

**SONLU ELEMANLAR METODUNUN
DERİN ÇEKME İŞLEMİNE
UYGULANMASI ve GERÇEK BİR
SANAYİ PARÇASI İLE ANALİZ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Arif GÖK

DANIŞMAN

Yrd. Doç. Dr. Ahmet GAYRETLİ

MAKİNE EĞİTİMİ

Mayıs 2007

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SONLU ELEMANLAR METODUNUN DERİN ÇEKME İŞLEMİNE
UYGULANMASI ve GERÇEK BİR SANAYİ PARÇASI İLE
ANALİZ SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Arif GÖK

DANIŞMAN
Yrd. Doç. Dr. Ahmet GAYRETLİ

MAKİNE EĞİTİMİ

Mayıs 2007

ONAY SAYFASI

Yrd. Doç Dr. Ahmet GAYRETLİ danışmanlığında,

Arif GÖK tarafından hazırlanan

SONLU ELEMENLAR METODUNUN DERİN ÇEKME İŞLEMİNE
UYGULANMASI ve GERÇEK BİR SANAYİ PARÇASI İLE ANALİZ
SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

başlıklı bu çalışma lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri

uyarınca

13/06/2007

tarihinde aşağıdaki jüri tarafından

Makine Eğitimi Anabilim Dalında

Yüksek Lisans tezi olarak oybirliği/oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

Ünvanı, Adı, SOYADI

İmza

Başkan :Doç. Dr. Ömer SOYKASAP

Üye :Yard. Doç. Dr. Serhat BAŞPINAR

Üye : Yard. Doç. Dr. Ahmet GAYRETLİ

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

...../...../..... ve

.....sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Doç. Dr. Emine SOYTÜRK

Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SONLU ELEMANLAR METODUNUN DERİN ÇEKME İŞLEMİNE UYGULANMASI ve GERÇEK BİR SANAYİ PARÇASI ile ANALİZ SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRMASI

Arif GÖK

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Eğitimi Bölümü

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Ahmet GAYRETLİ

Çelik sacların soğuk şekillendirilmesi esnasında oluşan problemlere bilgisayar destekli çözümler üretmek bir mühendislik çalışması gerektirmektedir. Kompleks geometriler içeren kalıp yüzeylerinde, ince çelik sac malzemesinin ne doğrultuda akacağı ve şekillendirme esnasında incelenen sacın yırtılma, buruşma ve benzeri şekil hatalarının; kalıp tasarımı aşamasında önceden görülüp önlem alınması büyük önem taşımaktadır. Derin çekme sonucu elde edilecek sac parçanın şeklini, kalınlığını, içerdiği ön gerilmeleri, çekme işleminde kullanılacak minimum sac boyutunu, sacın malzemesini ve en uygun kalıp yüzeyleri tasarımı bilgisayar simülasyonları ile önceden görüp maliyetten ve zamandan tasarruf üreticiler için büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla non-lineer sonlu elemanlar yazılımı (DYNAFORM 5.0) kullanılarak, fırın ön sacının derin çekilmesi işlemi gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda fırın ön sacı analiz şartları ile benzer olarak deneysel derin çekme işlemi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları ve deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış, DYNAFORM yazılımı ile deneysel sonuçlar arasındaki tutarlılık belirlenmiştir.

2007, 69 sayfa

Anahtar Kelimeler: Derin Çekme, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Sac Şekillendirme, Non-Linear Analiz, DYNAFORM

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

APPLICATION of FINITE ELEMENTS METHOD to THE DEEP DRAWING PROCESS and COMPARISON BETWEEN an INDUSTRIAL GENUINE BLANK and ANALYSIS RESULTS

Arif GÖK

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Education

Supervisor: Yrd. Doç. Dr. Ahmet GAYRETLİ

Computer aided solutions to the problems during the cold forming of sheet steel need an engineering working. On mold surfaces which include complex geometry, it is very important to take precaution for form failing, cracking and wrinkling before mold designing. It is possible to economize with imaginary results seen by computer simulation before manufacturing. For this reason, in this study, deep drawing possibility of cooker front sheet by using non-linear finite elements method DYNAFORM is investigated.

At the same time, real deep drawing experiment with similar conditions are investigated. At the end of the study, the last form of sheets, both analyzed and experimental softwares are compared and the consistency between DYNAFORM software and experimental result is determined.

2007, 69 pages

Keywords: Deep Drawing, Finite Elements Method, Sheet Forming, Non-Linear Analysis, DYNAFORM

TEŞEKKÜR

Tezimin tamamlanmasında, destek ve yardımlarını esirgemeyen hocam Yrd. Doç Dr. Ahmet GAYRETLİ'ye, Prof. Dr. Süleyman TAŞGETİREN'e, deneyleri yapımında yardımcı olan abim Öğretim Görevlisi Kadir GÖK'e, değerli dostum Yrd. Doç Dr. Güran ÜNAL'a, Yrd. Doç. Dr. Eyüp AKMAN'a, tezi hazırlamamda her türlü desteği sağlayan değerli arkadaşım Murat KARAKUŞ'a, deneylerimi gerçekleŐtirdiđim TERMİKEL A.Ő.'ine teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca çalışmalarım sırasında maddi ve manevi desteğini esirgemeyen eŐime ve aileme teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
1.GİRİŞ	1
2.GENEL BİLGİLER	2
2.1.Metallerde Plastik Şekil Değişimi.....	2
2.1.1 Metallerin kristal yapısı	2
2.1.2 Metallerin deformasyon mekanizmaları	2
2.2 Şekillendirilebilirlik ve Derin Çekme	3
2.3 Derin Çekme İşlemini Etkileyen Faktörler.....	5
2.3.1 Tane boyutu ve levha kalınlığı	5
2.3.2 Ürünün dış şekli	5
2.3.3 Kalıp tasarımının etkisi.....	6
2.3.4 Yağlama	6
2.3.5 Kulak oluşumu	7
2.3.6 Malzeme içeriğinin etkisi.....	7
2.3.7 Akma uzaması.....	7
2.3.8 Pekleşme üsteli.....	10
2.3.9 Plastik anizotropi.....	11
2.3.10 Kalıntı gerilmeler.....	12
2.3.11 Geri yaylanma	12
2.3.12 Elastiklik modülü.....	13
2.4 Derin Çekme Takımları ve Presleri.....	13
2.5 Sac Parçasında Gerilme Bölgelerinin Tespit Edilmesi.....	13

2.6 Derin Çekme İşlemlerinde Sonlu Eleman Simülasyonlarının Önemi.....	14
2.7 Literatür Araştırması	22
2.8 Amaç ve Kapsam	25
3. MATERYAL VE METOD	26
3.1 MATERYAL	26
3.1.1 Üç Boyutlu Gerilme Analizi	26
3.1.2 Nümerik Analizde Kullanılan Malzemenin Özellikleri.....	28
3.2 METOD	29
3.2.1 Sonlu Elemanlar Metodu	29
3.2.2 Üç Boyutlu Problemler	30
3.2.3 Gerilme Hesabı.....	32
3.2.4 Altı Yüzlü Eleman.....	33
3.2.5 Ağ Oluşturulması	35
3.3 Sonlu Elemanlar İle Statik Analiz.....	37
3.3.1 Giriş	37
3.3.2 Rijitlik Matrisinin Oluşumu	38
3.3.3 Yükler	39
3.4 Dynaform Sonlu Elemanlar Programı.....	39
3.5 Deneysel Çalışmalar.....	41
3.6.1 Deney Düzeneği	41
3.6.2 Kalıp Sistemi Elemanları	42
3.6.3 Deney Malzemesi	44
3.6.4 Deneyin Yapılışı.....	44
4. BULGULAR.....	47
4.1 Bir Sanayi Parçasının Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Derin Çekme Analizi	47
4.1.1 Üç boyutlu Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması	47
4.1.2 Fırın Ön Sac Ve Dişi Kalıp Modelinin DYNAFORM 5.0 Programında Import Edilmesi	49
4.1.3 Eleman Tipi ve Modelin Ağ Oluşturulması.....	49
4.1.4 Sonlu Eleman Modeline Sınır Şartlarının Uygulanması	51
4.1.5 Sonlu Eleman Programı İle Derin Çekme Analizinin Yapılması	52

5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR	54
5.1 Kulaklanma Açısından Gerçek İle Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması	54
5.2 Parça Üzerindeki Z- Yönündeki Gerilimler	55
5.3 Parça Üzerindeki X- Yönündeki Gerilimler	56
5.4 Parça üzerinde Von mises gerilmeleri.....	57
5.5 Parça Üzerinde Sac Kalınlığının Değişimi.....	58
5.6 Parça Üzerinde Buruşma Eğilimi ve Yırtılma	59
5.7 Parça Üzerinde Kesme Gerilmeleri.....	61
5.8 Şekillendirme Sınır Diyagramı	62
6. GENEL SONUÇ	63
7. KAYNAKLAR	64
7.1 İnternet Kaynakları.....	67
8. ÖZGEÇMİŞ	68

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 Derin çekme işlemi, a. Şematik, b. Perspektif	4
Şekil 2.2 Derin çekme işlemi boyunca çapa bağlı olarak iş parçası bünyesinde meydana gelecek gerilme değişiminin seyri (Topaç, 2003).....	14
Şekil 2.3 Simülasyon için kalıp elemanlarının tanımı	15
Şekil 2.4 One-Step Çözüm ve Açınım	16
Şekil 2.5 Elemanların FLD'de dağılımı	18
Şekil 2.6 Sac üzerinde uzama dağılımları ve yırtılmanın görünümü.....	19
Şekil 2.7 Kalınlık Dağılımı	20
Şekil 2.8 Kırışma Kriteri Dağılımı	20
Şekil 2.9 Geri Yaylanma Sonrası Parça ve Orijinal Yüzeyler	21
Şekil 3.1 Üç eksenli gerilme bileşenleri.....	26
Şekil 3.2 Üç eksenli gerilme hali için Mohr dairesi gösterimi.....	27
Şekil 3.3 Altı yüzlü temel eleman düğüm koordinatları	34
Şekil 3.4 Temel kübün dört yüzlü elemanlara ayrılması a) 5 Adet 4 yüzlü, b) 6 Adet 4 yüzlü	36
Şekil 3.5 Dynaform çalışma algoritması (DYNAFORM-PC)	40
Şekil 3.6 Presin cihazının resmi	42
Şekil 3.7 a. Erkek Kalıp, b.Baskı Plakası, c. Sac, d. Dişi Kalıp.....	43
Şekil 3.8 Deneyde kullanılan sac parçası.....	44
Şekil 3.9 Kalıp sistemi	45
Şekil 3.10 Kalıp sistemi	45
Şekil 3.11 Derin çekme işleminden sonra yırtılan parça	46
Şekil 4.1 Fırın ön sac modeli.....	48
Şekil 4.2 Dişi kalıp modeli.....	48
Şekil 4.3 Fırın ön sac ağ oluşturulmuş durumu.....	50
Şekil 4.4 Fırın ön sacı dişi kalıp ağ oluşturulmuş durumu.....	50
Şekil 4.5 Dişi kalıp hareket eğrisi.....	52
Şekil 4.6 Baskı kuvvet eğrisi.....	52
Şekil 4.7 Malzeme özellikleri.....	53
Şekil 4.8 Çözüm işlemi	53

Şekil 5.1 Analiz sonucu parça üzerinde oluşan kulaklanmalar	54
Şekil 5.2 Derin çekme işlemi sonucu parça üzerindeki kırışıklıklar	55
Şekil 5.3 Sac parça üzerindeki z- yönündeki gerilmeler.....	56
Şekil 5.4 Sac parça üzerindeki x- yönündeki gerilmeler	57
Şekil 5.5 Sac parça üzerindeki Von mises gerilmeleri	57
Şekil 5.6 Sac parçasının kalınlık değişimi	58
Şekil 5.7 Parça üzerinde incelme.....	59
Şekil 5.8 Parça üzerinde buruşma ve yırtılma	60
Şekil 5.9 Derin çekilmiş gerçek sac parçası.....	61
Şekil 5.10 Parça üzerindeki Maksimum kesme gerilmesi	62
Şekil 5.11 Şekillendirme sınır diyagramı.....	62

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
σ	Gerilme,
τ	Kayma gerilmesi,
ε	Şekil değiştirme,
Q	Elastiste Matrisi,
E	Elastiste Modülü,
G	Kayma Modülü,
ν	Poisson Oranı,
P	Basınç,
φ	Yoğunluk,
V	Hacim,
F	Kuvvet,
m	Kütle,
μ	Sürtünme Katsayısı,
t	Kalınlık,

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1 AISI 1017 çeliğinin fiziksel ve mekanik özellikleri.....	28
Çizelge 3.2 AISI 1017 çeliğinin kimyasal bileşimi.....	28
Çizelge 3.3 Temel 6 yüzlü elemanın 5 ve 6 adet 4 yüzlü eleman bölünmesi	36
Çizelge 3.4 Presin teknik özellikleri	41
Çizelge 4.1 Fırın ön sac parçasının ebatları	47
Çizelge 5.1 Kalınlık ve incelme değerlerinin gerçek deney numune sonuçları ile karşılaştırılması.....	59

1.GİRİŞ

Sanayide uygulanan soğuk sac şekillendirme ve kalıpcılık teknikleri ampirik metotlara dayalı, deneysel ve çok maliyetli yöntemlerdir. Temeli, belirli özellikleri haiz metal esaslı malzemelerin kalıcı olarak biçim değiştirmesine dayanan plastik şekillendirme yöntemleri, gerilme ve şekil değişimi arasındaki ilişkinin çok çeşitli durumlarda incelenmesine olanak sağlaması nedeniyle, plastisite teorisinin hayata geçirilebilen en başarılı uygulamalar arasında sayılmaktadır. Bu yöntemlerden biri olan derin çekme ise sanayide, özellikle düzlemsel metalik sac levhalardan mutfak eşyaları, otomobil sanayi, beyaz eşya sanayindeki parçaların imal edilmesi söz konusu olduğunda, iş ekonomisi, uygulama kolaylığı ve benzeri avantajlar sağlaması nedeniyle oldukça farklı bir yer ve uygulama alanı bulmaktadır. Taşındığı bu öneme karşın gerek sac işleme usulleri ve gerekse derin çekme ile ilgili pek çok mühendislik probleminin pratik matematiksel izahı henüz tam anlamıyla yapılamamış olduğundan plastik şekillendirme yöntemleri, hem bu dalın sanayideki uzmanları, hem de konuyla akademik düzeyde ilgilenenler açısından hâlihazırda oldukça ilgi çeken, çözülmeyi bekleyen ve teori ile pratiği başarıyla kaynaştıran bir mühendislik problemler grubunu teşkil etmektedir. Metalik özellikteki sac malzemenin, çekme kalıbı adı verilen düzeneklerde, zımba yardımıyla kalıcı olarak şekillendirilmesine dayanan bir imalat yöntemi olan derin çekme, geniş bir uygulama alanına sahiptir. Konusu itibariyle gerçek derin çekme işleminin sonlu elemanlar yazılımı olan DYNAFORM sonuçları ile karşılaştırılmasının inceleneceği bu çalışma kapsamında, gerçek ile simülasyon arasındaki farklar ortaya koyulacaktır. Bu doğrultuda derin çekme işleminde meydana gelen deformasyon hatalarından da bahsedilecek ve piyasada kullanılan yazılımların gerçeği ne ölçüde yansıttığı gösterilecektir.

2.GENEL BİLGİLER

2.1.Metallerde Plastik Şekil Değişimi

2.1.1 Metallerin kristal yapısı

Metallerin esas yapısı, atomların üç boyutlu uzayda belirli bir düzene göre dizilmelerinden ibarettir. Sıvı haldeki bir metalin katılaşması sırasında atomların düzenli bir şekilde dizilmeleri sonucunda oluşan yapıya kristal yapı denir (Çapan, 2003). Düzenli diziliş tekrarlı karakterdedir. Bir metalin karakteristik kafes yapısının özelliğinde olan en küçük atom topluluğuna birim hücre denir. Kristal yapı, birim hücrenin tekrarlanması ile meydana gelir. Metallerde en çok rastlanan 3 birim hücre hacim merkezli kübik, yüzey merkezli kübik ve sıkı düzenli hekzagonal olarak adlandırılır.

2.1.2 Metallerin deformasyon mekanizmaları

Metallerde iki çeşit deformasyon mekanizması görülür:

1. Metallerin deformasyonu kristal bloklarının belirli kristalografik düzlemler boyunca birbirleri üzerinden kaymasıyla oluşur. Bu düzlemler kayma düzlemleri olarak adlandırılır. Kayma düzlemleri kristal içerisinde en çok rastlanan düzlem ve yönlerdir. Blok malzemenin kayması kayma düzlemindeki kayma gerilmeleri sonucu oluşur. Eğer kristal mükemmel olsaydı plastik deformasyonu başlatmak için gerekli kayma gerilmesi gerçeğinden yaklaşık 100 katı fazla olurdu. Kayma yapı içerisindeki hatalar (dislocations) sebebiyle mümkün olur. Komple tavllanmış metal için boşluk yoğunluğu $10^6 - 10^8$ boşluk çizgisi/ cm^2 dir. Soğuk şekillendirilmiş metalde $10^{10} - 10^{12}$ boşluk çizgisi/ cm^2 dir. Sıcak şekillendirmedeki sıcaklık yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerindedir. Boşluklar deformasyon sırasında bazı mekanizmalarla sayıca artarlar.

