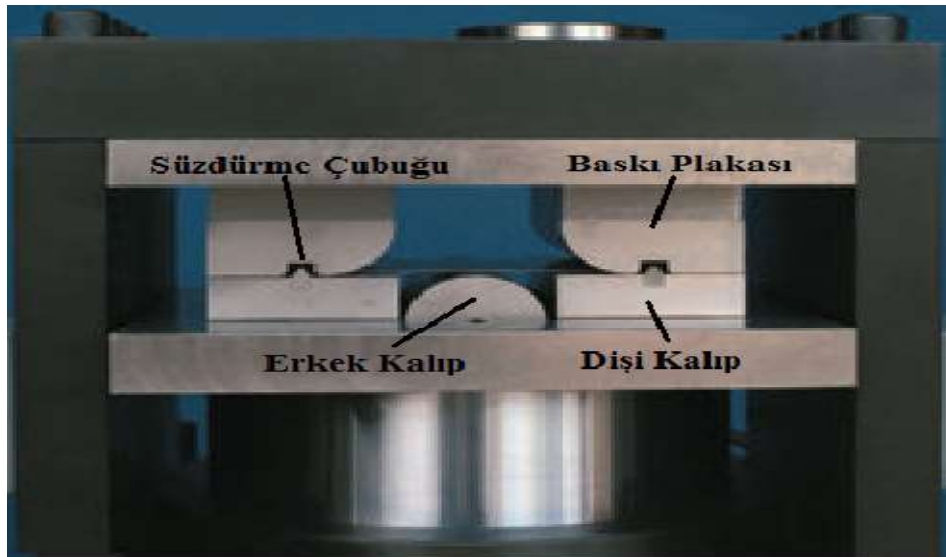


Şekil 2.7. Şekillendirme işleminde yağlamanın etkisi

Kaynak: (Gündü, 2000: 56)

2.2.3.5. Süzdürme Çubuğu

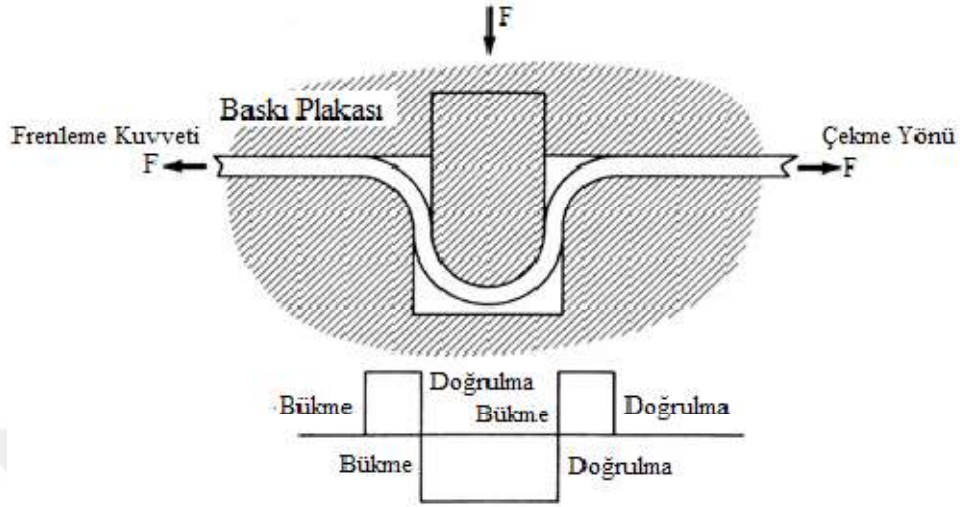
Süzdürme çubukları, sac biçimlendirme prosesini olumsuz olarak etkileyen buruşma, yırtılma ve geri esneme gibi hataları önlemek veya en aza düşürmek amacıyla kalıp üzerine yerleştirilmektedir. Süzdürme çubukları, aynı zamanda sac akışı üzerinde frenleme (gergi) kuvveti oluşturarak kontrol mekanizması oluşturmaktadır. Sac biçimlendirme işleminde kullanılan örnek bir süzdürme çubuğu gösterimi Şekil 2.8’dir (İriç vd., 2013: 202).



Şekil 2.8. Süzdürme çubuğunun kalıp içerisinde gösterimi

Kaynak: (İriç vd., 2013: 203)

Süzdürme çubukları, sac malzemelerin şekil değişimi sırasında oluşan bükme ve doğrulma işlem akışına karşı zıt yönlü frenleme kuvveti sağlamaktadır (Şekil 2.9)(İriç vd., 2013: 203).



Şekil 2.9. Akan sac malzemede süzdürme çubuğunda oluşan frenleme kuvveti

Kaynak: (İriç vd., 2013: 203)

2.3. Derin Çekilme İşleminde Görülen Hatalar

Sac malzemelerin form verme işleminde görülen önemli kusurlar; çatlama, boyun verme etkisinden ötürü malzeme dayanımının azalması, buruşma, yırtılma ve geri esneme olarak sıralanabilmektedir. Derin Çekme prosesinde çatlama bölgesi genellikle zımba radüsünün hemen üzerindedir. Kalıp veya zımba radüsünün yeterli olmaması, malzeme özelliklerinin iyi belirlenememesi, derin çekme oranının yüksek seçilmesi, pot çemberi basıncının yüksek olması, çekme boşluğu değerinin küçük seçilmesiyle ve doğru yağlama türünün kullanılmaması sebebiyle çatlama kusuru oluşabilmektedir (Şen, 2015: 23). Derin çekme işleminde meydana gelen hatalar şunlardır.

Kulaklanma; Derin çekme işleminin, flanşlı kalıplar dışındaki kalıplarda yapılmasında görülen kusurlardandır. Çekme işlemi sırasında sac malzemede hadde yönünde uzama oluşmaktadır.

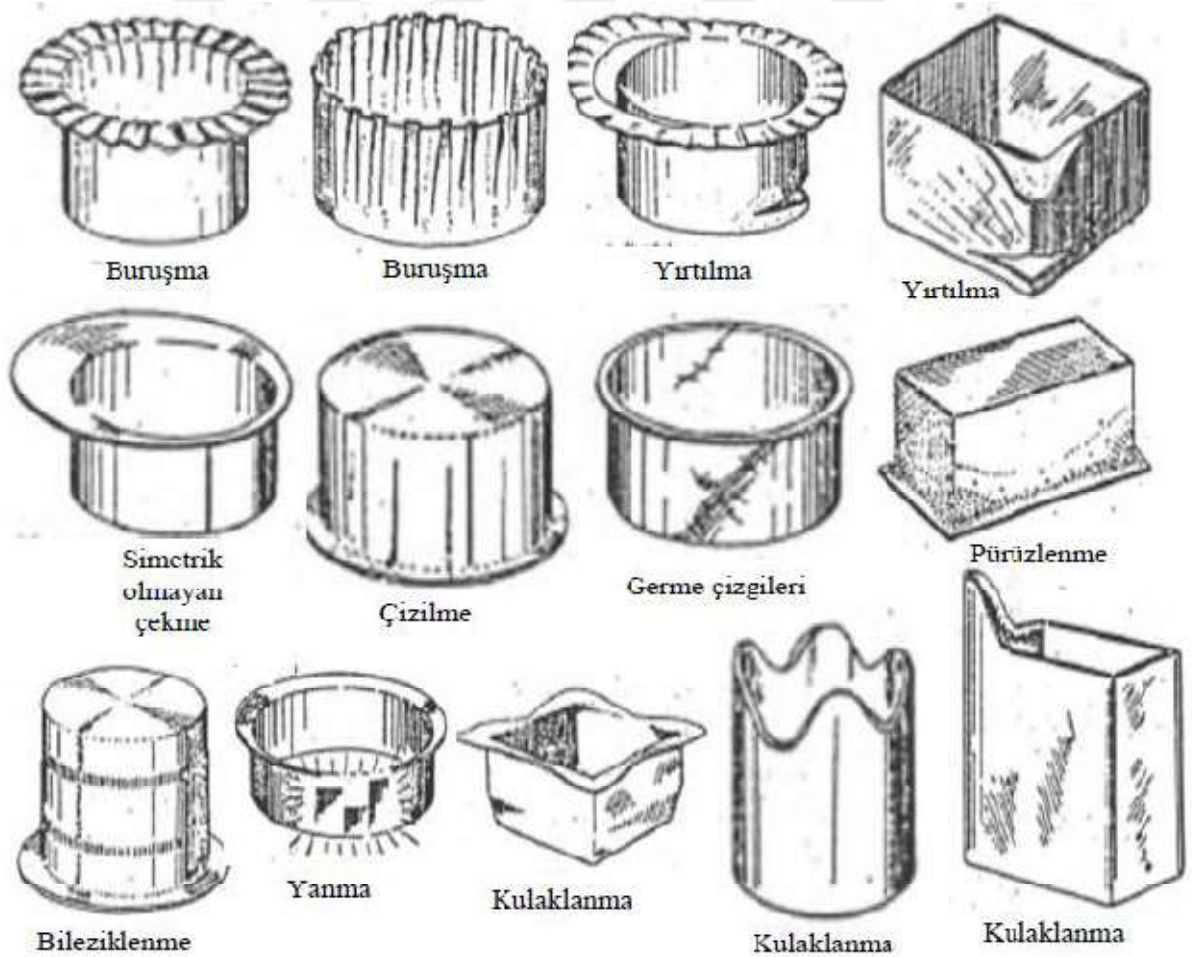
Çizilme ve Çentiklenme; Çekme işlemi sırasında sac levha, kalıba sürtünür. Sürtünmenin etkisiyle sac yüzeyinde zedelenme veya çentikleme oluşabilmektedir.

Germe Çizgileri; Çekme işlemi bittikten sonra ürün yüzeyinde çizikler oluşmaktadır. Bu çiziklere germe çizgileri denilmektedir.

Renk değişimi (Yanma); Yüksek parlatma gerektiren proseslerde meydana gelen kusurlardandır. Bu tip kusurların oluşmaması için tek taraflı kalıp boşluğu artırılabilir.