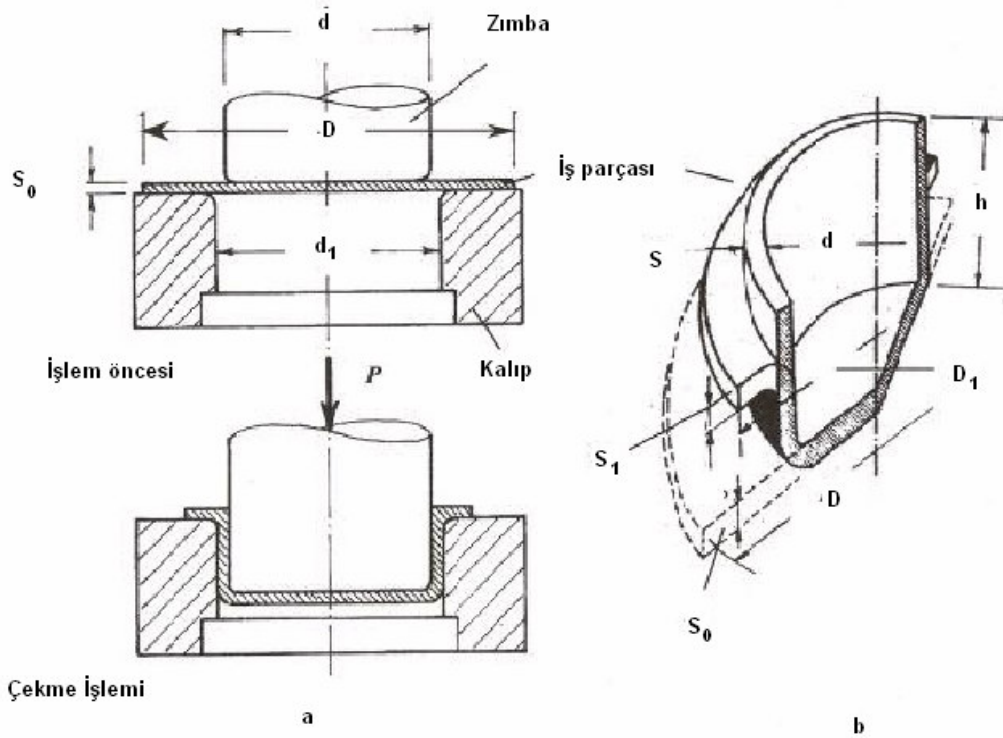
2. İkiz kristal oluşumu ile deformasyon; metallerde ikincil deformasyon mekanizmasıdır. Kristalin ikizleşmemiş örgü ile ayna simetri pozisyonu almasıyla oluşur.

2.2 Şekillendirilebilirlik ve Derin Çekme

Şekillendirilebilirlik, sacın hasara uğramadan istenen şekli alma yeteneği olarak tanımlanır (Çapan, 2003). Bu özelliği saptamak amacıyla Erichsen deneyi gibi çeşitli deneyler uygulanır. Belirli bir derinliğe ve genişliğe sahip üç boyutlu konstrüktif elemanların tek parça halinde üretiminde, imalat tekniği olarak genellikle plastik şekillendirme yöntemleri tercih edilmektedir. Boruların elde edilmesinde kullanılan ekstrüzyon ve otomobil karoseri, motor yağ karteri gibi parçaların imalatında kullanılan derin çekme işlemleri, plastik şekillendirmeye verilebilecek oldukça yaygın örneklerdir. Gelişen teknoloji sayesinde günümüzde artık yalnızca basit yapıları değil, nispeten karmaşık geometriye sahip parçalarında, bunlar ve benzeri konvansiyonel yöntemlerle yapılan bazı ilaveler yardımıyla üretilmesi söz konusu olabilmektedir. Şekil değiştirme sac malzemelere, bunların kalınlık ya da bileşimlerine uygun düşecek biçimde soğuk veya sıcak olarak uygulanabilir. Bununla beraber özellikle ince sac malzemelerde kalınlık azaldıkça yüzey/hacim oranı ve dolayısıyla soğuma hızı artacağından, anılan oranın çok yüksek değerlerde olması durumunda iş parçasını sıcak olarak şekillendirme imkânı ortadan kalkar (Bodur, 1975). Bu nedenle, düşük kalınlıklı şekillenebilir malzemeler söz konusu olduğunda soğuk plastik şekillendirme yöntemlerinin kullanımı gündeme gelmektedir. Metallerde plastik şekil verme yöntemlerinin en yaygınlarından biri olan çalışmamızın da özünü teşkil eden derin çekme işlemi de esas itibarıyla bir soğuk şekillendirme usulüdür.

İki boyutlu düzlemsel geometriye sahip iş parçasının çekme kalıbı denilen elemanlar yardımıyla ve bir zımba vasıtasıyla preste çöktürülmesi ya da bir başka deyişle, iş parçasının çekme kalıbı içine sıvanması sonucunda belirli derinlik ve profillere sahip üç boyutlu parçalar elde edilmesi işlemine pres tekniğinde çekme adı verilir. Çekme yardımıyla elde edilmesi öngörülen derin kaplar, ilerleyen kısımlarda da değinileceği gibi, ancak birden fazla operasyon ile oluşturulabilirler. Bu birbirini takip eden çok

sayıda çekme işleminden oluşan imal usulü ise derin çekme adını almaktadır (Güneş, 1990). Derin çekme içerisinde pot çemberi tarafından sıkıştırılan yassı sac malzemenin erkek tarafından dişinin içerisine yerleştirilmesi esasına dayanan bir işlemdir. İşlem sonucunda elde edilen parçanın sac malzeme kalınlığı işlem başında giren sac malzeme kalınlığına oldukça yakındır. Oluşan parça sac malzemeye göre oldukça mukavemetlidir (Alıcı, 2001).



Şekil 2.1 Derin çekme işlemi, a. Şematik, b. Perspektif (Topaç, 2003).

Şekilden de görülebileceği gibi, başlangıçta S_0 kalınlığı ve D başlangıç çapına sahip düzlemsel, metalik ve şekillenebilir bir levha, d çapındaki bir zımba yardımıyla kalıp (matris) içine çekilmek suretiyle, altı düz, silindirik bir parça haline getirilmektedir. Bu işlem, basitliğinin yanı sıra öteki derin çekme işlemleri içerisinde sanayide en geniş uygulamaya sahip olan silindirik çekme'den başkası değildir.

2.3 Derin Çekme İşlemini Etkileyen Faktörler

2.3.1 Tane boyutu ve levha kalınlığı

Malzemelerin preste şekillendirilebilme kabiliyeti malzemenin prese girmeden önceki kalınlığıyla yakından ilişkilidir. Malzeme kalınlığı artıkça verilebilecek deformasyon miktarı da artar (Altıntaş, 1984). Normalde presleme işleminde kullanılacak levhalar için boşluk gibi iç yapı kusurları kadar yüzey pürüzlülüğü de deformasyon limitine etki eder. Belirli deformasyon miktarı için yüzey pürüzlülüğünün etkisi malzeme kalınlığı azaldıkça artar. Bu nedenle belirli kalınlığın üzerindeki levhalar için yüzey pürüzlülüğünün çok büyük etkisi yoktur. Yüzey pürüzlülüğünün tane boyutuyla doğru orantılı olması nedeniyle deformasyon limitinin tahmininde levha kalınlığının yanı sıra tane boyutu da dikkate alınmalıdır. Malzeme kalınlığının biçimlendirme sınır diyagramının en alt noktası yani düzlem deformasyon koşulunu ifade ettiği bölgeyle ilişkisini vermektedir. Buradan görülebileceği gibi levha kalınlığının etkisi yaklaşık 3 mm kalınlıktan sonrası için sabit kalmaktadır (ASTM E8, 1989).

2.3.2 Ürünün dış şekli

Presleme işleminde önemli bir konu da atıklardır. Bir levhadan istenilen özellikte en fazla parçaya çıkartmak ya da levhayı en etkin şekilde kullanmak istenir. Bununla birlikte levhanın mekanik özelliklerinde yöne bağlı olarak değişim göstermesi bu amaca engel teşkil eder. Eğer şekil verme farklı yönlerde yapılırsa hasar olma olasılığı vardır. Diğer bir faktör ise kenar etkisidir. Eğer kenarlarda fazla yanıklar varsa şekillenebilirlik düşer, özellikle tufal olan kısım şekillendirilen parçanın dış kısmına denk geldiğinde olur. Bıçakların körlenmesi ya da kötü temizlemeden dolayı istenmeyen deformasyon sonuçlarıyla karşılaşılabilir. Aşırı yanmış bölgeler yüksek deformasyona tabii tutulursa çatlaklar oluşabilir (Keeler, 1968). Levha'nın kenar ve artık kısımların yanık ve soğuk işlem nedeniyle tokluğu düşüktür. Bu bölgeler çekme gerilmesine maruz kaldığında çatlamalara neden olurlar. Bu bölgelerin tamamen kaldırılması problemin tamamen çözülmesine yetecektir.

2.3.3 Kalıp tasarımının etkisi

Preste kesmedeki deformasyona olan etki kalıp ve zımba arasındaki küçük bir değişiklikte bile farklı malzeme etkisinden daha fazladır. Eğmedeki açı dikkat edilmesi gereken önemli bir parametredir. Araştırmacılara sıkça gelen bir sorun da zor eğme operasyonlarında daha önceki partilerde daha başarıyla üretim yapılmışken malzemede hasar görülmesidir. Normal olarak bu gibi durumlarda hasarın nedeninin malzemeden kaynaklandığı düşünülmektedir, fakat bu her zaman doğru bir tahmin olmayabilir. Kalıpta dikkat edilmesi gereken diğer tasarım faktörleri ise kalıp derinliği, kalıp yüzey pürüzlülüğü, basınç kuvveti, kalıp ile zımba arasındaki boşluk ve kalıp temizliğidir. Çok derin kalıp çeliğin elastik limitinin aşılmasına neden olur. Yüzey pürüzlülüğünün artması sürtünme kuvvetinin artmasına dolayısıyla malzeme akışının azalmasına neden olur. Sıkıştırma kuvvetinin fazla olması malzeme akışının zorlaştırır ya da engeller ve fazlaca germeye neden olur. Kalıp ile zımba arasındaki açıklık ilişkisi, biçimlendirme sırasında kalıp ile zımbanın üst üste binmesi yada açıklığın fazla olması nedeniyle hedeflenen deformasyonun malzemeye verilememesi gibi sonuçlar doğurur. Kalıbın temiz olması malzemenin zımba üzerinde germe olmadan rahatça şekil almasını sağlar. Kademeli deformasyon işlemlerinde kırılmayı azaltmak için hangi kalıpta değişiklik yapılacağına karar vermek zordur (Keeler, S.P., 1968). Öncelikli yapılan işlemlerdeki kalıp ayarlarının değiştirilmesi son kademelere göre genelde daha basit ve daha faydalı sonuçlar verir. Bu gibi işlemler için bir çarpım faktörü kullanılabilir. İlk kademelerde yapılacak küçük değişiklikler nihai üründe büyük deformasyon oranlarında kendini gösterir.

2.3.4 Yağlama

Derin çekmede yağlama ıstampı kuvvetini küçültmesi, derin çekme oran sınırını yükseltmesi, takım aşınmasını azaltarak ömrünü uzatması ve üretim kusurlarını önlemesi bakımından önem taşır. Yalnızca çekme sacının matrisle temas eden yüzeyi yağlanmalıdır (Çapan, 2003). Yağlayıcı olarak genel uygulamalarda mineral yağlar, sabun çözeltileri, emülsiyonlar, zor koşullarda ise kaplamalar, mum ve katı yağlayıcılar kullanılır.

2.3.5 Kulak oluşumu

Düzlemsel anizotropi derin çekilmiş kaplarda kulak oluşumuna yol açar. Kulak sayısı 2,4 veya 6'dır. Kulaklar, derin çekme işleminden sonra, kabın çevresi boyunca kesilir. Dolayısıyla gerek malzeme kaybına yol açması, gerek ek bir kesme işlemiyle maliyeti yükseltmesi nedeniyle kulak oluşumu olabildiğince önemlidir (Çapan, 2003). Kulak oluşumuna yol açan düzlemsel anizotropi ampirik bir parametre ile ifade edilir ve

$$\Delta R = \frac{R_0 - 2R_{45} + R_{90}}{2} \quad (2.1)$$

Denklemlerle hesaplanır. Düzlemsel anizotropi parametresi ΔR , sacın haddeme doğrultusuna göre kulakların konumunun belirlenmesini sağlar. ΔR büyüdükçe kulak yüksekliği de artar. $\Delta R = 0$ için kulak oluşumu görülmez.

2.3.6 Malzeme içeriğinin etkisi

Üretim açısından sacların en önemli özellikleri dayanımları ile şekillendirilebilme yetenekleri olmakla birlikte, bunlar içinde şekillendirilebilme yetenekleri daha baskın kabul edilmektedir. Bu özellikler malzemenin kimyasal birleşimi, döküm tekniği ve soğuk-sıcak haddeme ile uygulanan ısıl işlemlerden oluşan termo-mekanik geçmişi tarafından kontrol edilmektedir (Alıcı, 2001).

2.3.7 Akma uzaması

Belirgin akma gösteren malzemelerde, gerilme üst akma sınırından alt akma sınırına düştükten sonra, alt akma sınırı boyunca gerilme yeniden yükselme başlayana kadar oluşan uzamaya akma uzaması denir (Çapan, 2003). Üst akma sınırında, gerilme yığılması olan bir noktada, malzemede plastik şekil değişimine uğramış bir bant oluşur. Gözle görülebilen bu bantın oluşmasıyla birlikte gerilme alt akma sınırına düşer ve akma uzaması boyunca bant deney çubuğu üzerinde yayılır. Çoğunlukla çeşitli

noktalarda gerilme yığılması olduğu için oluşan bant sayısı da birden çoktur. Genel olarak çekme doğrultusu ile yaklaşık 45° açı yapan bu bantlara Lüders-Hartmann bantları denir. Lüders-Hartmann bantları ürünün yüzey görünümünü bozdukları için malzemenin belirgin akma göstermesi önlenmeli veya akma uzaması küçültülmelidir. Bu amaçla sac soğuk haddelenerek kalınlığı çok az düşürülür. Bu işleme temper haddemesi denir. Temper haddesinden sonra saclar şekil değişimi yaşanmasına uğramadan imalata alınmalıdır. Aksi halde, depolamada belirli bir süre aşılırsa belirgin akma ve dolayısıyla Lüders-Hartmann bantları yeniden görülür.

Basit olarak her noktasında simetri olan üç ortogonal düzleme sahip anizotropi bölgesi dikkate alınır, bu düzlemlerin kesişmesi bize anizotropinin asal yönünü verecektir. Bu yön, farklı numuneler için değişebilir. Örneğin; eğer anizotropi üniform iç basınçlı bir tüp'e uygulanıyor ise asal eksenler radyal, çevresel ve boyuna yönlerde olmak zorundadır. Soğuk haddelenmiş bir levhanın ortasından kesilen bir parça üniform yönlenmiş anizotropiye güzel bir örnektir. Levhada asal eksenler hadde yönünde, hadde yönüne dik yönde ve levha düzlemine dik yönde olduğu tahminler doğrultusunda gözlenmiştir. Ayrıca asal yönler sürekli deformasyon sırasında basit kayma farklılıkları nedeniyle malzemedeki malzemeye nispeten farklılıklar gösterebilir. Malzememizi belirli anizotropik seviyede ve asal eksenleri de Kartezyen koordinatlar yönünde seçelim. İzotropik malzemelerin akmasını yaklaşık olarak tanımlayan kriter Von Mises'tir. Anizotropi yok denecek kadar az olduğunda malzemeler için basit akma kriteri Von Mises kanununa indirgenerek kabul edilebilir (Gündü, 2000). Uygulanan metod bu hipotez doğrultusunda yapılacak ve gerekirse daha sonra genellenecektir. Bu durumda akma kriteri kuadratik gerilme bileşenlerinde kabul edilirse aşağıdaki şekilde olacaktır;

$$2f(\sigma_{ij}) \equiv F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{zx}^2 + 2N\tau_{xy}^2 = 1 \quad (2.2)$$

Burada F, G, H, L, M ve N o bölgedeki anizotropinin karakteristikleridir. Kuadratik terimim her bir kayma gerilmesinin çizgisel görünüşünün simetri sınırlamasıyla bakıldığında elimine edilmesini ifade eder. Sonuç olarak normal bileşenlerin farklılıkları özel bir durum olan hidrostatik basıncın akmaya etki etmemesi durumunda görülebilir.

Akma kriterinin bu şekli sadece anizotropi asal eksenlerin referans alınan eksenlerde olması durumu için geçerli olduğunu hatırlatmakta fayda var. Aksi halde akma kriteri gerilme bileşenlerinin dönüşümüyle bulunabilir (Gündü, 2000).