Buruşma; Çekme işlemi sırasında sac malzemede flanş veya gövde bölgelerinde buruşmalar oluşabilmektedir. Buruşma olayına malzeme yığılmasıda denmekte ve çekilen malzemenin yırtılarak hasara uğramasına sebebiyet vermektedir. Malzemede oluşabilecek buruşmayı önlemek için tek taraflı kalıp boşluğu değeri ve pot çemberi kuvvetinin en optimum değeri seçilmesi gerekmektedir. Zımba ucu ve kalıp ağzı radüsleri, buruşmayı engelleyecek şekilde tasarlanmalıdır.

Geri esneme; Derin çekme işleminden sonra sac malzeme üzerinden çekme kuvvetinin kalkmasıyla sacın eski geometrik şekline dönmek için gösterdiği direnç olarak tanımlanmaktadır (Alparslan, 2008: 55). Şekil 2.10’da derin çekme işleminde görülen kusurlar gösterilmektedir.



Şekil 2.10. Derin çekme işleminde görülen çekme kusurlar

Kaynak: (Şen, 2015: 25)

2.4. Derin Çekme İşlemi

Ütüleme yöntemiyle (İncelterek Çekme) malzemeye ardışık olarak derin çekme işlemi uygulanmaktadır. Bu işlemde kabın taban kalınlığı sabit kalır, yan duvarların kalınlığı incelterek derinlik artırılmaktadır. Şekil 2.11’de ütüleme yöntemi uygulanarak elde edilmiş bir kap örneği bulunmaktadır (Köksal ve Demirer, 2012: 62).



Şekil 2.11. Derin çekme terimleri ve açıklamalar

Kaynak: (Köksal ve Demirer, 2012: 62)

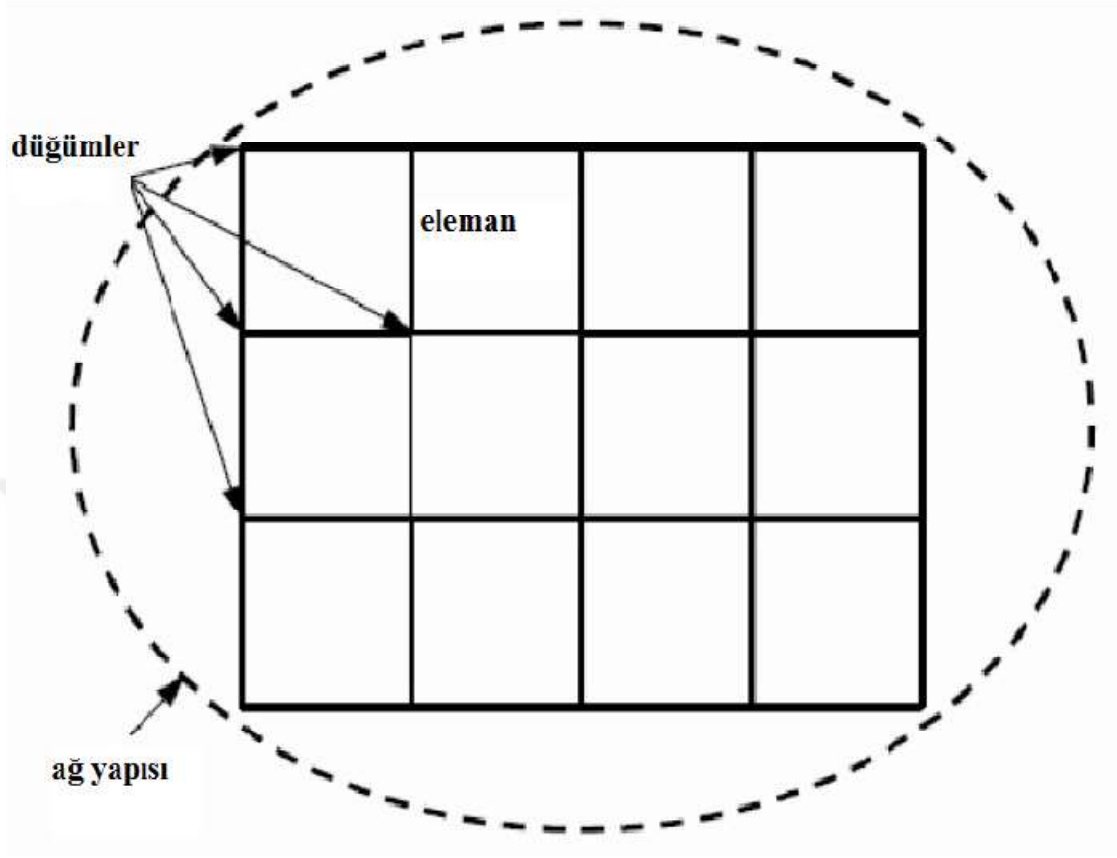
3. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

İnsanlar çevresinde gelişen olayları veya karşılarına çıkan problemleri genellikle kolayca algılayıp direkt çözememektedirler. Bu sebeple karmaşık problemler, bilinen ya da algılanması daha basit alt problemlere ayrıştırılarak daha bilinir durumlara getirilmektedir. Alt basamaklara ayrılan problemler birleştirilerek gerçek problemin çözümü gerçekleştirilebilmektedir. Örneğin; gerilme analizi hakkında çalışma yapan kişiler, bu problemi basit kiriş, plak, silindir v.b şekli bilinen geometrilerle sınırlamaktadırlar. Bu sınırlamalar sonucu elde edilen veriler genellikle problemin yaklaşık çözümünü ve çoğunlukla belirlenen bir katsayıyla düzeltilerek gerçek elemanın hassasiyetine yaklaşılmak istenmektedir. Mühendislik alanındaki problemlerin sabit olmaması ve değişkenlerin çok fazla olması nedeniyle problemlerin tam olarak çözmek yerine, belli sınırlar çizilerek yaklaşık çözümler tercih edilmektedir. Hatta bazı problemlerde tam çözüm olanaksız olduğu kabulü yapılarak yaklaşık olarak bulunan sonucun tek yol olduğu kabul edilmektedir (Sarıkanat, 2007: 85).

Sonlu elemanlar yöntemi; karmaşık bulunan problemlerin daha basit alt basamaklara ayrılarak ve her basamaktaki problemlerinde kendi içinde çözümlemesinin yapılması sonucunda gerçek çözümün ortaya çıktığı bir çözüm süreci olarak tanımlanmaktadır (Yıldız ve Kırılı, 2003: 320). Bu yöntemin üç temel özelliği bulunmaktadır. İlk olarak, geometrik bakımından sabit olmayan çözüm alanları sonlu elemanlar yöntemiyle basit alt kısımlara ayrılmaktadır. Ardından her kısımdaki elemanın, sürekli fonksiyonları, cebirsel polinomları liner kombinasyonu bakımından oluşturulabileceği varsayılmaktadır. Son olarakta istenilen hassasiyette sonuçların bulunabilmesi için yeterli miktarda düğüm noktalarının oluşturulması gerekmektedir (Mamalis vd., 1997: 54). Simülasyonların çözümünde önemli diğer bir etken ise gerçek geometrileri temsil eden elemanların boyutunun belirlenmesidir çünkü gerçek sistemi temsil için kullanılan eleman miktarının fazlalaşması çözülecek diferansiyel denklem miktarını da fazlalaştıracığından bu durum beraberinde çözüm süresinde uzamasına yol açmaktadır. Yapılan çalışmalara bakıldığında eleman boyutunun azaltılması çözüm hassasiyeti bakımından çoğunlukla olumlu sonuçlar ortaya çıkarmaktadır (Parthasarathy ve Kodiyalam, 1991: 315; Crawford vd., 2003: 436).

Sonlu elemanlar metodunda çözüm yapılacak eleman, sonlu miktarda ideal elemanlara ayrılmaktadır. Bu elemanların birbirleriyle arasındaki bağlantı düğüm noktaları vasıtasıyla sağlanmaktadır. Problemin çözümü mevcut olan düğümlerin kendi içersinde

tanımlanmaktadır. Sonlu miktarda oluşan bu eleman ve düğümler, ağ yapısı sistemini (mesh) Şekil 3.1’de gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Sonlu elemanlar metodu ile analiz yapılan elemanın temsili ağ yapısının gösterimi

Kaynak: (Yalçın, 2010: 45)

Sonlu elemanlarda kullanılan ağ yapısı, gerçek elamanın özelliklerinde bulunma ihtimali olan rijit (şekil değiştirmeyen) olmayı veya rijit olmama (şekil değiştiren) durumunu bizlere yansıtabilmektedir. Rijit özelliğe sahip olan elemanların ağ yapısı, olmayana göre farklılık göstermektedir. Rijit elemanın ağ yapısı, sadece malzemenin şekil özelliğini bize göstermektedir. Rijit olmayan elemanların ağ yapısı ise malzemenin yalnız şekli özelliğini değil bunun yanında malzeme özelliklerini de temsil etmektedir. Ağ yapısında bulunan her bir sonlu eleman ve düğümler birer fonksiyonu ifade ettiğinden bu fonksiyonların sonucu iterasyonlar yardımıyla bulunmaktadır. Ağ yapısında bulunan elemanların şekli ne ölçüde küçük yapılırsa eleman sayısında bununla beraber artacaktır buda problemin bulunması için yapılan iterasyon sayısını artıracaktır. İterasyon sayısının artmasıda çözümün hassasiyetini artıracaktır. Fakat işlem süresini uzatmaktadır. Eğer ağ yapısında bulunan elemanların şekli büyütülürse ağ yapısında bulunan eleman sayısında azalmaktadır. Bu işlemin sonucu olarakta problemin sonuçlanması için yapılması gereken iterasyon miktarı ve bulunan

çözümün hassasiyeti azalmaktadır. İşlem süresi de iterasyon miktarıyla orantılı olduğu için bu sürede düşmektedir. Sonlu elemanlar metoduyla oluşturulan analizlerde ağ yapısında bulunan elemanların miktarı en uygun seviyede olması sağlanarak makul bir sürede ve iyi bir hassasiyete sahip veriler bulunmak istenmektedir (Yıldız, 2017: 46).

Eleman bakımından diğer önemli durum ise elemanın çözümünü etkileyen eleman formülasyonunun tespit edilmesidir. Kabuk elemanlar, çoğunlukla Hughes-Liu (HL), Belytschko-Tsay (BT) ve Tam integrasyonlu eleman formülasyonlarının birinin seçilmesiyle temsil edilmektedirler (Elmarakbi vd., 2009: 2387). Bu formülasyonlardan ilk olarak ortaya çıkan 1981 yılındaki Hughes-Liudur (Hughes vd., 1981: 340). HL formasyonunlu elemanlarda, elemanın yapı olarak rijit hareketlerde şekil değişimi üretmediğinden dolayı çok fazla uygulamada sonlu olarak gerinim hesabı yapılabilir. Bunun yanında sade yapısı nedeniyle hesaplama avantajı da sağlamakta ve sonlu olarak enine kayma gerinimlerini de kendi içinde bulundurmaktadır. Bunun yanında kabuk elemanların kalınlık yönünde gerçekleştirilecek inceltme hesabının yapılabilmesine fırsat sağlamaktadır. Belytschko-Tsay kabuk eleman yönteminin formülasyonunda ilk olarak 1984 yılında ortaya çıkmıştır (Belytschko vd., 1984: 227). Belytschko-Tsay yöntemi kullanımı, Hughes-Liu kabuk eleman yöntemine göre daha avantajlı bulunmaktadır. Bunun başlıca sebebi BT kabuk eleman yönteminin, HL kabuk elemanlara nazaran daha az miktarda interpolasyona yani işleme ihtiyaç duyması ve bununla çözüm süresini makul düzeyde tutmakta böylece hesaplama maliyetini azaltmaktadır. Örnek verecek olursak 5 integrasyon noktalı bir kabuk eleman çözümünde HL kabuk yöntemi 4050 matematiksel işleme gereksinim duyarken aynı çözüm için BL formülasyonu 725 matematiksel işleme gereksinim duymaktadır (Ls-Dyna, 1998: 30). Tam integrasyonlu kabuk elemanları yönteminde ise, elemandaki kilitleme ile ilgili problemleri kontrol etmek ve düzlemsel açıdan eğme davranışını fazlaştırmak adına gerinim interpolasyonu kabulü yapılmaktadır. Yerel (Lokal) koordinat sistemi tercih edilmektedir. Bu koordinat sisteminin kullanılmasının sebebi malzemenin rijit hareketleriyle ilgili bilgi sahibi olabilmek için malzemeyle beraber dönmektedir. Yerel koordinat sistemi ile BT kabuk eleman sistemi birbirine benzemektedir. Tam integrasyonlu kabuk yöntemi ile BT kabuk yöntemine benzer şekilde hızlı çözüm elde edilebilen bir formülasyondur. Kabuk elemanlar metodu, düzlem gerilmelerinde oluşan problemlerin modellenmesiyle ilgilidirler. Sac metal biçimlendirme sürecinde malzemedeki inceltme fazlaca önemli bir etken olduğu için kalınlık yönündeki gerilme dağılımına gereksinim duyulmaktadır. Kabuk eleman yöntemlerinde

kalınlık yönü bakımından gerilme değerleri integrasyon nokta sayısı vasıtasıyla bulunup hesaplanmaktadır (Mete, 2007: 69).

Sonlu elemanlar analizinde hesaplama parametreleri bakımından önemli bir kriterde seçili elemanın plastik davranışını modellemeyi sağlayan plastisite modelinin seçimidir. Plastisite modellerinin çözüm basamakları birbirinden farklı olduğu için çözüm süresini etkilenmektedir. Plastisite modelleri çoğunlukla kendi içlerinde yapmış oldukları kabuller ölçüsünde gruplandırılmaktadırlar. Bu gruplar, izotropik malzeme-izotropik pekleşme, anizotropik malzeme-izotropik pekleşme ve anizotropik malzeme-kinematik pekleşme olarak isimlendirilmektedir. Yapılan çalışma kapsamında izotropik malzeme-izotropik pekleşme grubundan Holloman denklemi (Holloman, 1945: 279). Anizotropik malzeme-izotropik pekleşme grubundan Hill-48 (Hill, 1948: 290) ve Barlat-89 (Barlat ve Lian, 1989: 55) plastisite modelleri ve anizotropik malzeme-kinematik pekleşme grubundan Yoshida-Uemori (Yoshida ve Uemori, 2002: 677). Plastisite modelleri bulunmaktadır.

Sonlu elemanlar metodunun temel prensibi, ilk olarak tek elemana ait sistem bilgilerini içeren denklemlerin çıkartılıp bu denklemleri tüm sistemi temsil edecek şekilde oluşturulan bütün denklemlerle beraber birleştirilerek tüm sisteme içinde barındıran lineer denklem takımı oluşturulmaktadır. Bir elemana ait denklemlerin çıkartılmasında farklı metodlar kullanılmaktadır. Bunlar arasında en fazla tercih edilen dört temel yaklaşım şunlardır (Sarıkanat, 2007: 87).

3.1. Direkt yaklaşım

Bu yaklaşım genellikle tek boyutlu ve basit problemlerin çözümü için uygun bulunmaktadır.

3.2. Varyasyonel yaklaşım

Bir fonksiyonelin en fazla ve en az edilmesi denilmektedir. Katı cisim mekaniğinde çok fazla tercih edilen fonksiyoneller potansiyel enerji prensibi, tümleyen potansiyel enerji prensibi ve Reissner prensibi olarak gösterilebilmektedir. Fonksiyonelin birinci türevinin sıfır olduğu yerde fonksiyonu en fazla ve en az yapan değerler bulunmaktadır. İkinci türevinin sıfırdan büyük veya küçük olmasına durumuna göre bu değer en fazla veya en az olduğu anlaşılmaktadır.

3.3. Ağırlıklı kalanlar yaklaşımı

Bir fonksiyonun farklı değerleri neticesinde bulunan yaklaşık çözümünüyle asıl çözümü arasındaki farkların belirlenen bir ağırlık fonksiyonu vasıtasıyla çarpılarak toplamalarını minimize etme olayına "ağırlıklı kalanlar yaklaşımı" denilmektedir. Bu yöntemin kullanılmasıyla eleman özelliklerinin bulunmasının önemi, fonksiyonların bulunamadığı problemlere uygun bulunmaktadır.

3.4. Enerji dengesi yaklaşımı

Bir sisteme giren ve çıkan termal veya mekanik enerjilerin dengeliği durumuna dayanmaktadır. Bu yöntemin en önemli özelliği yaklaşım bir fonksiyonla gereksinim duymamasıdır.

Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılacak çözümlerde kullanılacak yaklaşım çözüm işleminde uygulanacak yolu değiştirmemektedir. Çözüm yönteminde kullanılan adımlar aşağıda gösterilmektedir (Sarıkant, 2007: 88).

1. Cismin sonlu elemanlara ayrılması,
2. İnterpolasyon fonksiyonlarının belirlenmesi,
3. Eleman direngenlik matrisinin teşkili,
4. Sistem direngenlik matrisinin bulunması,
5. Sisteme etki eden kuvvetlerin bulunması,
6. Sınır şartlarının oluşturulması,
7. Sistem denklemlerinin çözülmesi

Sonlu eleman yöntemiyle problemlerin çözülmesinde ilk aşama eleman tipinin seçilmesi ve çözüm alanının elemanlara bölünmesidir. Çözüm alanının geometrik özellikleri belirlenerek bu yapıya uyabilecek en uygun elemanlar tercih edilmelidir. Seçilen elemanların çok önemlidir çünkü oluşturulan çözüm alanı ne kadar gerçek elemanı temsil ederse sonuçlar gerçeğe o kadar yaklaşmış olacaktır.

Sonlu elemanlar yönteminde tercih edilen elemanlar boyutlarına göre dört bölümde sınıflandırılabilir.

Tek boyutlu elemanlar: Bu elemanlar tek boyutlu olarak bilinen problemlerin çözümünde tercih edilmektedirler.

İki boyutlu elemanlar: İki boyutlu (düzlem) problemlerinin çözümünde tercih edilmektedir.

Bu grubun ana elemanı olarak üç düğümlü üçgen elemandır. Üçgen elemanın altı, dokuz ve hatta düğüm sayısı olarak daha da artan çeşitleri bulunmaktadır. Düğüm sayısı tercih edilecek interpolasyon fonksiyonunun derecesine göre oluşturulmaktadır. Üçgen eleman, çözüm alanının gerçeğine uygun olduğu için temsil bakımından avantajlı bir eleman türü olduğu düşünülmektedir. İki üçgen elemanın birbirine birleşmesiyle oluşan dörtgen eleman çözülecek problemin geometrisine uygun olduğu ölçüde kullanışlı olan bir eleman türüdür. Dörtgen eleman genellikle özel duruma giren dikdörtgen eleman olarak kullanılmaktadır.

Dönel elemanlar: Eksensel simetrik özellik gösteren problemlerin çözümünde dönel elemanlar kullanılmaktadır. Bu elemanlar bir ya da iki boyutlu elemanların simetri eksenini yönünde tam olarak bir tur dönmesiyle oluşmaktadır. Normalde üç boyutlu olduğu bilinen bu elemanlar, eksensel simetrik problemleri iki boyutlu bir problem olarak çözme yeteneğine sahip olduğu için çok avantajlıdır.

Üç boyutlu elemanlar: Bu grupta ana eleman olarak üçgen piramitler kullanılmaktadır. Bunun haricinde dikdörtgenler prizması ya da çoğunlukla altı yüzeyle elemanlar, üç boyutlu problemlerin çözülmesinde kullanılan eleman tipleridir.

İzoparametrik Elemanlar: Çözüm alanının sınırları eğri denklemler vasıtasıyla tanımlanmışsa kenar bölgeleri doğru şeklinde olan elemanların bu alanı tam olarak tanımlama olanağı bulunmamaktadır. Böyle durumlarda o alanı gerekli hassasiyette tanımlamak amacıyla elemanların boyutlarını azaltarak miktarlarını artırmak gerekmektedir. Böyle bir durumda çözülmesi gereken denklem adedini artırır, buda gerekli bilgisayar kapasitesinin yanında zamanında uzamasına sebep olmaktadır. Bu olumsuzlukları gidermek için, çözüm alanının eğri denklemlerle tanımlanan sınırlara uyum gösterecek eğri kenarlı elemanlara gereksinim duyulmaktadır. Bu şekilde hem çözüm alanı daha net tanımlanmakta hem de kullanılan eleman sayısı azalarak çözüm yapılabilir. Bu elemanlar üzerindeki düğüm noktaları bir fonksiyon ile tanımlanmaktadır. İzoparametrik sonlu elemanın özelliği, her noktasının konumunun ve yer değiştirmesinin aynı mertebeden aynı şekil interpolasyon fonksiyonu ile tanımlanabiliyor olmasıdır. İzoparametrik elemanlara eş parametrelili elemanlar da denilmektedir.