Eğer $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ anizotropinin asal yönlerde çekmedeki akma gerilmeleri ise;

$$\begin{aligned} 1/\sigma_x^2 &= G + H, \quad 2F = 1/\sigma_y^2 + 1/\sigma_z^2 - 1/\sigma_x^2 \\ 1/\sigma_y^2 &= H + F, \quad 2G = 1/\sigma_z^2 + 1/\sigma_x^2 - 1/\sigma_y^2 \\ 1/\sigma_z^2 &= F + G, \quad 2H = 1/\sigma_x^2 + 1/\sigma_y^2 - 1/\sigma_z^2 \end{aligned} \quad (2.3)$$

Buradan görülebileceği gibi yalnızca F, G, H terimlerinden yalnızca biri negatif olabilir, bu durum yalnızca akma gerilmelerinin çok farklı olduğu koşullarda mümkün olabilir. Ayrıca $F \geq G$ durumu sadece ve sadece $\sigma_x \geq \sigma_y$ koşulunda sağlanır. Eğer R, T, S anizotropinin asal yönlerinde kaymadaki akma gerilmeleri ise;

$$2L = 1/R^2, \quad 2M = 1/S^2, \quad 2N = 1/T^2. \quad (2.4)$$

L, M, N zaten pozitifdir. Eğer anizotropik bir malzemenin z- ekseninde rotasyonel bir simetri varsa ise, (6.10) nolu denklemdeki rasgele seçilmiş (x,y) eksenleri değişmez. Bu durumda (6.10) nolu denklem alternatif olarak şöyle yazılabilir:

$$\left[(G+H)\sigma_x^2 - 2H\sigma_x\sigma_y + (F+H)\sigma_y^2 + 2N\tau_{xy}^2 \right] - 2(G\sigma_x + F\sigma_y)\sigma_z + 2(L\tau_{yz}^2 + M\tau_{zx}^2) + (F+G)\sigma_z^2 = 1 \quad (2.5)$$

Diğer eksenleri alırsak (x', y', z') , z'-ekseni, z- eksenine çakışırken, x'- eksenini x- eksenine θ açısı yapar. Bu denklem dönüşümleri şöyledir.

$$\sigma_z = \sigma_{x'} \cos^2 \theta + \sigma_{y'} \sin^2 \theta + 2\tau_{x'y'} \sin \theta \cos \theta, \quad \sigma_z = \sigma_{z'}, \quad (2.6)$$

$$\sigma_y = \sigma_{x'} \sin^2 \theta + \sigma_{y'} \cos^2 \theta - 2\tau_{x'y'} \sin \theta \cos \theta, \quad (2.7)$$

$$\tau_{xy} = (\sigma_{y'} - \sigma_{x'}) \sin \theta \cos \theta + \tau_{x'y'} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta), \quad \tau_{zx} = \tau_{y'z'} \sin \theta - \tau_{z'x'} \cos \theta. \quad (2.8)$$

buna göre dönüşümden sonra $\sigma_{z'}, -2(G\sigma_{x'} + F\sigma_{y'})$ 'ne eşit olmalıdır. Buradan açıktır ki $F=G$ bulunur. $\sigma_{x'}\tau_{x'y'}$ ve $-\sigma_{y'}\tau_{x'y'}$ eşittir. $4(F+2H-N)\sin\theta\cos\theta(\cos^2\theta - \sin^2\theta)$. (6.17)
Tüm bu değerlerini elimine etmek için $(F+2H-N)$ değerinin sıfıra eşit olması gerekir. $\sigma_{x'}^2, \sigma_{y'}^2$ ve $\sigma_{x'}\sigma_{y'}$ ifadelerinin katsayıları sabit olursa yukarıdaki yaklaşım sağlanabilir. Son olarak $\tau_{z'x'}\tau_{y'z'}$ teriminin eliminasyonu sadece ve sadece $L=M$ durumunda olabilir.

Aynı zamanda bunun için $\tau_{y'z'}^2$ ve $\tau_{z'x'}^2$ 'nün katsayıları da sabit olmaktadır. Sonuç olarak anizotropinin z- ekseninde rotasyonel simetriye sahip olması için gerek ve yeter şartlar;

$$N=F+2H=G+2H, \quad L=M \quad (2.9)$$

Eğer komple küresel simetri, yani izotropi varsa;

$$L=M=N=3F=3G=3H$$

Ve eğer $2F$ eşit $1/\sigma_y^2$ ise (6.10) nolu denklem Von Mises kriterine indirgenmiş olur.

Bir malzemede anizotropinin tüm seviyelerini göstermek için asal eksenlerinin yönünü ve bağımsız altı akma gerilmesini $(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, R, S, T)$ değerini bilmek gerekir. Bu etmenler malzemenin İzotropik olması durumunda mekanik ve ısıl işlemlerin fonksiyonu şeklinde ifade edilmelidir ve genelde aşırı deformasyonlar sırasında değişir. Akma gerilmelerinin kantitatif olarak mikro yapıyla nasıl bir ilişkisi olduğu halen bilinmemektedir (Gündü, 2000). Örneğin tercihli yönlenme derecesiyle, ve buna rağmen deneysel yolla tahmin edilmek zorundadır.

2.3.8 Pekleşme üsteli

Bir sacın uygulanan gerilmedeki artış ile plastik şekil değişimi sırasındaki sertleşme yeteneği, soğuk şekillendirilebilirliğini etkileyen en önemli malzeme özelliğidir. Yerel olarak plastik şekil değişimine uğrayan bir bölgede, burada oluşacak pekleşmeden dolayı dayanım artacağından, bu bölgedeki şekil değişimi durur ve parçanın diğer komşu bölgelerinde plastik şekil değişimi başlar. Bu şekilde pekleşmeden dolayı daha

fazla üniform şekil değişimi elde edilerek, parça daha geç hasara uğramaktadır. Şekil değiştirme sertleşmesi (pekleşme), çok kısa olarak deformasyon sırasında dislokasyon yoğunluğundaki artış ve artan dislokasyonların gerek birbirleri gerekse başka engellerle etkileşmesi ile açıklanmaktadır. Çekme deneyinde malzeme maksimum yüke kadar üniform olarak şekil değiştirir. Üniform şekil değişimi, sacın pekleşme yeteneğinin bir ölçüsüdür (Alıcı, 2001). Diğer bir kriterde pekleşme üsteli (n) değeridir. Çekme deney sonucunda elde edilen akma eğrisindeki plastik şekil değişimi ile gerilme arasındaki ilişki, Holloman bağıntısı olarak bilinen

$$\sigma = C.\varepsilon^n \quad (2.10)$$

Fonksiyonu ile tanımlanmaktadır. Bu eğriye göre logaritmik gerilme-birim şekil değişimi diyagramındaki doğrunun eğimi pekleşme üsteli (n) olarak ifade edilmektedir. Pekleşme üsteli değerini arttıran mikro yapısal özellikler, metalin şekil değişiminin daha iyi dağılımı daha yüksek sınır şekil değişimleri sağlayarak sacın şekillendirilebilirliğini iyileştirir. Yeniden kristalleşen yapılar düşük akma dayanımları ve yüksek pekleşme kapasitesi gösterirler.

2.3.9 Plastik anizotropi

Malzemenin her elemanının İzotropik kalacağı kabulü deformasyonun sürekli olması halinde kötü bir yaklaşım sayılabilir. Bir kristalin taneleri deformasyonun en yüksek olduğu yönde yönelmiştir ve numunenin tekstürü fibersi yapıda görülür. Bu işlem kayma prosesi sonucu tek kristalin deformasyon yönünde dönmesiyle olur. Bu yaklaşımla deforme edilen bölgedeki kristallerin hareketiyle yönelme karakteristiği oluşur. Örneğin; hekzagonal tek kristallere çekme kuvveti uyguladığında kristallerin taban düzlemleri yükün uygulandığı yöne döner. Benzer şekilde çok kristalli malzemelerin taneleri de bazı limitlerin dahilinde yönelme doğrultusuna dönme eğilimindedir. Çok kristalli malzemelerin deformasyonunda oluşan taneler arası deformasyon etkileşimi tek kristallerdeki gibi tanelerin rahatça dönmesine izin vermez. Bu açıklama doğrultusunda her iki tarafı da yağlanmış yüzey merkezli kübik yapıdaki

plakada yüzey dayagonelleri sıkıştırılmaya paralel yöndeki doğrultuya dönme eğilimindedir. Bu mekanizmayla, eğer bir metalin taneleri rastlantısal olarak farklı yönlerde yönlenmiş ve böylece İzotropik karakterde ise bu malzeme deformasyon sonucu anizotropik olur (Gündü, 2000). Yönlenme taneler arasında dağılım gösterir, (örneğin yüzdesel ölçülmüş şekliyle) bir veya daha çok maksimum vardır. Maksimum yüzdedeki tanelerin konumu malzemenin tercihli yönünü belirler. Eğer tek kristaller rastlantısal olarak farklı yönlerde dağılmamış ise akma gerilmesi ve makroskopik gerilme-% şekil değiştirme ilişkisi yöne bağımlı olarak farklılık gösterir. Örneğin yüksek oranda soğuk çekme deformasyonuna uğratılmış pirinç malzemenin çekme deneyi sonucunda hadde yönüne dik yönde ölçülen akma gerilmesi akma mukavemetinden yaklaşık 10 kat daha fazla bulunmuştur. Malzemedeki kristal yapının son şeklini belirleyen bir dizi mekanik ve ısı işlemlerin sırası ya da oranı yönlenmede büyük farklılıklar oluşturabilir. Örneğin; bir bakırı haddeleyecek olsak, farklı deformasyon miktarlarında levha kenarlarına paralel yönde olacak tanelerin oranı değişecektir. Anizotropi olayına teorik olarak açıklamak için genel olarak tanelerin farklı yönlenmesinden dolayı oluşan iç gerilmeleri tahmin edelim. Bu etkiler tercihli yönlenmeyi etkilemeyecek şekilde yumuşatma tavlamaıyla giderilebilir. Yönlenmeyi değiştirmek için ısı işlem sıcaklığı yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerinde seçilmelidir.

2.3.10 Kalıntı gerilmeler

Sacların şekillendirilmesi sırasında üniform olmayan şekil değişimi nedeniyle üründe kalıntı gerilmeler doğar. Dengeleri bozulduğunda kalıntı gerilmeler parçanın çarpılmasına yol açar. Yüzeydeki çekme kalıntı gerilmeleri ise, giderilmedikleri takdirde, gerilmeli korozyon çatlamasına neden olabilir (Çapan, 2003).

2.3.11 Geri yaylanma

Bükülen parça üzerinden bükme kuvveti kaldırıldığı takdirde parça bir miktar elastik şekil değiştirir ve sonuçta bükme açısı küçülür, bükme yarıçapı ise büyür (Çapan,

2003). Bu olaya geri yaylanma denilmektedir. Geri yaylanmanın giderilmesi amacıyla çeşitli yöntemler uygulanır. Bunlardan biri sacı gereğinden biraz fazla bükmeektir. Böylece geri yaylanmadan sonra istenen bükme açısı elde edilir. Bu yöntemde parçanın ne kadar fazla büküleceği deneme-yanılma yoluyla bulunur. Geri yaylanmanın önlenmesi için uygulanan bir diğer yöntemde bükme alanına ıstampanın burnu ile bastırarak bu alanda yüksek basma gerilmeleri doğurmaktır.

2.3.12 Elastiklik modülü

Malzemenin elastik davranışını belirleyen en önemli faktördür. Özellikle akma dayanımı ile birlikte bükme işlemlerinde karşılaşılan problemlerin analizinde önemli rol oynamaktadır. Geri yaylanmayı kontrol eden elastik şekil değişimleridir.

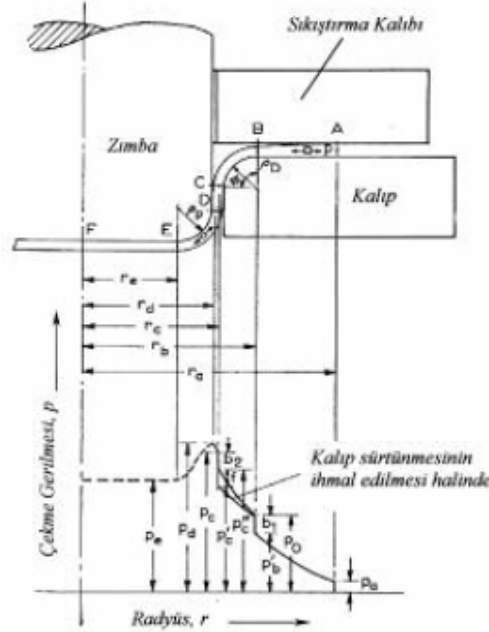
2.4 Derin Çekme Takımları ve Presleri

Derin çekmede kalıp malzemesi olarak en çok takım çelikleri ve alaşımli dökme demirler kullanılır. Matrislerde sert metallerden de faydalanılmaktadır. Derin çekmede daha çok çift tesirli hidrolik presler kullanılır. Böylece iş parçası ıstampa hızında derin çekilebildiği gibi pot çemberi ve ıstampanın birbirinden bağımsız olarak kontrol edilmesi de sağlanmaktadır. Bu arada derin çekmenin mekanik preslerde de yapıldığı belirtilmelidir (Çapan, 2003). İstampa hızları 0,1...0,3 m/s arasında alınırsa yüksek dayanımlı metallere için düşük hızların seçilmesi uygun olur.

2.5 Sac Parçasında Gerilme Bölgelerinin Tespit Edilmesi

Çekme sırasında iş parçası bünyesinde meydana gelen olayları daha iyi anlayabilmek için, işlem boyunca parçada ortaya çıkacak gerilmelerin iyi analiz edilmesi gerekir. Bununla birlikte çekme işlemi gerçekte oldukça karma bir plastisite problemdir. Bu nedenle bu türdeki işlemlerin en basiti sayılan silindirik çekme için dahi henüz

kullanışlı pratik formüller ortaya konamamış olup (Topaç, 2003) hâlihazırdaki uygulamaların çoğu ampirik yaklaşımlara dayandırılmaktadır.

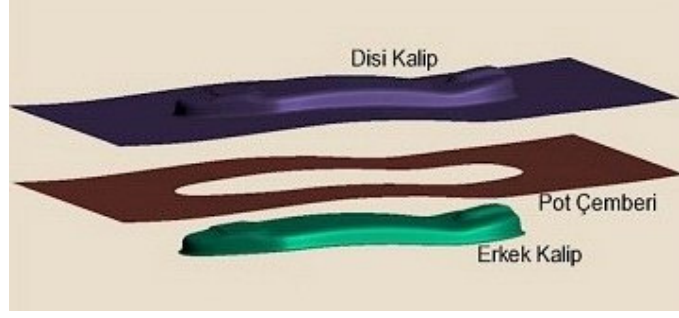


Şekil 2.2 Derin çekme işlemi boyunca çapa bağlı olarak iş parçası bünyesinde meydana gelecek gerilme değişiminin seyri (Topaç, 2003).

2.6 Derin Çekme İşlemlerinde Sonlu Eleman Simülasyonlarının Önemi

Metallerin soğuk şekillendirilmesi, kalıp içerisinde metale akma gerilmelerini aşan gerilmelerin uygulanmasıyla kalıcı (plastik) şekil verdirilerek yapılır. Kalıbın yüzeyleri elde edilmesi istenilen ürüne uygun olarak işlenmiştir.

Metal olarak, kalınlığının diğer iki boyutunun yanında çok küçük kalmasından dolayı sac şekillendirme, metal şekillendirmenin özel bir halini teşkil eder. Sac şekillendirmenin önemli bir karakteristiği, şekillendirmede sac yüzeyine dik yöndeki gerilmenin sac yüzeyi içerisindeki gerilmeye göre çok küçük olması, sayısal çözümlemede bazen ihmal edilmesidir (İnt.Kyn. 1).



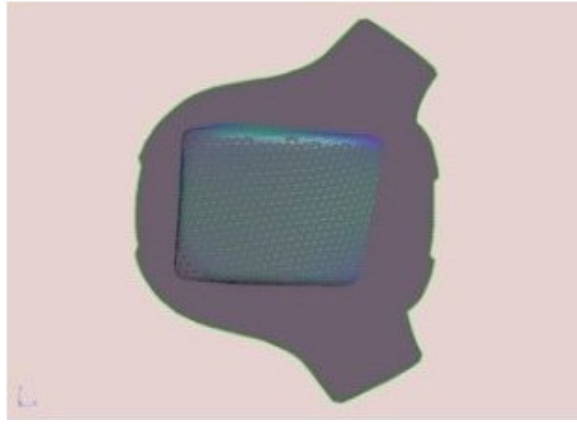
Şekil 2.3 Simülasyon için kalıp elemanlarının tanımı (İnt.Kyn. 1).