İzoparametrik elemanların özellikleri şunlardır:

1. Lokal koordinatlarda iki komsu eleman arasında süreklilik oluşuyorsa, izoparametrik elemanlar arasında da gerçekleşiyor demektir.
2. Eğer interpolasyon fonksiyonu lokal koordinat takımındaki elemanda sürekli ise, izoparametrik elemanda da sürekli bulunmaktadır.
3. Çözümün netliği lokal koordinatlarda gerçekleşiyorsa izoparametrik, elemanlarda da gerçekleşmektedir.

İzoparametrik elemanların belirtilen özellikleri sebebiyle, interpolasyon fonksiyonları lokal koordinatlarda kullanılmaktadır.

İnterpolasyon Fonksiyonlarının Seçimi: İnterpolasyon fonksiyonu alan değişkeninin eleman üstündeki etkisini temsil etmektedir. İnterpolasyon fonksiyonunun oluşturulması seçilen eleman türü ve çözüm yapılacak denklem derecesiyle direkt ilgili olmaktadır. Bununla beraber interpolasyon fonksiyonları aşağıda belirtilen şartları sağlaması istenmektedir:

1. İnterpolasyon fonksiyonda yer alan değişkeni ve alan değişkenini en yüksek mertebeden bir önceki mertebeye kadar olan kısmi türevleri eleman sınırlarında sürekli olmalıdır.
2. İnterpolasyon fonksiyonunda bulunan alan değişkeninin bütün türevleri, eleman boyutları limitte sıfıra gitse bile alan değişkenini karakterize etmelidir.
3. Seçilen interpolasyon fonksiyonu koordinat değişimlerinden etkilenmemelidir.

Hem yukarıdaki belirtilen şartları uyumlu olmaları hem de türev ve integral alma işlemi bakımından kolay olduğundan interpolasyon fonksiyonu seçiminde polinomlar kullanılmaktadır. Seçilen polinomun gerçekleşmesi için yukarıda belirtilen özellikleri bulunması gerekmektedir (Sarıkanat, 2007: 91-93).

Eleman Direngenlik Matrisinin Elde Edilmesi: Eleman direngenliğinin bulunması, elemana etki eden dış etkenler ile alan değişkenleri arasında bir ilişkiyi kurmak anlamına gelmektedir. Eleman direngenliği bulunurken sonuçlandırılacak problemin konusu, alan değişkeni, seçilen eleman tipi, seçilen interpolasyon fonksiyonu, eleman özelliklerini elde ederken kullanılan metot gibi birçok etken dikkate alınmak durumundadır. Etki eden bu faktörlere bakılarak da direngenliğinin bulunmasında farklı yöntemler izlenmektedir.

Sistem Direngenlik Matrisinin Oluşturulması: Sistem direngenlik matrisi sistemin düğüm sayısı ve her düğümdeki serbestlik derecesine bağılı olarak belirlenir, elemanlar için hesaplanan direngenlik matrisleri, elemanın üzerindeki düğüm numaralarına bağılı olarak genel direngenlik matrisinde ilgili satır ve sütununa yerleştirilmektedir. Farklı elemanların ortak olarak kullandıkları düğümlerdeki terimler asıl direngenlik matrisinin bulunduğu satır ve sütununda üst üste toplanmalıdır. Elemanların düğüm numaralaması bir sistematığe göre oluşturulursa asıl direngenlik matrisindeki elemanlar diyagonal olarak üst üste toplanmaktadır. Genel olarak direngenlik matrisi simetrik olmaktadır.

3.5. Sisteme Etki Eden Kuvvetlerin Bulunması

Bir problemin çözümünde sisteme etkide bulunabilecek kuvvetler şunlar olabilmektedir:

3.5.1. Tekil Kuvvetler

Tekil kuvvetler hangi elemanın hangi düğümüne ne yönde etki ediyorsa genel kuvvet vektöründe etkide bulunduğu düğüme denk gelen satıra yerleştirilmektedir. Problemin türüne bakımından tekil yük tanımı değişebilmektedir. Örnek olarak ısı iletimi probleminde elastisite problemindeki tekil yüke denk gelen noktasal ısı kaynağı veya tanımlı ısı akısı yükleri bulunmaktadır.

3.5.2. Yayılı Kuvvetler

Bu kuvvetler etkilisi bir kenarda veya bir bölgede etkili olmaktadır.

3.5.3. Kütle Kuvvetleri

Eleman hacmi yönünden geçerliliğı bulunan merkezkaç kuvveti ile ağırlık kuvvetleri gibi kuvvetlerdir.

3.6. Sınır Şartlarının Belirlenmesi

Her problemin gerçek veya sanal olarak sınır şartları bulunmaktadır. Sınır şartları, malzemenin farklı bölgelerindeki elastik olarak yer değıştirmelerin ölçülebilmesi için bir referans sağlamaktadır.

3.7. Sistem Denkleminin Çözümü

Çözüm için, sistemin sınır şartları dikkate alınarak direngenlik matrisinin tersini almak yeterli olmaktadır. Ama bilgisayar kapasitesini ve bilgisayar çözüm süresi bakımından büyük matrislerin sonucunu ters alma yöntemiyle bulmak yerine Gauss eliminasyon metodu,

Skyline yöntemi gibi yöntemlerle daha az kapasite ve daha kısa sürede sonuç bulunduğu için daha fazla tercih edilmektedir (Sarıkanat, 2007: 94-96).

3.8. Sonlu Elemanlar Yönteminde Kullanılan Algoritmalar

Sayısal simülasyon da kullanılan çözücüler, iki temel algoritmaya sahiptirler. Bu algoritmalar ise eksplisit ve implisit diyerek ifade edilmektedir.

Eksplisit yöntem, çoğunlukla metal şekillendirme proseslerinde kullanılmaktadır. Eksplisit yöntem; lineer olmayan denklemlerin analizinde, mekanik kırılma ve kopma içeren lineer olmayan ve zamana bağlı çözümlerin analizinde kullanılmaktadır. Bu durumdaki problemlere örnek verecek olursak; havacılıkta kuşun çarpması, otomotivde çarpışma, devrilme simülasyonları, inşaat mühendisliğinde yıkılma simülasyonu gibi problemlerle çeşitlendirilebilmektedir. Eksplisit yöntemi kullanılarak yapılacak analizlerde bazı durumlara dikkat gösterilmesi gerekmektedir. Bu hususlardan başında tanımlanacak ağ yapısında bulunan eleman şekilleri bulunmaktadır. Eksplisit yöntem kullanılarak yapılan analizlerde oluşturulan ağ yapılarının; üçgen, piramit ve tetragonal prizma şekillerindeki elemanlar olması istenmektedirler. Özellikle boyutu küçük elemanlardan kaçınılmalıdır (Çetin, 2007: 72).

İmplicit yöntemin özelliği ise zamana bağımlı olmayan, duran problemlerin analizinde kullanılmaktadır. Örnek olarak çelik konstrüksiyonların yük kapasite analizlerinde, cıvata ile bağlı mekanik parçaların dayanım, basınçlı kaplarda meydana gelen gerilme analizleri örnek gösterilebilmektedir.

Eksplisit yöntem, implisit yöntem bakımından daha hızlı sürede sonuç sağlamaktadır. Eksplisit yöntemde problemin çözümü sonucunda oluşan kararsız sonuçların yorumlanması implisit yönteme nazaran daha kararlı bulunmaktadır. Kararsız sonuçlar, derin çekme prosesi sonucunda ulaşılan buruşma veya kırışıklık hatası sonucu meydana gelmektedir. Sonuç olarak kırışıklık durumuyla karşılaşma durumu olan elemanlarda eksplisit yöntem daha gerçek sonuçlar vermektedir. Eksplisit yöntemin, implisit yönteme göre daha fazla üstün yanlar içermesine rağmen bazı dezavantajları da bulunmaktadır. İki yöntemin arasındaki temel farklar Tablo 3.1.'de kısaca gösterilmektedir (Yıldız, 2017: 84).

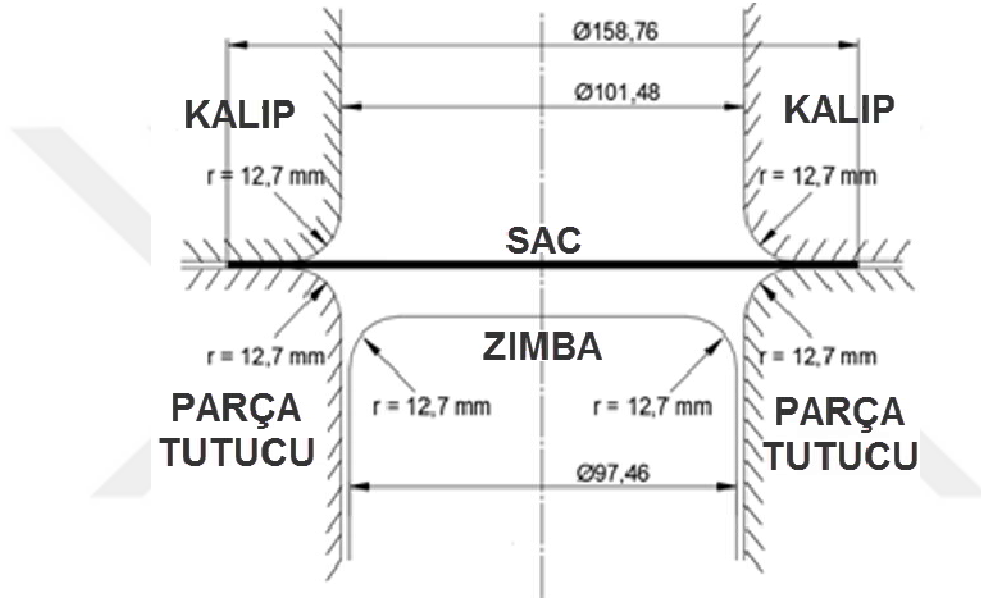
Tablo 3.1. Eksplisit ve implisit yöntemler arasındaki temel farklar

Eksplisit Yöntem	İmplicit Yöntem
Çok düşük zaman adımları gerektirir	Yüksek zaman adımları gerektirir
Düşük zaman adımlarında gerçekçi sonuçlar verir.	Yüksek deformasyonlarda, yüksek temas yüzeylerinde ve lineer olmayan malzeme özelliklerinde gerçekçi sonuçlar vermez.
Yüksek CPU zamanı gerektirir.	Düşük CPU zamanı gerektirir.
Lineer olmayan malzeme davranışlarında iyi sonuç verir.	Durağan davranışlarda iyi sonuç verir.
Düşük hafıza gerektirir.	Yüksek hafıza gerektirir.

Kaynak: (Yıldız, 2017: 85)

4. UYGULAMA ÇALIŞMASI

Çalışma kapsamında paslanmaz çeliklerden 304 ve 430 kalitelerine sahip 1 mm kalınlığında iki farklı malzeme kullanılmıştır. Malzemeler derin çekme prosesi için Şekil 4.1’de verilen kalıp takımı ile sonlu elemanlar analizlerine farklı proses parametrelerinde şekillendirilmiş ve şekillendirme sınır diyagramları incelenmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan proses parametreleri Tablo 4.1’de verilmiştir. Sonlu elemanlar analizlerinde malzemenin plastik davranışının modellenmesi için gerekli olan mekanik özellikler ise her iki malzeme için Tablo 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Çalışma kapsamında kullanılan kalıp takımı

Kaynak: (Ghennai vd., 2019: 365)

Tablo 4.1. Çalışmada kapsamında kullanılan proses parametreleri ve değerleri

Proses Parametresi	Değer
Parça Tutucu Kuvvet (kN)	200 – 400 – 600 - 800
Sürtünme Katsayısı	0,08 – 0,12 – 0,16 – 0,2
Zımba radüsü (mm)	8 – 12,7 - 15
Kalıp radüsü (mm)	8 – 12,7 - 15

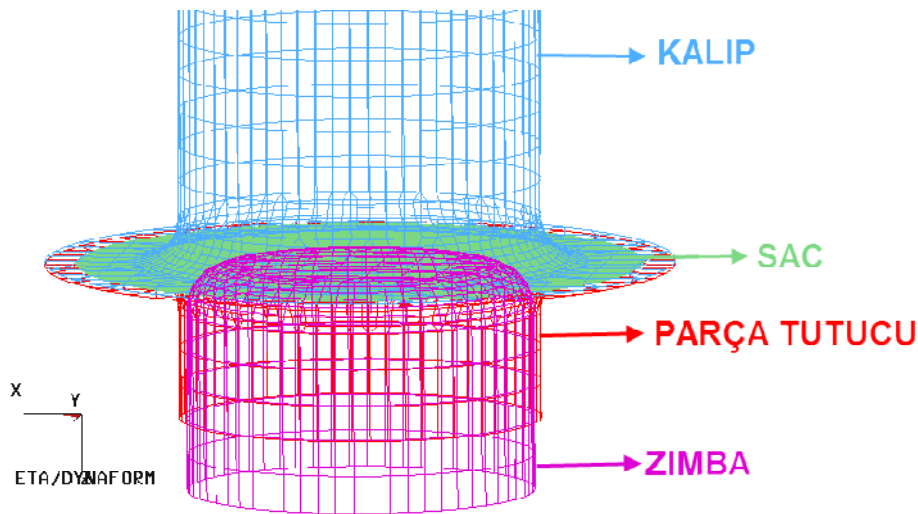
Tablo 4.2. Çalışmada kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri

Mekanik Özellik	304 Paslanmaz Çelik	430 Paslanmaz Çelik
Akma Gerilmesi	310 MPa	331 MPa
Possion Oranı	0,3	0,3
Elastisite Modülü	200 GPa	200 GPa
Mukavemet Katsayısı(K)	1349 MPa	1600 MPa
Ortalama Anizotropi Katsayısı, rort	1,055	1,65
Pekleşme Üsteli (n)	0,32	0,45

Kaynak: (Bong vd., 2013: 97)

Malzeme özelliklerinin tespiti ve proses parametrelerinin tamamlanmasının ardından çalışmanın sonlu elemanlar modelleme adımı gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın sonlu elemanlar analizi adımı ilk olarak derin çekme kalıbının yüzey modellemesi gerçekleştirilmiş ve sonrasında sonlu elemanlar modellemesi için ağ yapısı oluşturulmuştur. Çalışma kapsamında kullanılan kalıp takımının sonlu elemanlar modeli Şekil 4.2’de verilmiştir. Sonlu elemanlar modelinin oluşturulması adımı sonrasında proses parametrelerinin ve sonlu elemanlar hesaplama parametrelerinin tanımlanması adımına geçilmiştir. Bu kapsamda şekillendirme hızı 2000 mm/s olarak belirlenmiştir. Bunun dışındaki proses parametreleri Tablo 4.1’de verilen farklı değerlerde kullanılmıştır. Hesaplama parametresi olarak ise Belytscko-Tsay eleman formülasyonu ile 5 integrasyon noktası kullanılmıştır. Şekillendirme mesafesi tüm simülasyonlarda 30 mm olarak belirlenmiştir.

**Şekil 4.2.** Derin çekme kalıp takımının sonlu elemanlar modeli

Sonlu elemanlar analizlerinde malzemenin plastik davranışının modellenenebilmesi için plastisite modelinin tanımlanması gerekmektedir. Bu doğrultuda çalışmaya ait tüm simülasyonlarda günümüzde en sık kullanılan malzeme modellerinden birisi olan Hill-48 modeli tercih edilmiştir. Bu model R. Hill tarafından 1948 yılında önerilmiştir (Hill, 1948). Bu modelde malzeme üç ortogonal simetri düzleminde anizotropisi olduğu kabulü bulunmaktadır. Hill-48 modelinin genel formu Denklem (4.1)'deki gibi verilebilir.

$$2f(\sigma_{ij}) = F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{31}^2 + 2N\sigma_{12}^2 = 1 \quad (4.1)$$

burada F, G, H, L, M ve N anizotropi katsayılarına bağlı sabitlerdir. Sac metal şekillendirme problemleri düzlem gerilme problemi olduğundan Hill-48 modeli bu formda kullanılmıştır. Modelin düzlem gerilme formu Denklem (4.2)'de verilmiştir.

$$2f(\sigma_{ij}) = (G + H)\sigma_{11}^2 - 2H\sigma_{11}\sigma_{22} + (H + F)\sigma_{22}^2 + 2N\sigma_{12}^2 = 1 \quad (4.2)$$

F, G, H ve N sabitlerinin anizotropi ile ilişkisi Denklem (4.3)-(4.6)'da verilmiştir.

$$F = \frac{r_0}{(1+r_0)(r_{90})} \quad (4.3)$$

$$G = \frac{1}{(1+r_0)} \quad (4.4)$$

$$H = \frac{r_0}{(1+r_0)} \quad (4.5)$$

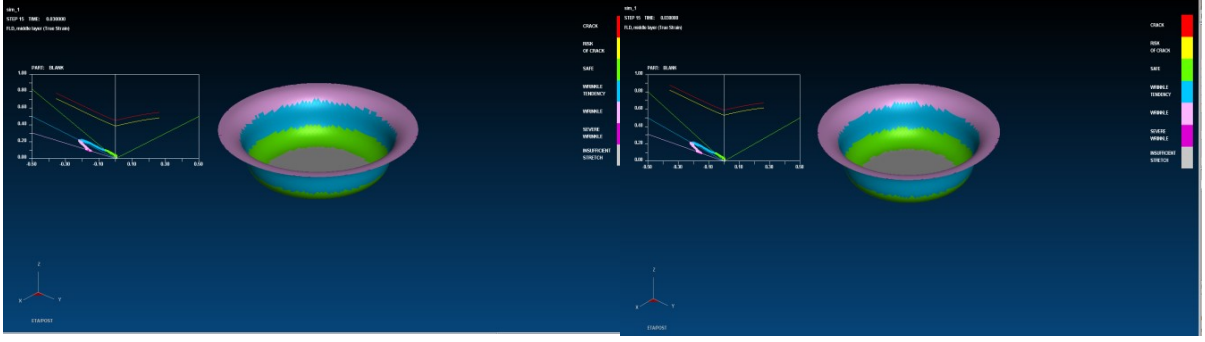
$$N = \frac{(r_0+r_{90})(2r_{45}+1)}{(2(1+r_0))r_{90}} \quad (4.6)$$

burada r_0 , r_{45} ve r_{90} sırasıyla hadde yönü, hadde yönüne 45° ve hadde yönüne dik yönlerdeki anizotropi katsayılarıdır.

Malzeme modellemesinin ardından sonlu elemanlar analizinin çözüm aşamasına geçilmiştir. Her iki malzeme ve tüm proses parametreleri için simülasyonlar gerçekleştirilmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

4.1. Sonuçlar

Sonuçlar ilk incelenen proses parametresi olan parça tutucu kuvvet açısından incelenmiştir. Her iki malzeme için de değişken parça tutucu kuvvete göre şekillendirme sınır diyagramları elde edilmiş ve karşılaştırma sonuçları Şekil 4.3 ve 4.6'da verilmiştir.