Otomotivde en fazla uygulanan sac şekillendirme yöntemi olan Derin Çekmede ilk hareket olarak sac, kalıbın Pot Çemberi (Blankholder) ve Dişi (Die) elemanları arasında Pot Çemberi baskısı ile tutulur (Şekil 2.3). Bu baskı kuvveti ile tutma, kalıcı şekillendirme sırasında sacta oluşacak kırışmaları engellemek ve sac akışını kontrol etmek için gereklidir (İnt.Kyn. 1). Daha sonra Erkek kalıp (Punch) sacı dişiye doğru çekerek strok sonunda istenilen şekli verir. Strok sırasında sacta kendi yüzeyi içerisinde her an değişen basma ve çekme gerilmeleri oluşur. Bu gerilmelerle sac şekil alırken aynı zamanda malzeme özelliklerinin değişimi_pekleşme (stress hardening)_ ve kalınlık değişimleri oluşur. Sığ parçalarda, bükülme/burkulma dayanımını arttıran pekleşmeyi verecek uzamalar oluşabilmesi için pot çemberi baskı kuvvetini oldukça yüksek uygulamak gerekir. Pot Çemberi üzerinde süzme kanalları ve erkek kalıp üzerinde ek olarak yapılan girinti/çıkıntı şekilleri sac akışının ve uzamalarının kontrolünde kullanılan çok önemli unsurlardır. Süzme kanallarından geçerken sacın, kanal profilinin üzerinden deforme olarak geçmesi ek bir tutma etkisi yaratır. Diğer bir parametre de kalıp ile sac arasındaki sürtünmedir. Son yıllarda otomotivdeki sac parçaların imalatında hafif metallerin (alüminyum) kullanımı, kaynaklı saclar (tailored blanks) ve hydroforming gibi araçta hem hafifleme ve hem de daha fazla mukavemet sağlayacak yöntemlere doğru bir eğilim vardır.

Sac derin çekme işleminde sacın istenen şekli yırtılma, kırışma ve formda bir sapma olmadan alması proses, sac ve kalıp parametrelerine bağlıdır. Şekillendirilmiş sacın geriye yaylanması (springback) kalıp açıldıktan sonra sacta kalan elastik gerilmelerden dolayı tersine hareketinden kaynaklanır (İnt.Kyn. 1). Şekillendirme sırasında kalıp

yüzeyindeki hatalardan ve/veya küçük radius formlarından dolayı sacta oluşan izler ve sactaki portakallaşma da parçanın kalitesini etkileyen diğer noktalardır. Sacın kalıptaki akışı malzemenin anizotropiklik özelliğinden ve sürtünme koşullarından etkilenir.

Sac şekillendirmeye etkileyen tüm bu etkenler konusunda geniş bir bilgiye sahip olmadan yapılan kalıp imalatı sonrasında istenilen parçayı kaliteli olarak elde edebilmek için, oldukça uzun bir süre alan, hatta bazen kalıpların yeniden dizaynına kadar gidebilen bir deneme-yanılma süreci yaşanır. Maliyeti oldukça yüksek olan bu süreci azaltmak/tamamen yok etmek, optimum kalıp yüzey dizaynını daha imalata geçmeden belirlemek için bilgisayarda sayısal simülasyonlar, son yıllarda başarıyla kullanılmaktadır.



Şekil 2.4 One-Step Çözüm ve Açınım (İnt.Kyn. 1).

Sayısal sac şekillendirme simülasyonlarının ilk yararı daha parçanın dizaynında başlar. Yeni araç tasarımında, parçanın tanımlanması aşamasında sorunsuz şekillendirilebilirliğinin görülmesi, proses ve kalıp dizaynından önce açınım ölçüsü ve şekillendirme kuvveti gibi değerlerin bilinmesi, imalat sırasındaki maliyetleri çok büyük oranda azaltacaktır (İnt.Kyn. 1). Parçanın fizibilitesi ve ilk tasarım amaçları için şekillendirme işlemini tersten ve tek adımda çözen (One-Step) sayısal yöntem, hassasiyeti bir miktar düşük olmakla beraber yeterli ve ucuzdur (Şekil 2.4).

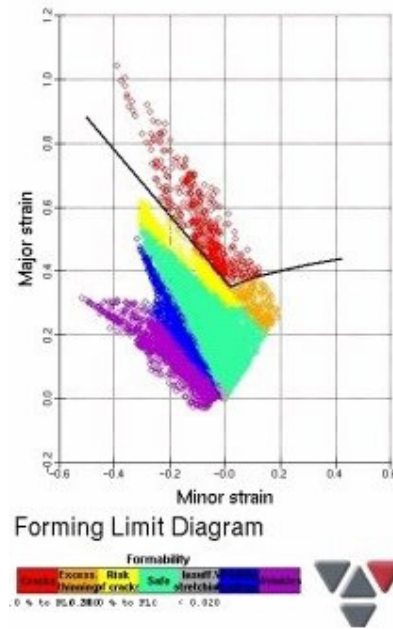
Sac şekillendirme sayısal çözümlerinde en başarılı olan yöntem, şekillendirme sırasında sacın durumunu belirleyen denklemlerin zamanda integrasyonu (zaman adımları) üzerine kuruludur (İnt.Kyn. 1). Zaman adımlarındaki çözüm de 2 farklı metotla yapılır; implicit ve explicit çözüm metotları. Son yıllarda implicit yöntem, explicit kadar hassasiyet sağlaması yanında hız avantajı ile daha büyük zaman adımlarına izin vermektedir.

DynaForm (DF), explicit yöntemle çözüm yapan, tamamen sac şekillendirmeye odaklanarak geliştirilmiş, hassasiyet olarak en iyi sonuçları veren, hız olarak rakipsiz sac şekillendirme simülasyonu yazılımdır (İnt.Kyn. 1). Bugün, özellikle otomotiv sanayinde, sac şekillendirme konusunda bir standart haline gelmiştir. Kalıp yüzeylerinin oluşturulması ve optimizasyonu, kesme/açınım hatlarının optimizasyonu, açınımların ruloya minimum maliyetle yerleştirilmesi (nesting) gibi modülleri de içeren DF, kalıpcının proses geliştirme ve yüzey tasarımına ait birçok ihtiyacına çözüm olmaktadır. Yazılım, giderek ilk parça tasarımından kalite ve maliyet olarak optimize imalat operasyonları ve kalıp yüzeylerinin elde edilmesine kadar olan alanı tamamen kapsamaktadır.

Sac Şekillendirme Simülasyonunda Input olarak, parça ve/veya kalıp geometrisi, kalıbın elemanlarının (erkek, dişi, pot, kam1,2...) tanımı, pozisyon ve strokları, sac ve kalıp arasındaki sürtünme katsayısı, sonlu elemanlara özgü karakteristikler (eleman tipi, büyüklüğü, zaman adımları...) ile açınım ölçüsü/konturu ve sac malzeme karakteristikleri verilmelidir. Malzeme tanımı içerisinde elastisite modülü, poisson oranı, özgül ağırlık, anizotropi katsayıları yanında en önemlisi, malzemenin plastik alandaki davranışını gösteren akma eğrisi veya denklemi (yaklaşım) bulunmaktadır (İnt.Kyn. 1). Plastik alanda sacın davranışını veren eğri kullanılan malzemenin test edilmesi ile elde edilir veya bu imkan yoksa en iyi ifade edecek denklem kullanılır. Bunun için kullanılacak en basit denklem, elastik alandaki $\sigma = E \cdot \epsilon$ yerine $\sigma = K \cdot (\epsilon_p)^n$ (Ludwik) haline gelen üstel denklemdir. Farklı malzemeleri ifade etmek için daha fazla katsayılı ve çok daha karmaşık denklemler de ortaya konmuştur. Ayrıca malzeme ile ilgili olarak, uzama limitlerini belirten Forming Limit Diyagramı, sacın şekillendirme sırasındaki durumunun kontrolü için gereklidir.

DynaForm simülasyon sonuçları, sacın operasyonlar sonrası durumunu inceleyebileceğimiz oldukça geniş post değerlerini kapsar. Kalınlık, % incelmeye, kırışma çıktıkları olduğu gibi, kalıp elemanlarına gelen kuvvetleri (Punch, Die forces) almak, iz oluşma olasılığı ve bir hattın takibini yapmak mümkündür. Sacın durumunun değerlendirildiği en önemli veri Forming Limit Diyagramıdır.

Sac, şekillendirme sırasında geometriye ve kalıp elemanlarının çalışma tarzına göre farklı yönlerde farklı miktarlarda uzar. Örneğin kalıba giren açınım olarak kesilmiş ilk sacın, çember olarak çizilen şekiller formalama sonrası elips şekiller olarak çıkacaktır. Bu elipslerin uzun ve kısa eksen doğrultuları her bir elips için farklı yönleri gösterecektir (geometri, anizotropi... etkileri). Sacın yırtılma olmadan uzayabileceği limitler (%uzama) sabit bir değer olmayıp, farklı doğrultulardaki uzama durumuna (elipsin pozisyonu ve uzun/kısa eksen değerleri) bağlıdır (İnt.Kyn. 1). Bu durum dikkate alınarak çizilen min. Strain - max. Strain diyagramı Forming Limit Diyagramı olarak anılır ve sacın durumu elemanların bu diyagramdaki yerine göre değerlendirilir.

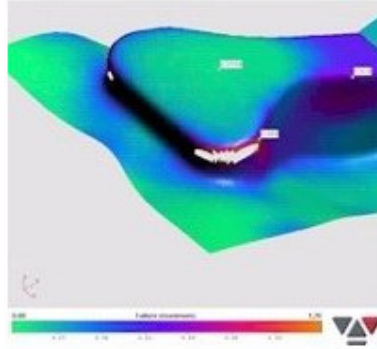


Şekil 2.5 Elemanların FLD'de dağılımı (İnt.Kyn. 1).

Bir sacın simülasyonundan sonra ise elemanların Forming Limit Diyagramındaki görünümü Şekil 2.5'deki gibi olacaktır. Görülen siyah eğri, minör uzamalara göre

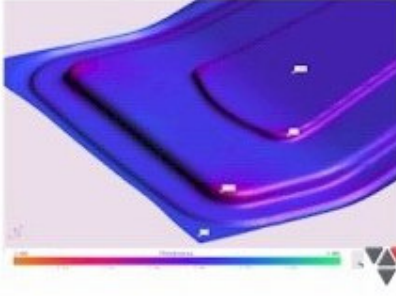
yırılmadan gerçekleşebilecek max. uzamanın değişimini göstermektedir ve sac tanımında verilmesi gereken bir bilgidir (İnt.Kyn. 1). Bu eğrinin üzerinde kalan kırmızı elemanlar yırtılma (failure) bölgesini hemen altındaki sarı renk yırtılma riskinin bulunduğu, yeşil renk yeterli gerilmenin bulunduğu kaliteli çekme bölgesini, mavi kırışmaya eğilim ve mor kırışma bölgesini belirtmektedir. Mor bölgelerin negatif minör strain (basma) mutlak değerlerinin major strain'den büyük olduğunu, yani 45 derece hattının altı olduğunu görebiliriz.

Uzama dağılımları sac üzerinde sürekli bir şekilde renklendirilmiş olarak da Şekil 2.6'deki gibi elde edilebilir.



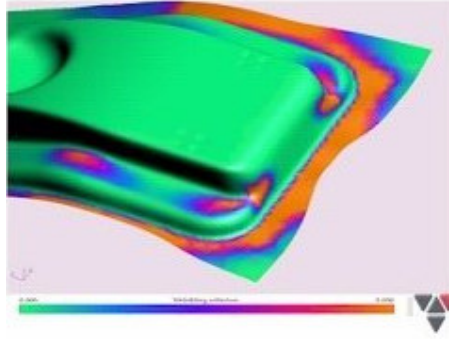
Şekil 2.6 Sac üzerinde uzama dağılımları ve yırtılmanın görünümü (İnt.Kyn. 1).

Çekilen sacın kalitesi için sac elemanı, forming limit diyagramı eğrisine belirli bir emniyet payından daha fazla yaklaşmamalı diğer yandan da pekleşme sağlanması için belirli bir min. çekmeye de uğramış olmalıdır. Sacın bu FLD'de istenen bölgesi (yeşil renkli) şu şekilde sınırlanmaktadır (İnt.Kyn. 1). Major Strain'in Minör Strain mutlak değerinden büyük olduğu (kırışma limiti), Major Strain min. değerinin %2'den büyük olduğu (yeterli çekme (buckling) limiti) ve Major Strain'in failure eğrisine en fazla kopma değerinin %20'si (aşırı incelleme ve yırtılma riski limiti) kadar yaklaştığı alan.



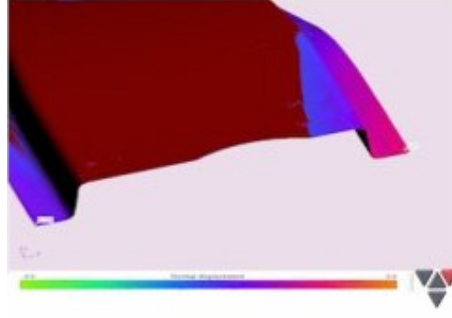
Şekil 2.7 Kalınlık Dağılımı (İnt.Kyn. 1).

Kalınlık (Thickness) Dağılımı ve İncelme (Thinning) değerleri iki ayrı çıktı tipi olarak ayrı ayrı alınabilir (İnt.Kyn. 1). Thinning, % incelme değerleri olarak elde edilir, yani -0.25 değeri %25 incelmeyi ve pozitif değerler de kalınlaşmayı gösterir (Şekil 2.7). Bu şekilde izin verilen incelme oranının aşılmış aşılmadığı kolayca görülür.



Şekil 2.8 Kırışma Kriteri Dağılımı (İnt.Kyn. 1).

Kırışma, FLD diyagramında minör strain mutlak değerinin majör strain'den yüksek olduğu bölgeye düşen elemanların durumudur. AF'da sacın deformasyon durumu dikkate alınarak kırışma kriteri (wrinkling criterion) değeriyle kırışma potansiyeli olan bölgeler belirlenir (İnt.Kyn. 1). Ayrıca ikinci bir yöntem olarak eigenvalue/eigenvector analizi ile kırışma bölgeleri bulunup enerjinin minimizasyonu prensibiyle de kırışma yüksekliği bulunur (Şekil 2.8).



Şekil 2.9 Geri Yaylanma Sonrası Parça ve Orijinal Yüzeyler (İnt.Kyn. 1).

Springback, sacın şekillendirilmesi sırasında kalan elastik gerilmelerin kalıbın açılması sonrası sacın deformasyona yol açması ile olur (Şekil 2.9). Herhangi bir noktadaki geri yaylanma değeri sorgulanabilir, seçilen bazı noktalardan parça üzerine oturtup diğer noktalarda farkına bakılabilir, geri yaylanma sonucu parça mesh olarak export edilebilir (İnt.Kyn. 1). Önümüzdeki yıllarda hem geri yaylanma çözümlerinde, hem de telafi için ters deformasyonu otomatik olarak yapma konusunda önemli ilerlemeler beklenmektedir.

2.7 Literatür Araştırması

Literatürde derin çekme işlemini etkileyen faktörlerin, araştırılmasına yönelik bir çok deneysel ve nümerik simülasyon çalışmaları mevcuttur. Bunlardan bir kaçısı aşağıdaki gibidir.

Topaç (2003), farklı geometrideki iş parçalarında işlem sonrası meydana gelen pekleşme, tane yönlenmesi ve benzeri malzeme olaylarının, bu parçaların muhtelif bölgelerindeki çekme dayanımı, akma sınırı, sertlik gibi bazı özelliklerde meydana getirdiği değişimleri deneysel olarak incelemiştir.

Kırlı (2003), çekme, derin çekme form kalıpları gibi malzemenin yüksek deformasyona uğradığı veya kompleks yüzey geometrileri içeren parçalarda, şekillendirme sonucu parçanın ne şekil alacağını belirlemek için bir hafif ticari aracın süspansiyon traversinin sonlu elemanlar yöntemiyle non-lineer analizini gerçekleştirmiştir.

Gavas ve Yaşar (2006), metal akışını kontrol etmek için baskı plakası boşluğu sistemi kullanarak verilen takım geometrisine göre Al-1050 kare derin çekmede çekme oranı limiti ve maksimum çekme yüksekliğini deneysel olarak belirlemiş ve kabın duvar kalınlığını ANSYS programını kullanarak oluşturduğu teorik modellerden elde ettiği verilerle karşılaştırmıştır.

Demirci ve arkadaşları (2005), baskı plakasının cidar kalınlığına etkisini araştırmak amacıyla non-lineer eksplicit sonlu elemanlar yöntemini (ANSYS LS-DYNA programını) kullanarak temas modelini, malzeme özellikleri (Al 1050) ve Coulumb sürtünme katsayısını kullanarak simülasyonlar gerçekleştirmişler ve elde ettikleri sonuçlarla deneysel sonuçlarının % 90 uyumlu olduğunu saptamışlardır.

Karalı (2006), derin çekme işleminde Etial 5 alüminyum sac levha malzeme modelinden faydalanarak sonlu elemanlar programlarından Marc-Mentat'ı kullanarak kalıp geometrisinin kap üzerindeki etkilerini incelemiştir.

Mamalis ve arkadaşları (1998), silindirik kapların derin çekme işleminde 3 boyutlu sonlu eleman modeli yapmış ve zımba hızı, sac metal yoğunluğu, takım ile sac parçası arasındaki Coulomb sürtünme katsayısı ve sonlu eleman ağ elemanlarının tipi ve boyutları gibi farklı simülasyon parametrelerini kullanarak simülasyonlar gerçekleştirmiştir. Bunun sonucunda ekspilisit sonlu eleman kodlarının sac metal şekillendirme simülasyonlarında güvenilir kullanılabileceğini göstermişlerdir.

Kim ve Hong (2006), Molibden sacının çok adımlı derin çekme işleminin sonlu elemanlar simülasyonuna dayanan non-linear işlem optimizasyonunu yapmışlardır.

Gantar ve arkadaşları (2005), derin çekme işlem stabilizesinin değerlendirilmesini ve artırılmasını sağlamak için optimizasyona dayanan sonlu eleman simülasyonunu yapmışlardır.

Lingbeek ve arkadaşları (2005), derin çekme işlemlerindeki ana problemlerden birisi olan geri esnemenin telafisi için 2 farklı optimizasyon yöntemiyle ve sonlu eleman yöntemini kullanarak simülasyonlarını yapmışlardır.

Weili ve arkadaşları (2002), sac metal şekillendirme işlemlerinde meydana gelen buruşma olayını incelemek için kare bir kutunun, yarı küre bir parçanın, silindirik kapların ve gerçek bir otomobil gövde panelinin derin çekme işlemindeki buruşma olayının basitleştirilmiş yöntemle simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir.

Jimma ve arkadaşları (1998), derin çekmedeki çekme oran limitini artırmak için ultrasonik titreşim yayan bir cihaz geliştirmiş ve deneyler yapmışlardır. Deneyler sonucunda 304 soğuk haddelenmiş çeliğin derin çekilme işleminde 20–28 Hz salınım uygulayarak, çekme oranı limitini sırasıyla 2.68'den 3.01'e, 2.58'den 2.94'e ve 2.38'den 2.77'e artırmışlardır.

Manabe ve arkadaşları (2002), zımba hızı ve kılavuz plaka fuzzy kontrol sisteminin yeni bir birleşimi olan kontrol sistemi geliştirerek şekillendirme süresinin % 25 oranında azaltılabildiğini göstermişlerdir.

Duchêne ve Habraken (2005), bir otomobil yakıt deposunun presle ve hidro-mekanik şekillendirme işlemlerinin sonlu eleman yöntemiyle karşılaştırılmasını yaparak hidro-mekanik şekillendirme ile presle basma işleminden daha düzgün ve daha sağlam kalınlık dağılımlı bir parça üretilbildiği sonucunu çıkartmışlardır.

Hongzhi ve Zhongqin (2000), Autoform ve Ls-Dyna3D programlarını kullanarak bir otomobil gövde parçasının şekillendirilmesinin nümerik analizleri yapmışlardır. Olası buruşma ve kopma bölgeleri saptayarak iki programdan elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçları karşılaştırmışlardır.

Gavas ve İzciler (2006), şekillendirilebilirlik ve çekme oranı limitinin iyileştirilmesi için Anti-Lock fren sistemli yeni bir derin çekme yöntemi geliştirmişlerdir. Yeni sistemin parçanın yüzey kalitesini artırdığını ve kabın üst köşesindeki kulak oluşumunu azalttığını bulmuşlardır.

Huaibao ve arkadaşları (2002), presle basma işleminde baskı plakası kontrol yöntemlerinden biri olan baskı plakası boşluk yönteminin simülasyonunu yapmışlardır.

Meinders ve arkadaşları (1998), derin çekme kalıplarında kullanılan dayanma pimlerini sonlu eleman kodları kullanarak simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir.

Yapılan literatür araştırmaları sonucu; sonlu elemanlar yazılımlarının plastik şekillendirme ve benzeri imalat yöntemlerinden önce kullanılması iş parçasının uygulanacak yük altındaki davranışını önceden görüp maliyet ve zamandan tasarruf noktasında büyük önemler taşımaktadır. Son yıllarda bir çok alanda bu yazılımlar başarılı bir şekilde kullanılmakta ve çok kaliteli imalatların yapılmasına imkan sağlamaktadır.

2.8 Amaç ve Kapsam

Bu çalışmada bir fırın ön sacının derin çekme işlemi ve DYNAFORM sonlu eleman paket programı ile derin çekme işleminin simülasyonu yapılmıştır.

Yapılan çalışmada gerçek sanayi parçası derin çekme işlemi ve sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan simülasyon sonuçlardan faydalanılarak aşağıdaki durumlar karşılaştırılmalı bir şekilde incelenmiştir.

1. Durum: Kulaklanma.
2. Durum: Buruşmalar
3. Durum:3 boyutlu gerilme hali
4. Durum: Kalınlık değişimi
5. Durum: Sınır limit diyagramı

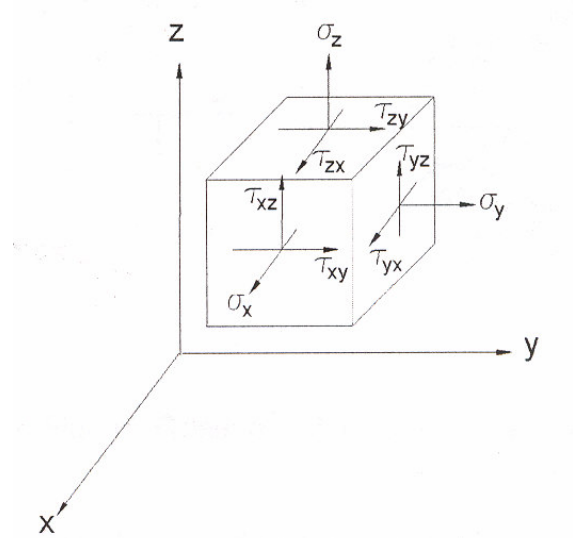
Birinci durumda derin çekme işlemi sonrasında iş parçası üzerinde meydana gelen kulaklanmalar; ikinci durumda buruşmalar; üçüncü durumda 3 boyutlu gerilme hali; dördüncü durumda kalınlık değişimi ve beşinci durumda ise sınır limit diyagramının sonlu eleman simülasyonları yapılmıştır. Simülasyon sonuçları ile gerçek parça üzerinde meydana gelen yukarıdaki durumlar incelenmiştir. Kullanılan sonlu eleman program sonuçlarının gerçeğine ne kadar yakın olduğu sınıanmıştır.

3. MATERYAL VE METOD

3.1 MATERYAL

3.1.1 Üç Boyutlu Gerilme Analizi

Cisim içerisinde çıkarılan bir küpün her bir yüzeyinde birbirine dik üç doğrultuda σ_x, σ_y ve σ_z gerilmeleri vardır. Bu gerilme bileşenleri Şekil 2.1'deki gibidir. Burada τ 'ardaki ilk indis etkidiği yüzey doğrultusunu, ikinci indis ise kendi doğrultusunu göstermektedir. Şekil 2.1'de görüldüğü üzere bir noktadaki gerilme halini karakterize etmek için 9 büyüklük bulunur. Bir vektörün üç bileşenle belli olduğu düşünülürse bir noktadaki gerilme halinin vektörden de farklı olduğu anlaşılır. Böyle 9 bileşenle beliren ve koordinat dönüşümünde belirli özellikler sağlayan büyüklere tensör denir (Özgür 2005).



Şekil 3.1 Üç eksenli gerilme bileşenleri

Gerilme tensörünün matris gösterimi

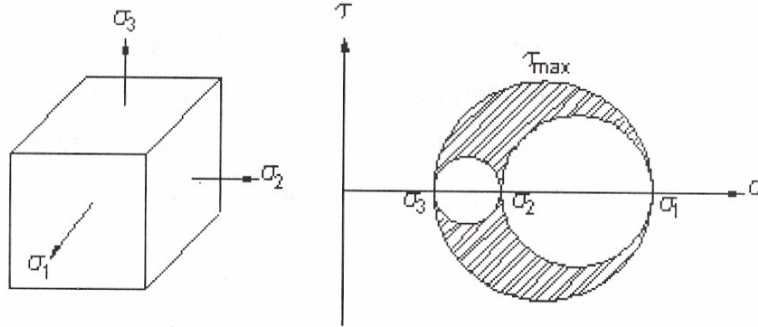
$$\begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yz} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

şeklindedir.

Ayrıca daha önce yapıldığı gibi moment denge denklemleri kullanılarak

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}, \tau_{yz} = \tau_{zy}, \tau_{zx} = \tau_{xz} \quad (3.2)$$

olduğu gösterilebilir. Bu gerilme tensörünün simetrik olduğunu ifade eder. σ_x, σ_y ve σ_z asal gerilmelerinin verilmiş olduğunu kabul edersek küpe üç ayrı doğrultudan bakınca gördüğümüz üç ayrı iki eksenli hale birer mohr dairesi çizilirse üç eksenliye ait Şekil 2.2'deki gösterim elde edilmiş olur. Bu gösterimde şekilde taranmış olan alanın apsisi ve ordinatı eğik yüzeylerdeki normal gerilmeyi ve kayma gerilmesini verir.



Şekil 3.2 Üç eksenli gerilme hali için Mohr dairesi gösterimi

Üç eksenli haldeki mohr dairesinden kayma gerilmesinin en büyük değeri hemen görülmektedir. Asal gerilmeler büyüklük sırası bakımından $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ şeklinde dizilirse, en büyük kayma gerilmesi en büyük daire yarıçapı olarak

$$|\tau_{\max}| = \left| \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \right| \quad (3.3)$$

şeklinde bulunur.

3.1.2 Nümerik Analizde Kullanılan Malzemenin Özellikleri

Nümerik analiz ve deneysel çalışmamızda; soğuk şekillendirme ve derin çekme işlemlerinde diğer malzemelere nazaran daha yumuşak ve dayanıklı bir malzeme olan AISI 1017 çeliği kullanılmıştır. Malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 AISI 1017 çeliğinin fiziksel ve mekanik özellikleri

Fiziksel özellikleri	Değeri
Yoğunluk	7.87 g/cm ³
Mekanik özellikleri	
Sertlik	116 Brinell
Maksimum çekme gerilmesi	405 MPa
Akma çekme gerilmesi	340 MPa
Elastisite Modülü	205 GPa
Poissons oranı	0.29
Kayma modülü	80 GPa

Çizelge 3.2 AISI 1017 çeliğinin kimyasal bileşimi

Bileşimler					
C	Fe	Mn	P	S	N
0.17	99.2	0.5	0,04	0,05	-

3.2 METOD

3.2.1 Sonlu Elemanlar Metodu

Sonlu elemanlar metodu; karmaşık olan problemlerin daha basit alt problemlere ayrılarak her birinin kendi içinde çözülmesiyle tam çözümün bulunduğu bir çözüm şeklidir. Metodun üç temel niteliği vardır: İlk olarak, geometrik olarak karmaşık olan çözüm bölgesi sonlu elemanlar olarak adlandırılan geometrik olarak basit alt bölgelere ayırır. İkincisi her elemandaki, sürekli fonksiyonlar, cebirsel polinomların lineer kombinasyonu olarak tanımlanabileceği kabul edilir. Üçüncü kabul ise, aranan değerlerin her eleman içinde sürekli olan tanım denklemlerinin belirli noktadaki (düğüm noktaları) değerleri elde edilmesinin problemin çözümünde yeterli olmasıdır. Kullanılan yaklaşım fonksiyonları interpolasyon teorisinin genel kavramları kullanılarak polinomlardan seçilir. Seçilen polinomların derecesi ise çözülecek problemin tanım denkleminin derecesine ve çözüm yapılacak elemandaki düğüm sayısına bağlıdır. Sonlu elemanlar metodunun kullanılması ve bilgisayarların sanayiye girmesiyle, bugüne kadar ancak pahalı deneysel yöntemlerle incelenebilen birçok makine elemanının kolayca incelenebilmesi, hatta çizim esnasında mukavemet analizlerinin kısa bir sürede yapılarak optimum dizaynın gerçekleştirilmesi mümkün olabilmıştır (Topçu ve Taşgetiren 1998). Sonlu elemanlar metodunu diğer nümerik metotlardan üstün kılan başlıca unsurlar şöyle sıralanabilir:

1. Kullanılan sonlu elemanların boyutlarının ve şekillerinin değişkenliği nedeniyle ele alınan bir cismin geometrisi tam olarak temsil edilebilir.
2. Bir veya birden çok delik veya köşeleri olan bölgeler kolaylıkla incelenebilir.
3. Değişik malzeme ve geometrik özellikleri bulunan cisimler incelenebilir.
4. Sebep sonuç ilişkisine ait problemler, genel direngenlik matrisi ile birbirine bağlanan genelleştirilmiş kuvvetler ve yer değiştirmeler cinsinden formüle

edilebilir. Sonlu elemanlar metodunun bu özelliği problemlerin anlaşılmasını ve çözülmesini hem mümkün kılar hem de basitleştirir.

5. Sınır şartları kolayca uygulanabilir (Topçu ve Taşgetiren 1998).

Sonlu elemanlar analizinde temel fikir sürekli fonksiyonları bölgesel sürekli fonksiyonlar ile temsil etmektedir. Bunun anlamı bir eleman içerisinde hesaplanması istenen büyüklüğün değeri o elemanın düğüm noktalarındaki değerler kullanılarak enterpolasyon ile bulunur. Bu nedenle sonlu elemanlar metodunda bilinmeyen ve hesaplanması istenen değerler düğüm noktalarındaki değerlerdir (Topçu ve Taşgetiren 1998). Bir varyasyonel prensip kullanılarak büyüklük alanın düğüm noktalarındaki değerleri için bir denklem takımı elde edilir. Bu denklem takımının matris formundaki gösterimi

$$\{K\} \{D\} = \{R\} \quad (3.4)$$

şeklinde dir. Burada $\{D\}$ alan büyüklüğünün düğüm noktalarındaki bilinmeyen değerlerini temsil eden vektör, $\{R\}$ bilinen yük vektörü ve $\{K\}$ ise bilinen sabitler matrisidir. Gerilme analizinde $\{K\}$ rijitlik matrisi olarak bilinmektedir.

3.2.2 Üç Boyutlu Problemler

Mühendislik problemlerinin birçoğu üç boyutludur. Bir ve iki boyutlu olarak yapılan çözümler yeterli doğrulukta sonuçlar verdiği için üç boyuta göre daha fazla tercih edilmektedir (Topçu ve Taşgetiren 1998). Bu bölümde üç boyutlu gerilme analizi için 8 düğümlü kübik elemanlar için temel ifadeler çıkarılacaktır.

Üç boyutlu halde deplasman bileşenleri,

$$\{u\} = [u, v, w]^T \quad (3.5)$$

dir. Burada u , v ve w sırasıyla x , y ve z yönündeki bileşenleri göstermektedir. Gerilme ve şekil değiştirme durumları,

$$\{\sigma\} = [\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{yz}, \tau_{xz}, \tau_{xy}]^T \quad (3.6)$$

$$\{\varepsilon\} = [\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}, \gamma_{xy}]^T$$

olarak ifade edilir. Gerilme ile şekil değiştirmeler arasındaki ilişki

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (3.7)$$

ile verilir. Burada $[D]$ 6×6 boyutlarında elastisite matrisidir.

$$[D] = \frac{E}{(1+u)(1-2u)} \begin{bmatrix} 1-v & v & v & 0 & 0 & 0 \\ v & 1-v & v & 0 & 0 & 0 \\ v & v & 1-v & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5-v & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5-v & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5-v \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Şekil değiştirmelerle yer değiştirmeler arasındaki ilişki ise,

$$\{\varepsilon\} = \left[\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}, \frac{\partial w}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}, \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right]^T \quad (3.9)$$

şeklindedir. Kütle ve yüzey kuvvet vektörleri üç bileşenli olarak sırasıyla

$$\{f\} = [f_x, f_y, f_z]^T \quad (3.10)$$

$$\{T\} = [T_x, T_y, T_z]^T \quad (3.11)$$

ile belirtilir.

3.2.3 Gerilme Hesabı

$$\{\sigma\} = \{D\} \quad (3.12)$$

ve

$$\{\varepsilon\} = \{B\} \{q\} \quad (3.13)$$

Olduğundan gerilmeler doğrudan

$$\{\sigma\} = \{D\} \{B\} \{q\} \quad (3.14)$$

eşitliğinden bulunabilir. Üç boyutlu durumda asal gerilmelerin hesaplanması için (3x3) boyutlu olan gerilme tensörünün invaryantlarından yararlanır (Topçu ve Taşgetiren 1998). Gerilme tensörünün invaryantları,

$$\begin{aligned} I_1 &= \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \\ I_2 &= \sigma_x \cdot \sigma_y + \sigma_y \cdot \sigma_z + \sigma_x \cdot \sigma_z - \tau_{yz}^2 - \tau_{xz}^2 - \tau_{xy}^2 \\ I_3 &= \sigma_x \sigma_y \sigma_z + 2\tau_{yz} \tau_{xz} \tau_{xy} - \sigma_x \tau_{yz}^2 - \sigma_y \tau_{xz}^2 - \sigma_z \tau_{xy}^2 \end{aligned} \quad (3.15)$$

şeklindedir. Buradan

$$a = \frac{I_1^2}{3} - I_2, b = -2 \left(\frac{I_1}{3} \right)^3 - \frac{I_1 I_2}{3} - I_3, c = 2\sqrt{\frac{a}{3}}, \theta = \frac{1}{3} a \cos\left(-\frac{3b}{ac}\right) \quad (3.16)$$

tanımlanmasıyla asal gerilmeler

$$\sigma_1 = I \frac{1}{3} + c \cos \theta, \sigma_2 = I \frac{1}{3} + c \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right), \sigma_3 = I \frac{1}{3} + c \cos\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) \quad (3.17)$$

olarak bulunur.