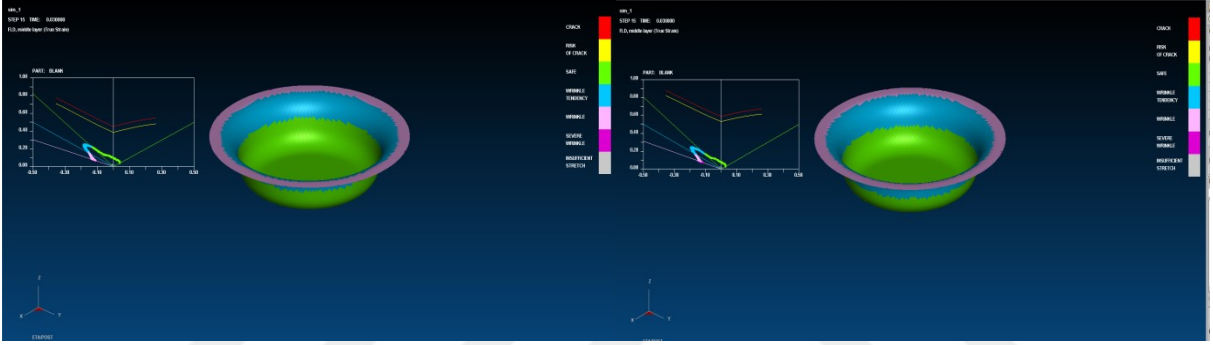


(a)

(b)

Şekil 4.3. 200 kN parça tutucu kuvvet sonucunda şekillendirme sınır diyagramlarının karşılaştırılması

(a) 304 paslanmaz çelik (b) 430 paslanmaz çelik

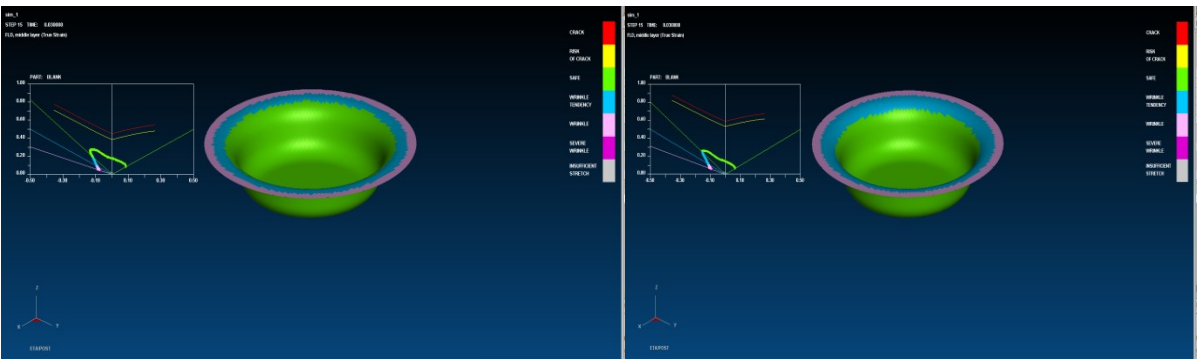


(a)

(b)

Şekil 4.4. 400 kN parça tutucu kuvvet sonucunda şekillendirme sınır diyagramlarının karşılaştırılması

(a) 304 paslanmaz çelik (b) 430 paslanmaz çelik

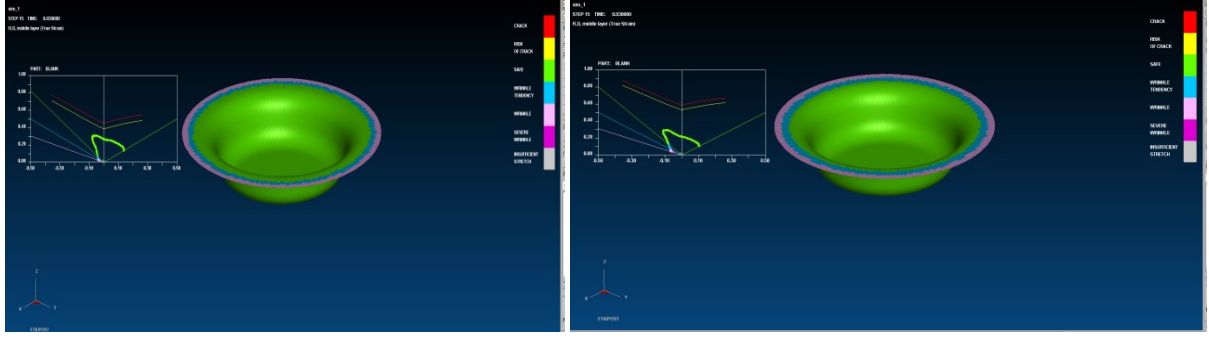


(a)

(b)

Şekil 4.5. 600 kN parça tutucu kuvvet sonucunda şekillendirme sınır diyagramlarının karşılaştırılması

(a) 304 paslanmaz çelik (b) 430 paslanmaz çelik



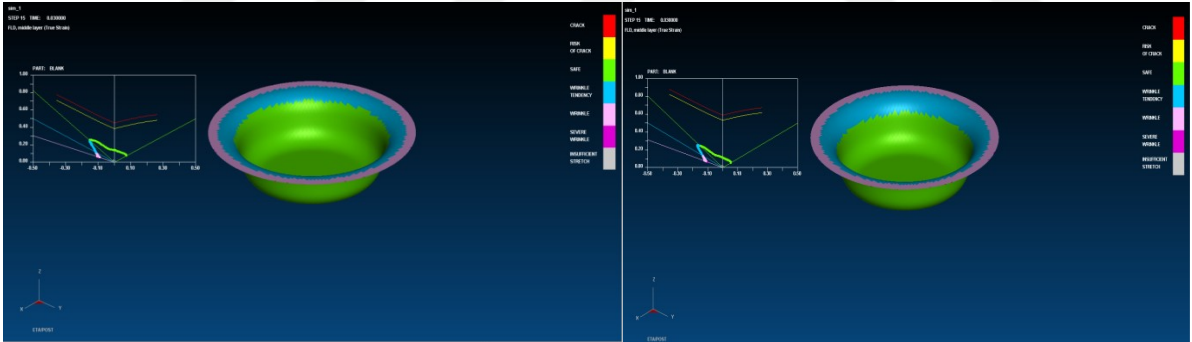
(a)

(b)

Şekil 4.6. 800 kN parça tutucu kuvvet sonucunda şekillendirme sınır diyagramlarının karşılaştırılması

(a) 304 paslanmaz çelik (b) 430 paslanmaz çelik

Parça tutucu kuvvet sonuçlarından da görüldüğü üzere şekillendirme sınır diyagramlarında tüm malzemeler güvenli bir şekilde form almış fakat kırışma davranışı artan parça tutucu kuvvetle azalmıştır. Bu nedenle her iki malzeme içinde en uygun parça tutucu kuvvetin 800 kN olduğuna karar verilmiş ve bir sonraki parametre olan sürtünme katsayısına göre sonuçlar incelenmiştir. Sürtünme katsayısına göre şekillendirme sınır diyagramlarının durumu Şekil 4.7 ve 4.10'da verilmiştir.

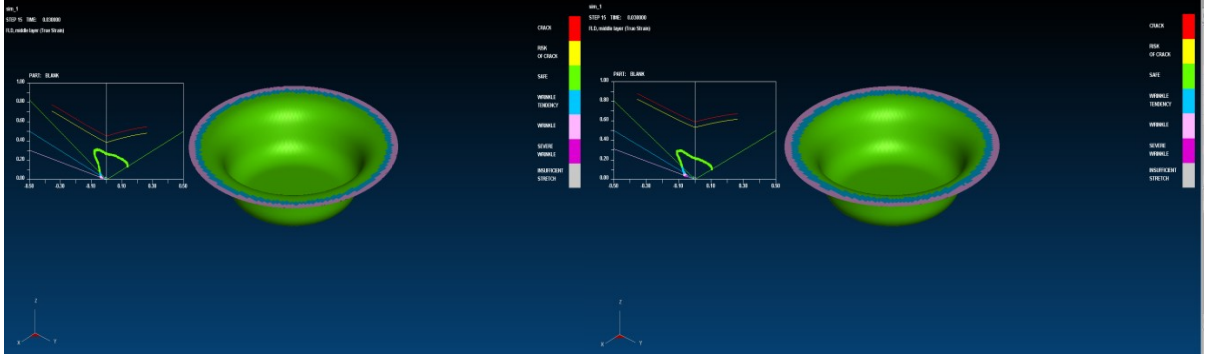


(a)

(b)

Şekil 4.7. 0,08 sürtünme katsayısı kullanımı sonucunda şekillendirme sınır diyagramlarının karşılaştırılması

(a) 304 paslanmaz çelik (b) 430 paslanmaz çelik

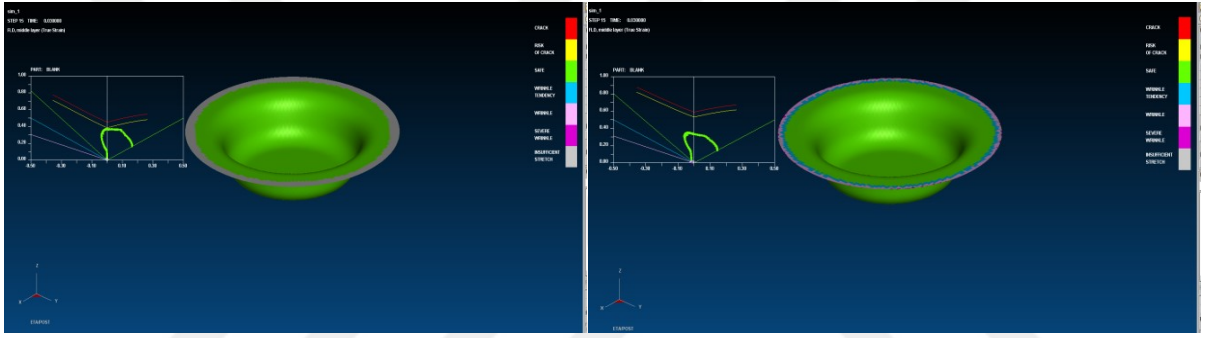


(a)

(b)

Şekil 4.8. 0,12 sürtünme katsayısı kullanımı sonucunda şekillendirme sınır diyagramlarının karşılaştırılması

(a) 304 paslanmaz çelik (b) 430 paslanmaz çelik

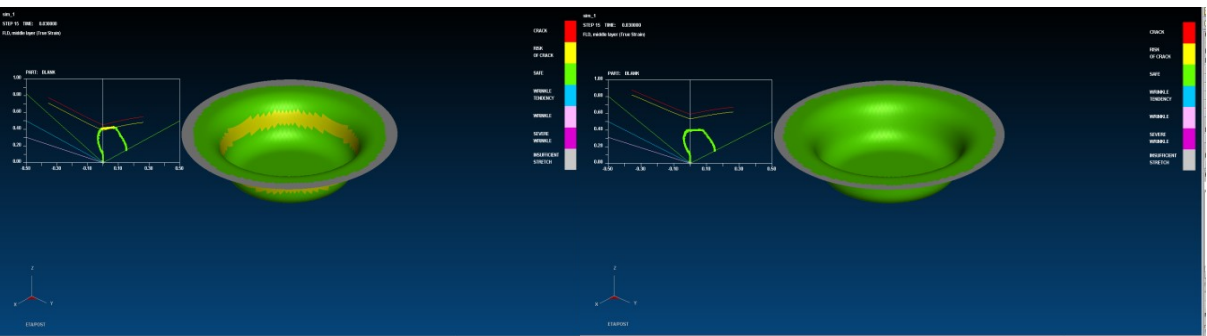


(a)