3.2.4 Altı Yüzlü Eleman

Altı yüzlü eleman, temel elemanı küp şeklinde olan bir izoparametrik eleman olup iki boyutlu gerilme analizi problemlerinde verilen Şekil 2.3' deki gibi dört düğümlü izoparametrik elemana benzemektedir (Topçu ve Taşgetiren 1998). Temel eleman üzerinde şekil fonksiyonları,

$$N_i = \frac{1}{8}(1 + rr_i)(1 + ss_i)(1 + tt_i) \quad i = 1, \dots, 8 \quad (3.18)$$

olarak elde edilir. Burada r_i , s_i ve t_i temel eleman üzerindeki düğüm koordinatlarını vermektedir. Kübik elemanda düğüm numaralanması belirli bir düzende yapılmak zorundadır. Düzensiz yapılan numaralama negatif det J verecektir.

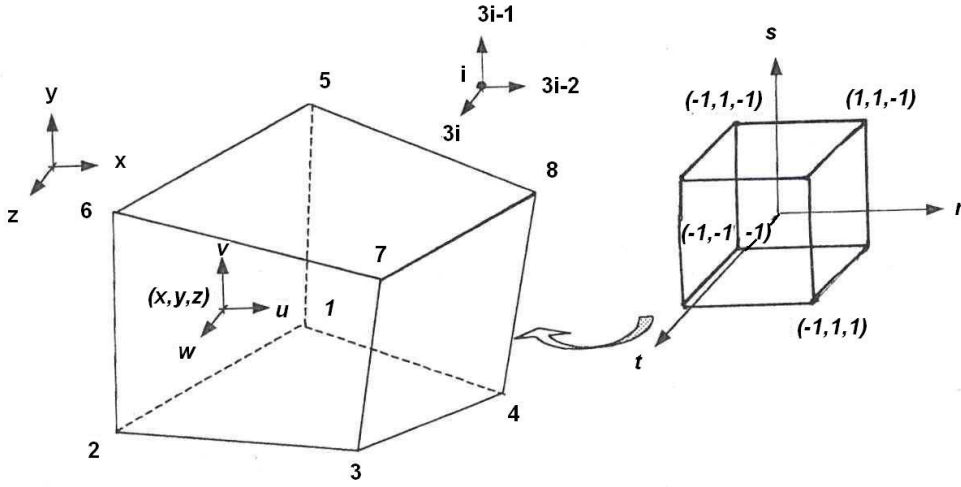
Eleman düğüm deplasmanları vektörünün 24 elemanı bulunmaktadır.

$$\{q\} = [q_1, q_2, q_3, \dots, q_{24}]^T \quad (3.19)$$

i düğümüne ait aynı şekilde deplasmanlar $3i - 2$, $3i - 1$ ve $3i$ olarak numaralandırılır. Eleman içindeki herhangi bir noktadaki deplasmanlar şekil fonksiyonları yardımıyla

$$\begin{aligned} u &= N_1 q_1 + N_2 q_4 + N_3 q_7 + \dots N_8 q_{23} \\ v &= N_1 q_2 + N_2 q_5 + N_3 q_8 + \dots N_8 q_{23} \\ w &= N_1 q_3 + N_2 q_6 + N_3 q_9 + \dots N_8 q_{24} \end{aligned} \quad (3.20)$$

şeklinde hesaplanır.



Şekil 3.3 Altı yüzlü temel eleman düğüm koordinatları

Koordinatlarda,

$$\begin{aligned}
 x &= N_1 x_1 + N_2 x_2 + N_3 x_3 + N_4 x_4 \\
 y &= N_1 y_1 + N_2 y_2 + N_3 y_3 + N_4 y_4 \\
 z &= N_1 z_1 + N_2 z_2 + N_3 z_3 + N_4 z_4
 \end{aligned} \tag{3.21}$$

dan bulunur. İki boyutlu problemlerde izlenen yoldan gidildiğinde eleman rijitlik matrisi,

$$\{k\}_e = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \{B\}^T \{D\} \{B\} \tag{3.22}$$

olarak ifade edilir. İntegrasyon işlemi nümerik yöntemiyle Gauss eliminasyon metodu uygulanarak yapılmıştır.

3.2.5 Ağ Oluşturulması

Üç boyutlu problemlerin analizi için sonlu elemanlar ağı oluşturulmasında ve gerekli değerlerin hazırlanmasında belirli bir yöntemin izlenmesine ihtiyaç vardır. Üçüncü boyuttaki koordinat değerlerinin ve düğüm bilgilerinin elde edilmesi, düğümün görülebilmesi nedeniyle birçok zorlukları ortaya çıkarır. Bu nedenle başlangıçta bir temel alınarak bu tekrarı şeklinde bir ağ oluşturma yoluna gidilmesi önemli kolaylıklar getirir (Topçu ve Taşgetiren 1998). Özellikle basit geometriler için 6 yüzlü 8 düğümlü elemanın temel alınarak tekrarlanması kullanılacak iyi bir yöntemdir. Diğer küp içinde kalan elemanların düğüm numaraları 4' er artırılmak suretiyle kolayca elde edilebilecektir.

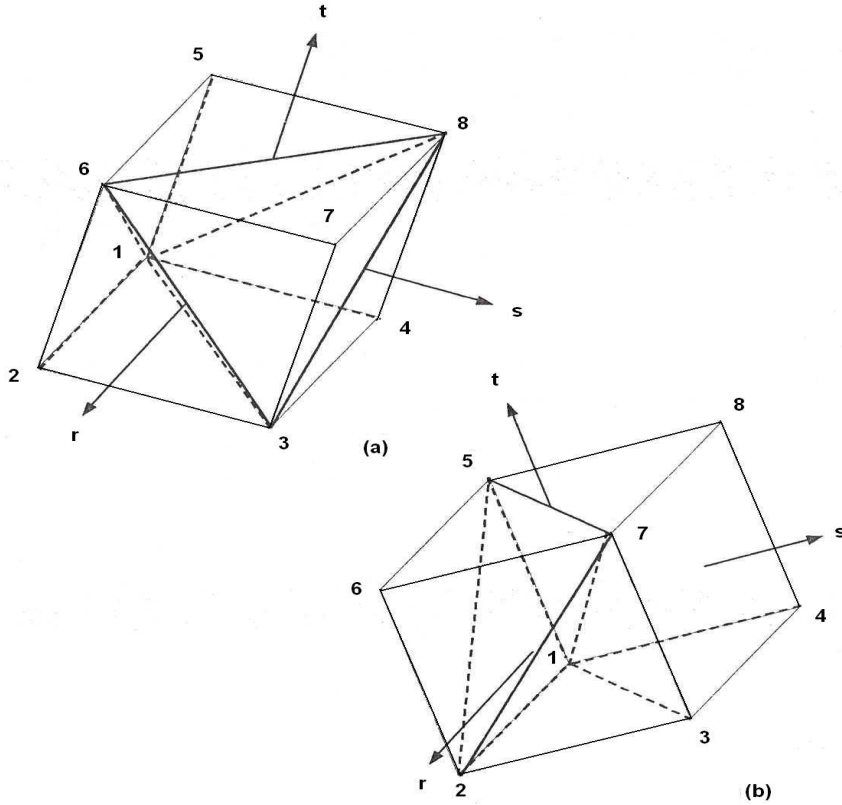
Kübik bir bölge 4 yüzlü elemanlara iki şekilde ayrılabilir. Bunlardan birinde küp 4 adet 4 yüzlü elemana ayrılır, elemanların dördü Şekil 2.4.a' daki gibi eşit hacimli, biri ise diğerlerinin iki katı hacme sahip olur. İkinci yolda ise küp Şekil 2.4.b' deki gibi 6 adet eşit hacimli elemana ayrılır. Bunları ayırma işlemleri sonunda elde edilen düğüm bilgileri Tablo 2.1' de verilmiştir.

Problemin modellenmesinde öncelikle kaba bir ağ yapısı oluşturulur. Gerekli olan bilgiler, düğüm koordinatları, eleman düğüm numaraları, malzeme bilgileri ve sınır şartlarıdır. Başlangıç olarak bir çözüm yapıldıktan sonra daha hassas bir ağ yapısı elde edilmek üzere, yeni elemanlarla ayırma işlemlerine geçilebilir.

Sınır şartlarının belirlenmesinde üç boyutlu problemlerde düzlem için bir tanımlama gerekebilir. Bir düğümün her yönde hareketi sınırlanmış ise burada tam nokta sınır şartı vardır denilir. Eğer düğümün bir doğrultuda hareketine izin verilmiş ise bu durumda da çizgisel sınır şartı vardır. Öte yandan düğümün bir düzlem içinde hareketi ortaya çıkarsa burada düzlemsel sınırlama söz konusudur (Topçu ve Taşgetiren 1998).

Çizelge 3.3 Temel 6 yüzlü elemanın 5 ve 6 adet 4 yüzlü eleman bölünmesi

5 Eleman					6 Eleman				
Eleman No	Düğüm				Eleman No	Düğüm			
	1	2	3	4		1	2	3	4
1	1	3	2	6	1	1	2	3	7
2	1	3	4	7	2	1	2	7	5
3	6	8	5	1	3	2	7	5	6
4	6	8	7	3	4	1	5	3	7
5	1	3	6	8	5	1	8	7	5
					6	1	7	3	8



Şekil 3.4 Temel küpün dört yüzlü elemanlara ayrılması a) 5 Adet 4 yüzlü, b) 6 Adet 4 yüzlü

Nokta sınır şartlarında genel rijitlik matrisinin ilgili serbestlik derecesine karşılık gelen diyagonal elemanına büyük bir C katsayı eklenmekle sınır şartının sisteme dahil edildiği görülmüştü. Düğüm doğrultu kosinüsleri l , m , n olan bir t doğrultusu boyunca hareket edebiliyorsa penaltı yaklaşımı,

$$\begin{matrix}
 & 3I-2 & 3I-1 & 3I \\
 3I-2 & \left[\begin{array}{ccc} Cl^2 & Clm & Cln \\ & Cm^2 & Cmn \\ 3I & Sim & Cn^2 \end{array} \right] & & \\
 3I-1 & & & \\
 3I & & &
 \end{matrix} \quad (3.23)$$

şeklindeki bir rijitlik teriminin uygun serbestlik dereceleri ile sistem matrisin eklenmesi sonucunu verir. Düzlemsel sınır şartında ise düzlemin normal l , m , n doğrultuda kosinüslerine sahiptir. t doğrultusu için ise,

$$\begin{matrix}
 & 3I-2 & 3I-1 & 3I \\
 3I-2 & \left[\begin{array}{ccc} C(1-l^2) & -Clm & -Cln \\ & C(1-m^2) & -Cmn \\ 3I & Sim & C(1-n^2) \end{array} \right] & & \\
 3I-1 & & & \\
 3I & & &
 \end{matrix} \quad (3.24)$$

rijitlik terimin eklenmesi gerekecektir.

3.3 Sonlu Elemanlar İle Statik Analiz

3.3.1 Giriş

Statik analizde zaman bağımsız bir değişken olarak göz önüne alınmaz. Deformasyonların sabit ve yavaşça değiştiği kabul edilir. Bazı problemlerde titreşim frekansı çok düşük olabilmektedir. Bu durumlarda problem statik yüklü olarak düşünülebilir. Yani atalet kuvvetleri hesaplanarak, bunlar sanki birer statik yükümlü gibi yapıya uygulanarak, yapı statik olarak analiz edilebilir. Bir statik analizde öncelikle sonlu elemanlar modelinin hazırlanması yani yapının elemanlara bölünmesi; sonra da yapının nasıl yüklendiğinin tanımlanması ve destek şeklinin verilmesi gerekir.

Çözüm için program her bir eleman için rijitlik $\{K\}$ matrisini hesaplar. Daha sonra elemanlar birleştirilerek tüm sistem için global rijitlik $\{K\}$ elde edilir. Yükler global yük vektöründe, $\{R\}$, yerleştirilir. Mesnet koşulları uygulanır. Global denklem takımı $\{K\}\{D\}=\{R\}$, bilinmeyen $\{D\}$ değerleri için çözülür. Yapı problemlerinde $\{D\}$ matrisi nodal deplasman değerlerini temsil etmektedir. Sonuçlar için $\{D\}$ matrisi kullanılarak, gerilme değerleri hesaplanır (Topçu ve Taşgetiren 1998).

3.3.2 Rijitlik Matrisinin Oluşumu

Genel olarak rijitlik matrisi $\{K\}$ bir eleman için aşağıdaki şekilde temsil edilebilir.

$$\{K\} = \int \{B\}^T \{E\} \{B\} dV \quad (3.25)$$

Burada $\{B\}$ şekil değiştirme-deplasman matrisi, $\{E\}$ sabitler matrisi olup, malzeme özelliklerini göstermektedir. dV ise hacim elemanıdır. Rijitlik matrisleri eleman tipine bağlı olarak, eleman deplasman alanını tarif eden şekil fonksiyonları kullanılarak her tip eleman için ayrı ayrı hesaplanabilirler.

Eleman rijitlik matrisiyle, sistem global rijitlik matrisleri simetriktir. Bu durum yapıya etkileyen kuvvetler ile deformasyonlar arasında linner ilişki olduğu sürece geçerlidir. Rijitlik matrislerinde diyagonal terimler daima pozitifdir. Diğer yandan bir yapı hiç mesnetleşmemiş veya uygun şekilde mesnetleşmemişse, rijitlik matrisinde tekillikler oluşur. Bu durumda program $\{K\}.\{D\}=\{R\}$ denklemini nodal serbestlik dereceleri için çözemeyecektir. Matristeki tekillikleri önleyebilmek amacıyla tüm rijit cisim hareket serbestlikleri uygun şekilde engellenmelidir. Bu rijit hareket serbestlikleri yapı içerisinde deformasyon ve dolayısıyla gerilme yaratmayan hareket şekilleridir (Topçu ve Taşgetiren 1998).

Her bir nod noktasına genel amaçlı bir sonlu eleman programı altı serbestlik derecesi atayacaktır. Bunlar üç adet öteleme ve üç adette dönme serbestliğidir. Eğer bu global serbestlik derecelerinden ise, bu noda bağlı olan elemanlarda şekil değiştirme oluşturmuyorsa, rijitlik matrisinde tekillik oluşur. Bu tür serbestlik dereceleri çözümden önce kısıtlanmalıdır.

3.3.3 Yükler

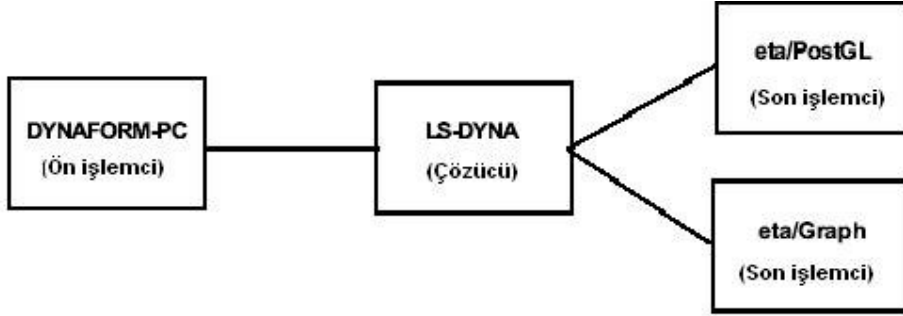
Yükler yapıya değişik şekillerde uygulanabilir. Bu tek bir noktaya uygulanan kuvvet veya moment olarak veya yüzey basınç yükü olarak gerçekleşebilir. Diğer bir yükleme şekli ise cismin kendi ağırlığı ve atalet kuvvetlerinin varlığı dolayısıyla oluşan kuvvetlerdir.

Yayıllı yükler sonlu elemanlar programlarında “Kinematik Eşdeğer” nodal yüklerle değiştirilirler. Kinematik eşdeğer nodal yükler toplamada orijinal yüke eşit olup, herhangi bir noktaya göre orijinal yüklemeyle aynı moment değerini vermektedir. Kinematik eşdeğer olmayan nodal yüklemeler ise genelde yığın yükleme olarak adlandırılır ve çoğu zaman dönme serbestliğine sahip elemanlar için tercih edilmektedir (Özgür 2005).

3.4 Dynaform Sonlu Elemanlar Programı

ETA firması tarafından üretilmekte olan DYNAFORM yazılımı, sac metal şekillendirme kalıpcılık simülasyonları için kullanılan spesifik bir yazılımdır. DYNIFORM yazılımı arka planda çözücü olarak LS-DYNA yazılımını kullanır. Explicit bir çözücü olan LS-DYN(açık adımlı zaman entegrasyonu) dinamik çözücü sayesinde kalıpcıların çok kısa bir süre içerisinde gerçek hayattaki değerlere uyan kalıp simülasyonlarını sanal ortamda gerçekleştirmelerine olanak sunar. Böylece kalıp üretimindeki deneme yanılma süreçlerini yani iteratif kalıp dizaynını bilgisayar ortamına taşıyarak dizayn sürecini kısaltarak maliyetleri azaltır (İnt. Kyn. 2).

DYNAFORM-PC yazılım paketi 4 adet programdan oluşmaktadır. Bu programlar ön işlemci (pre-processor), çözücü (solver), son işlemciyi (post-processor) temsil etmektedir. Bunlar DYANFORM, LSYDYNA, eta/Postgl ve eta/Graph' tır.



Şekil 3.5 Dynaform çalışma algoritması (DYNAFORM-PC)

DYNAFORM bu yazılım paketinin ön işlemci kısmıdır. Sac metal şekillendirme modelleri bu yazılım kullanılarak yapılmaktadır. Düz çizgi bilgisini import etmek için VDA ve IGES dönüştürücülerini ve çizgi bilgisini değiştirmek veya yaratmak ve onu meshlemek için tam bir sıralı takımı kapsamaktadır.