(b)

Şekil 4.9. 0,16 sürtünme katsayısı kullanımı sonucunda şekillendirme sınır diyagramlarının karşılaştırılması

(a) 304 paslanmaz çelik (b) 430 paslanmaz çelik



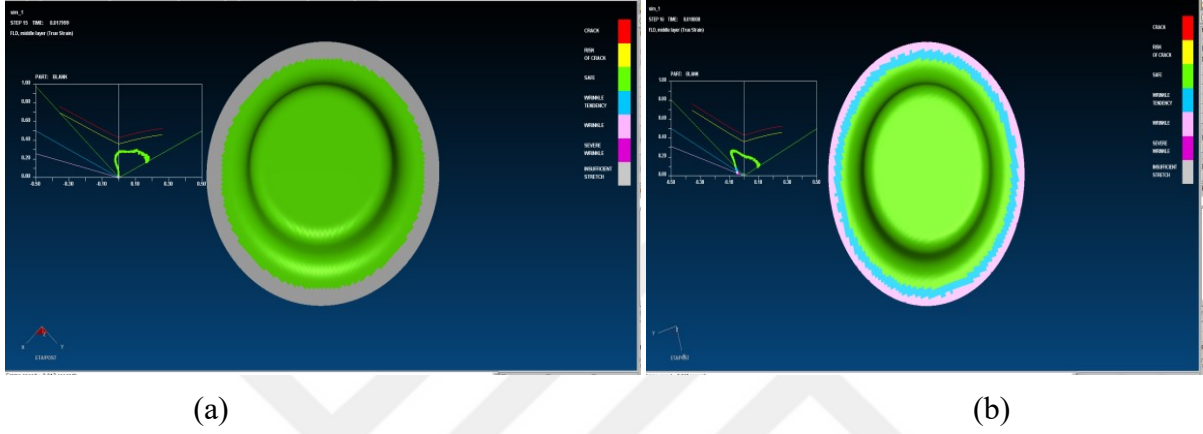
(a)

(b)

Şekil 4.10. 0,20 sürtünme katsayısı kullanımı sonucunda şekillendirme sınır diyagramlarının karşılaştırılması

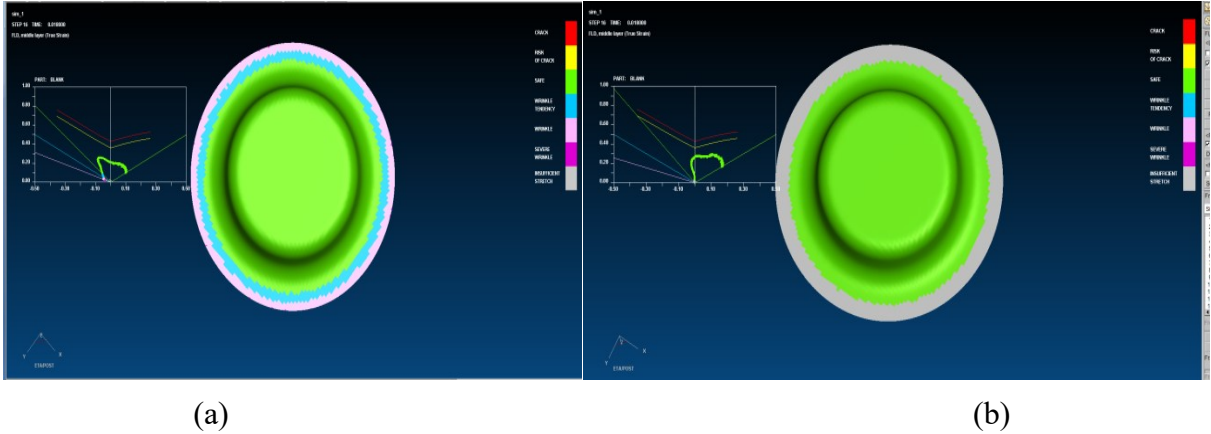
(a) 304 paslanmaz çelik (b) 430 paslanmaz çelik

Sürtünme katsayısına ait sonuçlar incelendiğinde artan sürtünme kuvveti ile şekillendirilebilirliğin azaldığı görülmüştür. 0,08 değerinde kırışma riski yer alırken 0,12 değerinde bu durum ortadan kalkmıştır. Bu nedenle en uygun sürtünme katsayısı değeri 0,12 olarak belirlenmiştir. Bu durum yağlayıcı kullanılmadan gerçekleşen bir operasyonla yaklaşık aynı değerdedir. Bir sonraki adımda zımba radüsünün etkisi incelenmiş. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.11 ve 4.13’de verilmiştir.



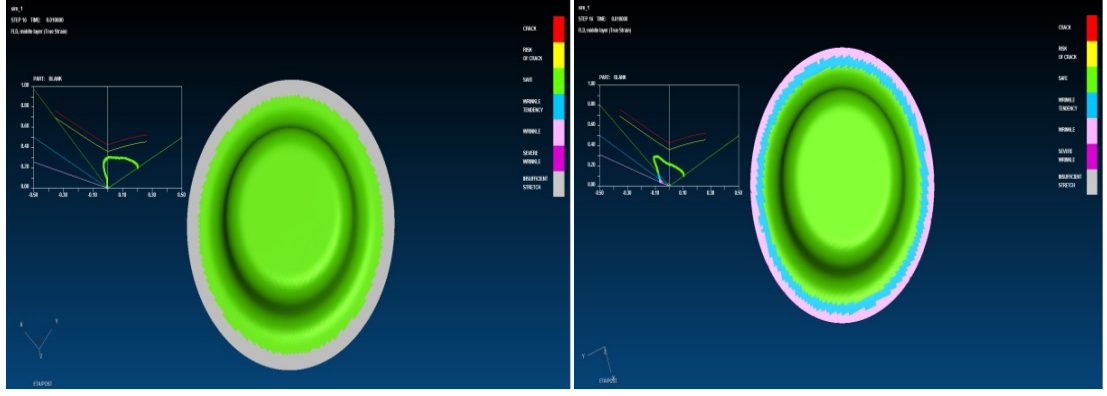
Şekil 4.11. 8 mm zımba radüsü kullanımı sonucunda şekillendirme sınır diyagramlarının karşılaştırılması

(a) 304 paslanmaz çelik (b) 430 paslanmaz çelik



Şekil 4.12. 12,7 mm zımba radüsü kullanımı sonucunda şekillendirme sınır diyagramlarının karşılaştırılması

(a) 304 paslanmaz çelik (b) 430 paslanmaz çelik

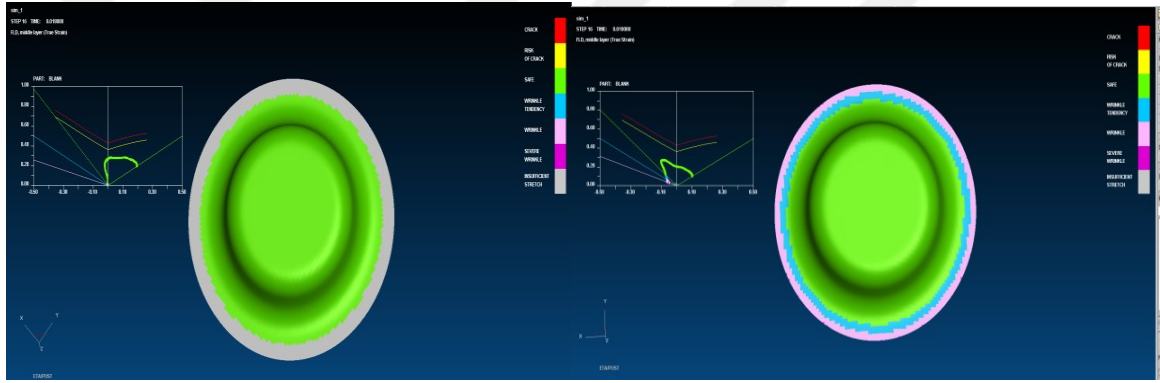


(a)

(b)

Şekil 4.15. 12,7 mm kalıp radüsü kullanımı sonucunda şekillendirme sınır diyagramlarının karşılaştırılması

(a)304 paslanmaz çelik (b) 430 paslanmaz çelik



(a)

(b)

Şekil 4.16. 15 mm kalıp radüsü kullanımı sonucunda şekillendirme sınır diyagramlarının karşılaştırılması

(a)304 paslanmaz çelik (b) 430 paslanmaz çelik

Kalıp radüsleri sonuçları değerlendirildiğinde zımba radüsüne benzer olarak malzemelerin kendi içlerinde sonuçlara çok etkisinin olmadığı görülmekle birlikte yine 15 mm'lik radüs ile ürün formundan bir miktar sapma gözlemlenmiştir. Küçük radüs değeri daha yüksek gerilme değerlerine neden olacağından kalıp radüsü olarak da 12,7 mm'lik değerde karar kılınmıştır. Sonuç olarak çalışmada sunulan derin çekme prosesi için en uygun proses parametreleri olarak her iki malzeme için de 800 kN parça tutucu kuvvet, 0,12 sürtünme katsayısı ve 12,7 mm'lik kalıp ve zımba radüsleri belirlenmiştir.

5. DEĞERLENDİRME

Günümüzde malzemelerin şekillendirme işlemleri sırasında kullanılan proses parametreleri oldukça önemlidir. Şekillendirme işlemi sırasında doğru parametrelerin belirlenmesi hem maliyet hem de zaman bakımından fayda sağladığı bilinmektedir. Proses parametreleri seçilirken dikkat edilmesi gereken durumlardan olan maliyet ve zaman süreci açısından, doğru yöntemin seçilmesi önem arz etmektedir. Bu aşamada klasik yöntem olarak ürünün deneme yanılma yöntemi ile bu parametrelerin elde edilmesi hem maliyet hem de zaman bakımından önemli kayıplara neden olabilmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanarak proses parametrelerinin maliyet, zaman v.b faktörler bakımından daha kolay ve doğru bir şekilde hesaplanması istenmektedir.