LS-DYNA yazılım paketinin çözücüsüdür. DYNAFORM; LS-DYNA' yı çalıştırmak için kullanıcıya izin veren tam bir LS-DYNA ara yüzüne sahiptir.

Eta/PostGL ve eta/Graph yazılım paketinin son işlemci kısmıdır. Analizlerden LS-DYNA sonuç dosyalarını son işlemden geçirmek için bu programlar kullanılır. Eta/PostGL kontur, deformasyonları, gerilim grafiklerini, sonuç dosyaları ile animasyonları yaratır. eta/Graph aynı sonuçları grafiksel bir şekilde yorumlamadaki fonksiyonları içermektedir.

3.5 Deneysel Çalışmalar

3.6.1 Deney Düzenegi

Derin çekme yönteminin deneysel ve sonlu elemanlar metodu ile karşılaştırılması olarak incelendiği bu çalışmanın deneysel kısmında, fırın ön kapağı olarak bilinen sanayi parçası üretilmiştir. Üretilen parça ile sonlu elemanlar yazılımı sonuçları karşılaştırılmış ve derin çekme işlemimiz için 600 tonluk derin çekme presi kullanılmıştır. Derin çekme presimizin özellikleri Çizelge 3.3' de verilmiştir. Deneyimizde kullanılan 600 tonluk derin çekme presinin genel görünümü aşağı verilmiştir.

Çizelge 3.4 Presin teknik özellikleri

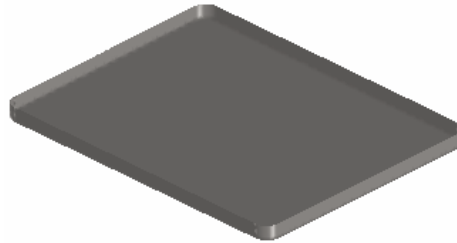
Teknik Özellikleri	
Presleme Gücü	600 ton
İşletme Basıncı Max.	250 bar
Plakalar Arası En Büyük Açıklık	1300 mm
Piston	1000 mm
Kapanma Hızı	180 m/s
Sıvama Hızı	14 m/s
Geri Dönüş Hızı	180 m/s
Pres Tablasının Kullanma Alanı	1500 mm x 1500 mm
Toplam Motor Gücü	45 kW
En	2800 mm
Yükseklik	4000 mm
Derinlik	1500 mm



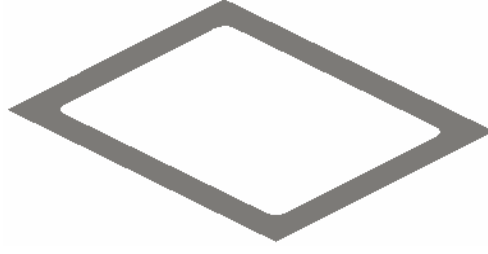
Şekil 3.6 Pres cihazının resmi

3.6.2 Kalıp Sistemi Elemanları

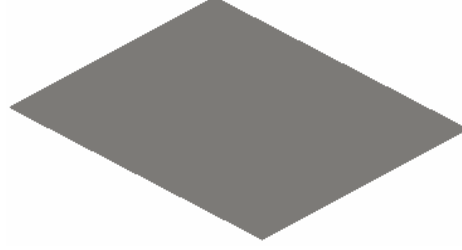
Derin çekme işlemimizde kullanılan temel elemanlarımız erkek kalıp (punch), dişi kalıp(die), baskı plakası (binder) ve sacımızdan oluşmaktadır. Çalışma içeriğinde uygulanan yöntemde; dişi sabit kalırken, baskı plakası, sacı dişi ile kendi arasında sıkıştırırken, erkek sonradan pot çemberinin içinden geçerek parçayı şekillendirmektedir. Baskı plakasının ortasında erkek kalıbın geçebilmesi için boşaltma yapılmıştır. Kalıp elemanlarımız aşağıda gösterilmiştir.



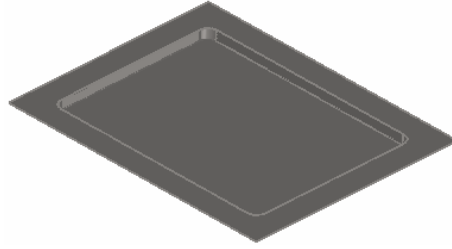
a.



b.



c.



d.

Şekil 3.7 a. Erkek Kalıp, b. Baskı Plakası, c. Sac, d. Dişi Kalıp.

Deneysel parçamızın derin çekme işlemi aşağıda anlatılan dört kademedен oluşmuştur.

Buna göre;

- Başlangıç boyutlarını belirlediğimiz levhamız dişi kalıp üzerine yerleştirilir.
- Erkek kalıbımız düşey yönde iş parçasına doğru harekete başlar.
- Erkek kalıp, düşey hareketi sırasında iş parçasını dişi kalıp deliğinden aşağıya doğru çekilmeye zorlar.

Çekme işlemi tamamlandıktan sonra, zımba (ve baskı plakası) yine düşey yönde ancak bu kez çekme başlangıçtaki tersi istikamette iş parçasından uzaklaştırılır.

3.6.3 Deney Malzemesi

Deneylerimizde kullanılan sac için 1 mm kalınlığında AISI 1017 çelik malzeme kullanılmıştır. Deney malzemesini oluşturan sacımızın geometrik özellikleri aşağıdaki gibidir;

- Boy; 510 mm
- Genişlik; 410 mm
- Kalınlık; 1 mm

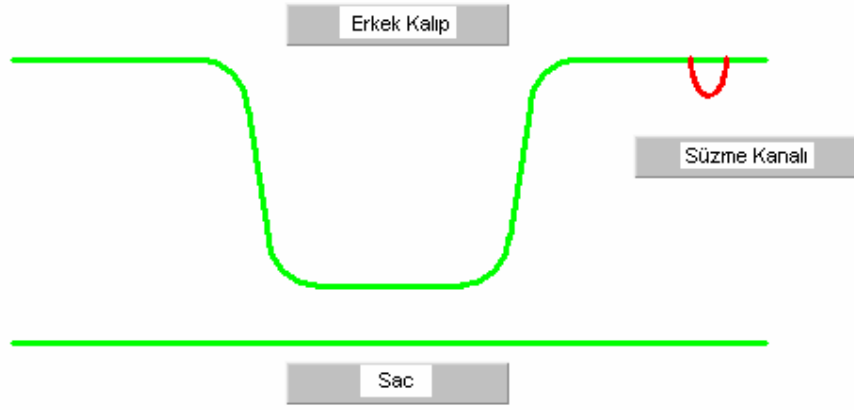
Deney malzemesinin şekillendirilmeden önceki görünümü Şekil 3.8’ de verilmiştir.



Şekil 3.8 Deneyde kullanılan sac parçası

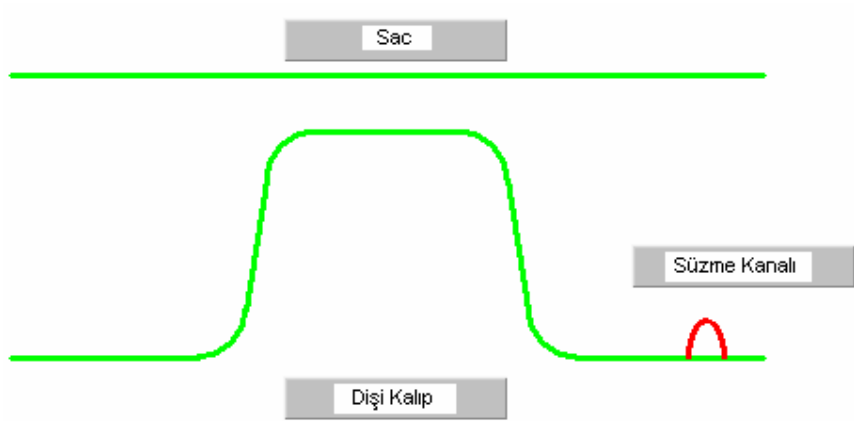
3.6.4 Deneyin Yapılışı

Fırın ön kapağı parçası klasik kalıpcılık yöntemleri kullanılarak tasarlanmış, kalıp sisteminde preslenmiş ve sonuçlar tespit edilmeye çalışılmıştır. Kullanılan kalıp sistemi tek etkili kalıp sistemidir (Şekil 3.9). Tek tesirli veya tek etkili diye adlandırılan kalıp sisteminde saca, şekillendirme hareketi erkek kalıp tarafından verilir.



Şekil 3.9 Kalıp sistemi

Çift etkili kalıp sisteminde (Şekil 3.10) dişi kalıpta hareketlidir ve şekil verme işlemine aktif olarak katılır.



Şekil 3.10 Kalıp sistemi

Deneyimiz TERMİKEL A.Ş. firmasının üretim atölyelerinde gerçekleştirilmiştir. 600 ton kapasiteli bir hidrolik pres kullanılmıştır. İlk derin çekme deneyinde sac'ta yırtılma gözlemlendikten sonra bir sonraki uygulamada kalıp ve sac yüzeylerine sürtünmeyi azaltmak amacıyla naylon malzeme ile kaplanmıştır (Şekil 3.11).



Şekil 3.11 Derin çekme işleminden sonra yırtılan parça

Bu uygulamanın yırtılmaya engel olduğu gözlenmiştir. Çekme deneyimiz 600 tonluk preste pistonun 16m/sn sıvama hızı ile tamamlamış ve program sonuçları ile karşılaştırmaya hazır hale getirilmiştir. Sistemin sonlu elemanlar analizinden elde edecek sonuçlar, deneysel parçanın şekli ile karşılaştırılarak yöntemin tutarlılığı test edilecektir.

4. BULGULAR

4.1 Bir Sanayi Parçasının Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Derin Çekme Analizi

Sonlu elemanlar yöntemi ile derin çekme analizinin yapılması, üretim yapılmadan önce saca uygulanacak yük altındaki davranışının görülmesinde bize yardımcı olmaktadır. Bunun için sonlu eleman modeli yapılıp ve gerekli sınır şartları uygulanmasıyla elde edilen sonuçlar deneysel olarak üretilen parçamızın sonuçları ile karşılaştırılmaktadır. Sonuç olarak; derin çekme analizi ile gerçek bir üretime yakın simülasyonlar yapılabilir; kalıp tasarımı aşamasında zaman kaybını azaltıp maliyeti düşürmemize yardımcı olabilir.

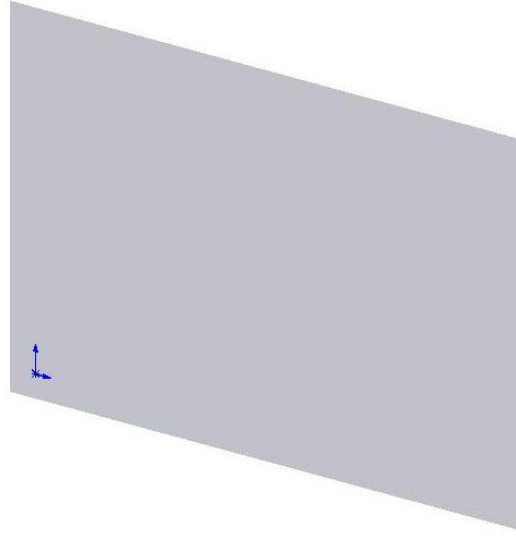
4.1.1 Üç boyutlu Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması

Çalışmanın analiz kısmında modelleme kolaylığı ve hesaplama süresinin az olması için sanayi parçası olan bir fırının ön sacı seçilmiştir. Sacımızın sonlu elemanlar modelini oluşturmadan önce bu çalışmada kullanılacak olan malzemenin ebatları Beyaz eşya parçası üreten bir firmadan temin edilmiştir (Termikel Grup). Sacın ebatları Çizelge 4.1’ de gösterildiği gibidir.

Çizelge 4.1 Fırın ön sac parçasının ebatları

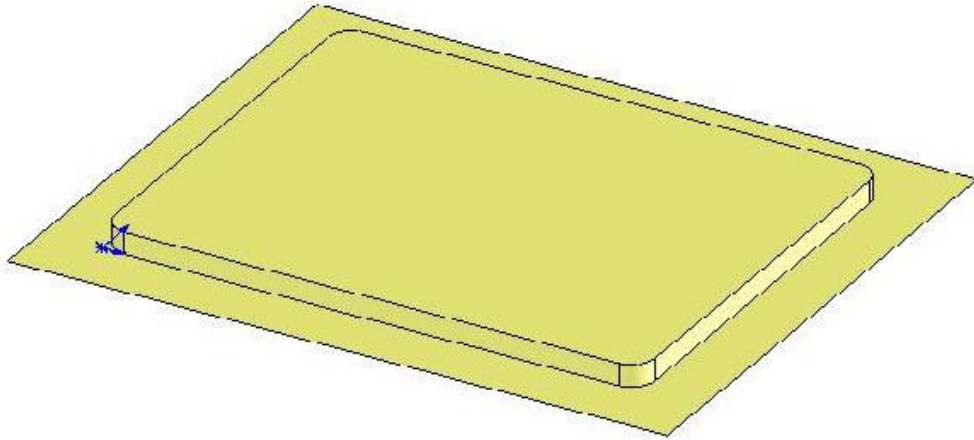
Malzeme Cinsi	AISI 1017(Soğuk Şekillendirme)
Boy	510 mm
Genişlik	410 mm
Kalınlık	1 mm

Bu veriler ışığında sacımız SolidWORKS 2006 bilgisayar destekli tasarım yazılımımızda yüzey olarak modellendi. Fırın sac modeli SolidWORKS programında Şekil 4.1’ de gibi oluşturulmuştur.



Şekil 4.1 Fırın ön sac modeli

Fırın ön sacının dişi kalıbın modellenmesi de SolidWORKS programında yukarıdaki gibi gerçekleştirilmiştir. Dişi kalıbın ebatları Tablo 4.1' de verildiği gibidir. Dişi kalıp modeli Şekil 4.2' de gibidir.



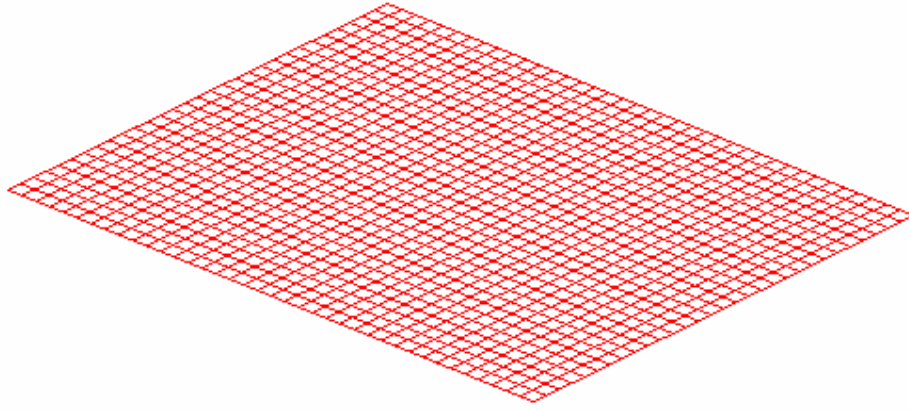
Şekil 4.2 Dişi kalıp modeli

4.1.2 Fırın Ön Sac Ve Dişı Kalıp Modelinin DYNAFORM 5.0 Programında Import Edilmesi

Fırın ön sac ve dişı kalıp modelleri DYNAFORM 5.0 analiz programı içinde açabilmesi için. igs uzantısı ile kaydedildi. Kaydedilen modeller DYNAFORM 5.0 yazılımı içinden import edilerek analiz işlemleri için hazır hale getirilmiştir.

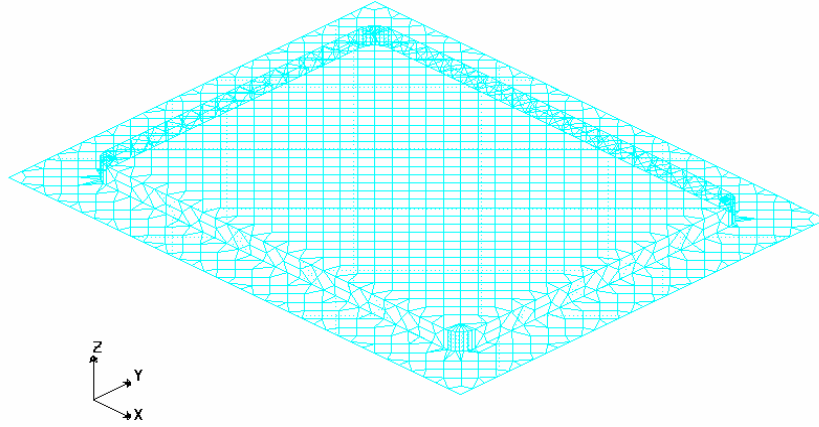
4.1.3 Eleman Tipi ve Modelin Ağ Oluşturulması

DYNAFORM 5.0 içinden çağırılan dişı kalıp ve sacımız için öncelikle ağ yapısı (Mesh) oluşturulmuştur. Ağ yapısı oluşturma işlemine dişı kalıptan başlanmıştır. Ağ yapısı için Preprocess (Ön işlemci) seçeneğimiz alt seçeneklerinden Element segmemiz aktif edilmiştir. Karşımıza gelen Element diyalog kutusundan yüzeyimizde ağ oluşturabilmek Surface Mesh seçeneği aktif hale getirilmiştir. Dişı kalıbımızın seçilmesi tamamlandıktan sonra karşımıza en büyük ve en küçük eleman büyüklüğünü girmemizi isteyen Surface Mesh diyalog kutumuz gelmektedir. Dişı kalıbımızın ağ yapısı için en büyük eleman boyutu 15 mm, en küçük eleman boyutunu 0.5 mm belirlenmiştir. En büyük eleman boyutu 15 mm üstünde belirlenebilirdi. Eğer ki analizimizin çözüm süresinin fazla uzamamasını istiyorsak en büyük eleman boyutunu büyütebiliriz. Bu büyütme işlemi için analiz sonuçlarına etkisi olmayacaktır. Sacımızın ağ yapısının oluşturulması için Tools seçeneğimiz altından Blank Generator sekmemiz aktif edilir. Blank Generator aktif edildikten sonra Select Option diyalog kutusu açılır. Sac modelinin seçilme işlemi tamamlandıktan sonra ağ yapısının oluşturulabilmesi için en küçük eleman boyutunu girilmesini isteyen Tool Radyus diyalog kutusu açılır. En küçük eleman boyutu olarak 3 değeri girildi ve meshleme işlemi gerçekleştirildi. Fırın ön sacının ağ oluşturulmuş hali Şekil 4.3' de görüldüğü gibidir. Sacın ağ yapısının oluşturulmasında Quadrangle eleman seçilmiştir.