Bu kapsamda sırasıyla proses parametreleri sonlu elemanlar yöntemiyle oluşturularak en ideal değerler hızlı bir şekilde bulunmaya çalışılmıştır. İlk önce parça tutucu kuvvet belirlenmesi için 200, 400, 600 ve 800 kN değerleriyle sonlu elemanlar yöntemiyle analiz yapılmıştır. Analizden sonra şekillendirme sınır diyagramında bütün değerlerde malzemelerin güvenli bir şekilde form aldığı görülmekle birlikte parça tutucu kuvvetin artmasıyla beraber malzemelerdeki kırışıklığın azaldığı görüldüğü için 800 kN değeri seçilmiştir. İkinci olarak sürtünme katsayısı değerleri olarak 0,08, 0,12, 0,16 ve 0,20 değerleri ile şekillendirme sınır diyagramı incelenmiş ve artan sürtünme katsayısı değeriyle beraber şekillenmenin zayıfladığı, düşük sürtünme katsayısı değerinde ise kırışma riskinden dolayı sürtünme katsayısı olarak 12,7 değeri seçilmiştir. Daha sonra zımba radüsü ve kalıp radüsü değerleri 8, 12,7 ve 15 mm değerleri verilerek şekillendirme sınır diyagramı incelenmiş ve 15 mm değerinde ürün formunda biraz değişiklik olmakla birlikte düşük zımba ve kalıp radüsü değerinde de yüksek gerilmeye sebebiyet verebileceğinden 12,7 mm değeri seçilerek proses parametreleri oluşturulmuştur.

KAYNAKLAR

- Alparslan, Y. E.** (2008). Merkezi Delikli Taslak Malzemelerin Derin Çekme Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.
- Barlat, F., & Lian, J.** (1989). Plastic behaviour and stretchability of sheet metals (Part I): A yield function for orthotropic sheet under plane stress conditions, *International Journal of Plasticity*, 5:51–56.
- Belytschko, T., Lin, J. I., & Chen-Shyh, T.** (1984). Explicit algorithms for the nonlinear dynamics of shells. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 42(2), 225-251.
- Bong, H. J. vd.** (2013). Formability of austenitic and ferritic stainless steels at warm forming temperature. *International Journal of Mechanical Sciences*, 75, 94-109.
- Crawford, R. P., Rosenberg, W. S., & Keaveny, T. M.** (2003). Quantitative computed tomography-based finite element models of the human lumbar vertebral body: effect of element size on stiffness, damage, and fracture strength predictions. *Journal of biomechanical engineering*, 125(4), 434-438.
- Çetin, M. S.** (2007). Derin Çekme ile Soğuk Şekillendirmenin Sonlu Elemanlar Metodu Yardımıyla Analizi. Yüksek Lisans Tezi. Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
- Dahale, P. S., Pawar, P. D., & Patil, V. G.** (2018). Assessment of Boundary Conditions for FEA of Mounting Bracket Using Co-relation with Experimental Results. *Materials Today: Proceedings*, 5(5), 13290-13300.
- Demiray, K.** (2006). AL 1050 Malzemesinin Derin Çekme İşleminde Baskı Plakasının Etkisinin Teorik ve Deneysel Olarak İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Dengiz, C. G.** (2014). Dupleks Paslanmaz Çelik Sacların Derin Çekme Ve Hidro şekillendirme Kabiliyetlerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi. Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
- Dewang, Y., Panthi, S. K., & Hora, M. S.** (2018). Some aspects of blank holding force in stretch flanging process. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 6789-6798.

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

Erdem, K., & Kaftanoğlu, B. (2016). Yüksek Mukavemet Çeliklerinin Derin Çekme Oranlarının Geliştirilmesi İçin Yapılan Deneysel Çalışmalar. *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, 14(2), 77-87.

Erdoğan, M. (2017). Alüminyum Alaşımlarının Derin Çekme İşleminin Sonlu Eleman Yöntemi İle Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Hitit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çorum.

Erhuy, C. G., Yurci, M. E., & Altan, T. (2008). Determining The Effective Stress – Effective Strain Curve Of A High-Strength Low-Alloy Steel Sheet From The Viscous Pressure Bulge Test. *Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 26(4), 281-300.

Esner, C. (2006). AA5754 Malzemesinde Derin Çekme İşleminde Baskı Plakasının Etkisinin Teorik ve Deneysel Olarak İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.

Ewing, R. E., Lin, T., & Lin, Y. (2002). On the accuracy of the finite volume element method based on piecewise linear polynomials. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 39(6), 1865-1888.

Ghennai, W. vd. (2019). Experimental and numerical study of DC04 sheet metal behaviour—plastic anisotropy identification and application to deep drawing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 100(1-4), 361-371.

Göl, S. (2005). Derin Çekme İşlemine Etki Eden Parametrelerin Analizi ve Optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

Gündü, T. (2000). Derin Çekme Saclarında Derin Çekilebilirlik Özelliklerinin Belirlenebilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Gürün, H. (2008). Derin Çekme Kalıplarındaki Parametrelerin Deneysel Olarak İncelenmesi ve Bulanık Mantık İle Tahmini. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

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

- Hill, R.** (1948). A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals, Proc. Roy. Soc. London, 281-297.
- Holloman, J. H.** (1945). Tensile Deformation, Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, 162:268-290.
- Hughes, T. J., Liu, W. K., & Zimmermann, T. K.** (1981). Lagrangian-Eulerian finite element formulation for incompressible viscous flows. Computer methods in applied mechanics and engineering, 29(3), 329-349.
- İriç, D., İriç, S., & Kozan, R.** (2013). Sac Şekillendirme Prosesinde Kullanılan Süzdürme Çubuğu Frenleme Kuvvetinin Modellenmesi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 17(2), 201-205.
- Karaağaç, İ., Gürün, H., & Özdemir, A.** (2009). AISI 304 Paslanmaz Çelik Sac Malzemenin Klasik Olarak ve Sıvı Basıncıyla Derin Çekilebilirliklerinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Karşılaştırmalı Analizi. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu.13-15 Mayıs, Karabük.
- Koçar, O.** (2014). Derin Çekme İşleminde Ürün Kalitesinin Tahmini ve Kontrolü. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Köksal, S., & Demirer, A.** (2012). Plastik Şekil verme Yöntemleri notları.<https://docplayer.biz.tr/19934839-Plastik-sekil-verme-yontemleri.html>.
- Kumara, A., Gulatia, V., & Kumarb, P.** (2018). Effects of Process Parameters on Surface Roughness in Incremental Sheet Forming. Materials Today: Proceedings, 5(14), 28026-28032.
- Lal, R. K. vd.** (2018). Study of factors affecting Springback in sheet metal forming and deep drawing process. Materials Today: Proceedings, 5(2), 4353-4358.
- Ls-Dyna Theoretical Manual.** (1998). Livermore Software Technology Corporation.
- Mamalis, A. G., Manolakos, D. E., & Baldoukas, A. K.** (1997). "Simulation of Sheet Metal Forming Using Explicit Finite-Element Techniques: Effect of Material And Forming Characteristics, Part 1. Deep-Drawing of Cylindrical Cups", Journal of Materials Processing Technology, Volume 72, Pages 48-60.
- Mete, O. H.** (2007). Sac levhaların şekillendirilebilirliğine etki eden değişkenliklerin incelenmesi. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi.

- Mutlu, S.** (2012). Progresif Kalıplarla Derin Çekme Otomasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.
- Özçelik, G.** (2008). Derin Çekme İşleminin Simülasyonu. Yüksek Lisans Tezi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Özdilli, Ö.** (2018). Polimer Kaplı Metal Sacların Derin Çekme Davranışının İncelenmesi, Doktora Tezi, Hitit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çorum.
- Özsoy, M. vd.** (2014). Springback predictions of a dual-phase steel considering elasticity evolution in stamping process. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39(4), 3199-3207.
- Parthasarathy, V. N., & Kodiyalam, S.** (1991). A constrained optimization approach to finite element mesh smoothing. *Finite Elements in Analysis and Design*, 9(4), 309-320.
- Sarıkanat, M.** (2007). Trabeküler Kemiğin Üç Boyutlu Anizotropik Modellenmesi, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, İzmir.
- Shi, Y., Jin, H., & Wu, P. D.** (2018). Analysis of cup earing for AA3104-H19 aluminum alloy sheet. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 69, 1-11.
- Son, Y. K., Ko, D. C., & Kim, B. M.** (2015). Prediction of delamination and tearing during stamping of polymer-coated metal sheet. *Journal of Materials Processing Technology*, 220, 146-156.
- Suchy, I.** (2006). Handbook of die design. New York, 711
- Sümer, H.** (2018). Derin Çekme Yöntemi. [Erişim: 10.11.2020, <https://argevetasarim.com/>]
- Şen, N.** (2015). Yüksek Mukavemetli Çelik Sacların Flanş Bölgesinin Isıtılması İle Derin Çekme Sınır Oranının Deneysel İncelenmesi. Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Ulu, D.** (2008). Derin Çekme Prosesi İle Üretilen Alüminyum Sac Metal Parçalarına Ait Veri Tabanı Oluşturulması. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Wang, L., Basu, P. K., & Leiva, J. P.** (2004). Automobile body reinforcement by finite element optimization. *Finite Elements in Analysis and Design*, 40(8), 879-893.

Wang, Y. G. vd. (2016). Influence of blank holder type on drawability of 5182-O aluminum sheet at room temperature. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 26(5), 1251-1258.

Yalcin, S. (2010). Analysis and modeling of plastic wrinkling in deep drawing. Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Yıldız, B. (2017). Derin Çekme İşleminde Kalıp Tasarımının Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır.

Yıldız, H., & Kırılı, O. (2003). Derin Çekme İşleminin Doğrusal Olmayan Sonlu Elemanlar Metodu Yardımıyla Modellenmesi. Mühendislik Bilimleri Dergisi, Pamukkale Üniversitesi, 10(3), 317-325.

Yoshida, F., & Uemori, T. (2002). A model of large-strain cyclic plasticity describing the Bauschinger effect and workhardening stagnation. International journal of plasticity, 18(5-6), 661-686.

Zhang, R., Shao, Z., & Lin, J. (2018). A review on modelling techniques for formability prediction of sheet metal forming. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, 1(3), 115-125.