Şekil 4.3 Fırın ön sac ağ oluşturulmuş durumu

Dişi kalıpta yukarıda anlatıldığı gibi aynı şekilde ağ oluşturma işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4 Fırın ön sacı dişi kalıp ağ oluşturulmuş durumu

Baskı plakası, erkek kalıp gibi diğer kalıp elemanlarının ağ yapıları program tarafından otomatik olarak oluşturulmaktadır.

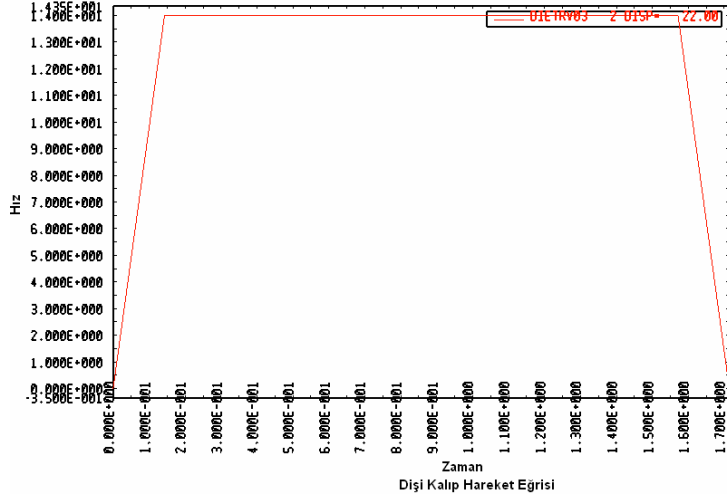
4.1.4 Sonlu Eleman Modeline Sınır Şartlarının Uygulanması

Seçilen AISI 1017 çelik levha izotropik ve kinematik hardening bir malzeme olarak yazılım tarafından otomatik tanınmıştır. Malzemenin hem izotropik hemde kinematik hardening olması nedeniyle, pekleşme katsayısı β değerinin 0 ile 1 arasında değişmesine neden olacaktır. β değeri izotropik hardening malzemeler için 1 değerini almakta iken, kinematik hardening malzemeler için 0 değerini almaktadır. Yani kinematik hardening malzemeler için yırtılma bölgelerinin bire bir gösterilmesinin sağlanmasıdır. Yazılım malzemenin şekil değiştirme hızı için Cowper-Symonds modelini kullanmaktadır.

$$\sigma_Y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{p}} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \epsilon_p^{eff}) \quad 4.1$$

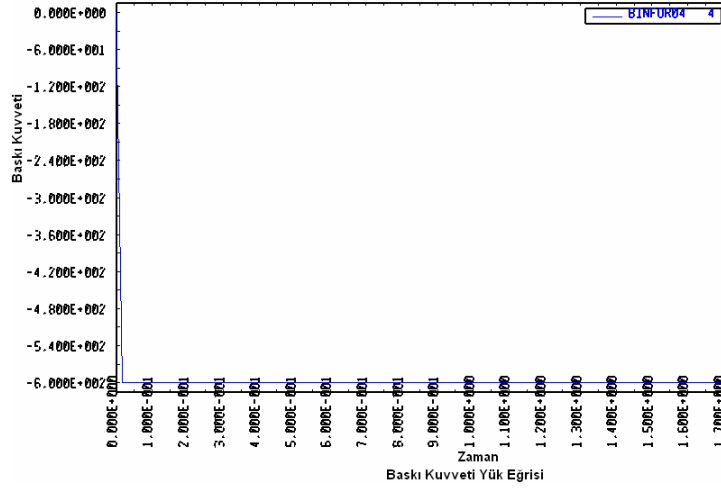
burada σ_0 başlangıç akma mukavemeti, C ve P ise Cowper-Symonds şekil değiştirme hızı, ϵ_p^{eff} efektif plastik şekil değiştirme, $\dot{\epsilon}$ şekil değiştirme hızı ve E_p plastik sertleşme modülüdür.

Dişi kalıp ve fırın ön sacı modeline ek olarak erkek kalıp; element komutundan dişi kalıp seçilerek 1 mm boşluk değeri girilmiş ve ağırlı bir şekilde oluşturulmuştur. Baskı plakası ise dişi kalıbının etek kısmı seçilerek elde modellenmiştir. Sınır şartlarının uygulanmasında programın Autoposition komutundan yapılabilmektedir. Burada dişi kalıbı rijit; zımba, baskı plakası ve sac modeli hareketli olarak tanıtılmıştır. Dişi kalıba Define Load Curve komutuyla 14 mm/sn hız ve 22 mm yer değiştirme miktarı verilmiştir. Erkek kalıbın hız ve zaman grafiği Şekil 4.5' te verilmiştir.



Şekil 4.5 Dişi kalıp hareket eğrisi

Baskı plakasına Define Load Curve komutu yardımıyla 600 ton yük uygulanmıştır. Zamana bağlı baskı kuvveti eğrisi Şekil 4.6' da ki gibidir.

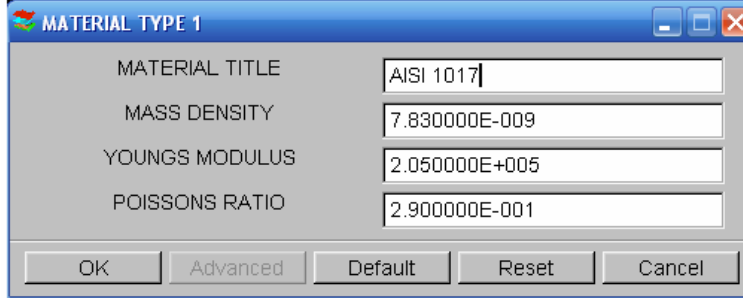


Şekil 4.6 Baskı kuvveti eğrisi

4.1.5 Sonlu Eleman Programı İle Derin Çekme Analizinin Yapılması

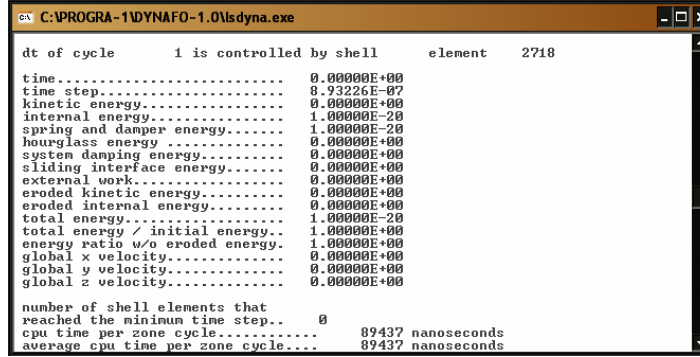
Analiz başlatılmadan önce fırın ön sacının malzeme özellikleri tanıtlır. Define Blank komutundan malzeme özellikleri Şekil 4.7' de gösterildiği gibi girilmiştir. Quick setup seçeneği altında draw die komutu aktif edilerek analiz çözümlerine başlanmıştır. Çözüm

esnasında ls-dyna çözücüsü gelmektedir ve uygulanan işlem adımları meydana gelen enerjiler ve benzeri çıkış dataları takip edilebilmektedir (Şekil 4.8).



Property	Value
MATERIAL TITLE	AISI 1017
MASS DENSITY	7.830000E-009
YOUNGS MODULUS	2.050000E+005
POISSONS RATIO	2.900000E-001

Şekil 4.7 Malzeme özellikleri



```
dt of cycle 1 is controlled by shell element 2718
time..... 0.00000E+00
time step..... 8.93226E-07
kinetic energy..... 0.00000E+00
internal energy..... 1.00000E-20
spring and damper energy..... 1.00000E-20
hourglass energy..... 0.00000E+00
system damping energy..... 0.00000E+00
sliding interface energy..... 0.00000E+00
external work..... 0.00000E+00
eroded kinetic energy..... 0.00000E+00
eroded internal energy..... 0.00000E+00
total energy..... 1.00000E-20
total energy / initial energy.. 1.00000E+00
energy ratio w/o eroded energy.. 1.00000E+00
global x velocity..... 0.00000E+00
global y velocity..... 0.00000E+00
global z velocity..... 0.00000E+00

number of shell elements that
reached the minimum time step.. 0
cpu time per zone cycle..... 89437 nanoseconds
average cpu time per zone cycle... 89437 nanoseconds
```

Şekil 4.8 Çözüm işlemi

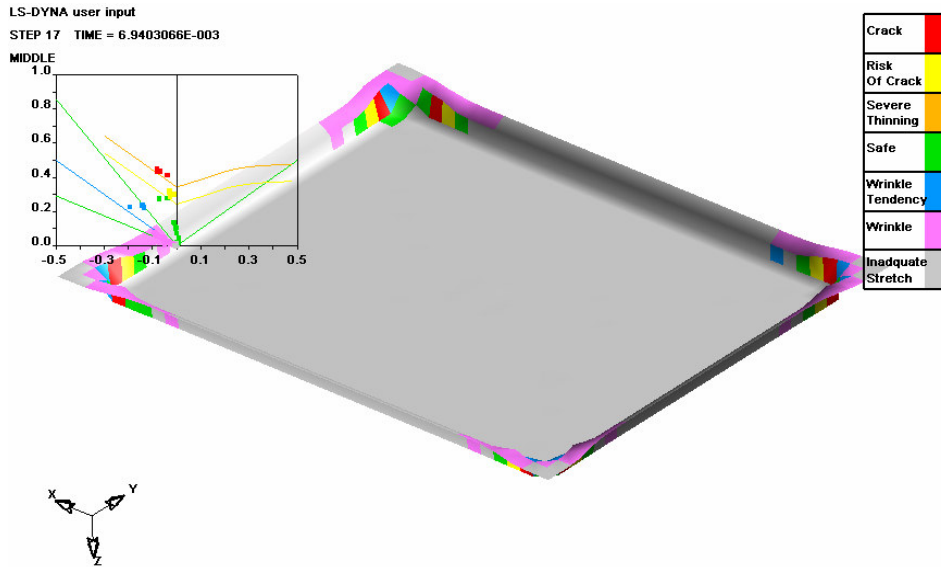
Çözüm işlemi tamamlandıktan sonra son işlemci PostGL yazılımından sonuç dataları simülasyona dönüştürülür (DYNAFORM-PC eta/PostGL Post Tutorial). Buradan parçada meydana gelen deformasyonlar şekil ve değer olarak alınmaktadır. Sonuç verilerinin grafiksel şekle çevrilmesi Etagraph yazılımı ile sağlanmaktadır (Eta/PostGL Graph Tutorial). Etagraph yazılımı çalıştırılıp önceden elde edilen sonuç dosyalarından kinetik enerji ve internal enerji gibi grafikler oluşturulabilmektedir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bu kısımda bir sanayi parçası olarak beyaz eşya firmasından fırın ön sacının derin çekilme işlemi ele alınmıştır. Burada fırın ön sacını 600 tonluk bir preste derin çekme işlemi yapılmıştır. Derin çekme işleminin sanal ortamda simülasyonunu yapmak için DYNAFORM sonlu eleman paket programı seçilmiştir. Bu bölümde derin çekme işleminin gerçek sonuçları ile sonlu eleman programından elde edilen sonuçların karşılaştırılması yapılmıştır. Ayrıca analiz sonucuna göre parça üzerinde meydana gelen incelmeler, gerilimler, buruşmalar ve yırtılmalar tartışılmıştır.

5.1 Kulaklanma Açısından Gerçek İle Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Sanayide gerçekleştirilen derin çekme işleminde fırın ön sacı kullanılmıştır. Gerçek sonuç ile derin çekme analizinden elde edilen sonuçların karşılaştırılmasında kulaklanma önemlidir. Parçanın derin çekme işleminden sonra özellikle etek kısımlarında kulaklanma olmuştur.



Şekilde 5.1 Analiz sonucu parça üzerinde oluşan kulaklanmalar

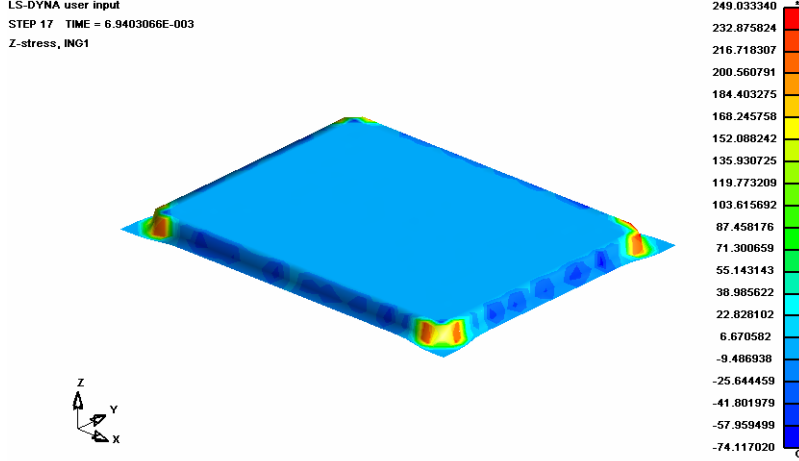


Şekil 5.2 Derin çekme işlemi sonucu parça üzerindeki kulaklanmalar

Derin çekme işlemine tabii olmuş gerçek sac parçası ile analiz sonuçlarından elde edilen şekle dikkatlice bakıldığında parçanın etek kısımlarında kulaklanma olayının meydana geldiği görülebilir. Burada kulak oluşumu düzlemsel anizotropiden kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla derin çekme işleminden sonra kulaklar kabın çevresi boyunca kesilir. Bu malzeme yönünden hem maddi zararlara hem de zaman kaybına yol açmaktadır.

5.2 Parça Üzerindeki Z- Yönündeki Gerilmeler

Derin çekme analizi sonucu sac parçasının üzerinde gerilmeler meydana gelmektedir. Buna göre sonlu eleman programından elde edilen analiz sonuçlarına göre sac parçasının üzerinde z- yönündeki gerilmeler Şekil 5.3' te gibi meydana gelmiştir.

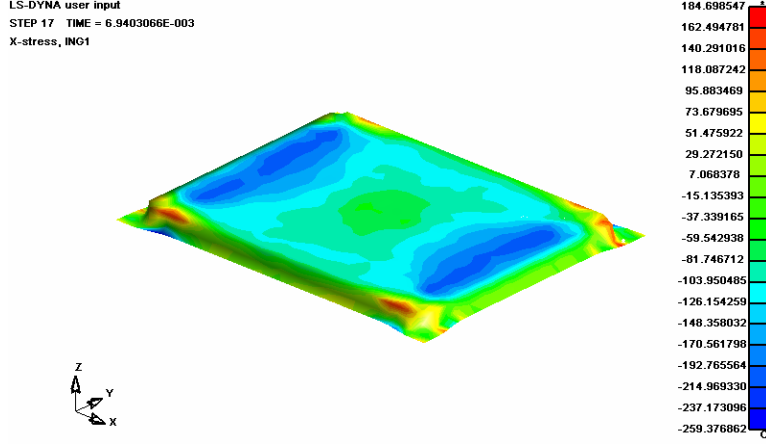


Şekil 5.3 Sac parça üzerindeki z- yönündeki gerilmeler (MPa)

Derin çekme işlemi sonucunda z- yönündeki en büyük gerilmeler sac parçasının radyuslu kısımlarında meydana gelmiştir ve şekil üzerinde de açıkça görülmektedir. Sac parçasında radyusun başlangıç ve bitiş noktalarında gerilim yığılmaları meydana gelmiş, diğer kısımlarda ise gerilim dağılımı normal bir şekilde olmuştur.

5.3 Parça Üzerindeki X- Yönündeki Gerilimler

Derin çekme analizi sonucu sac parçasının üzerinde gerilmeler meydana gelmektedir. Buna göre sonlu eleman programından elde edilen analiz sonuçlarına göre sac parçasının üzerinde x- yönündeki gerilmeler Şekil 5.4' te gibi meydana gelmiştir.

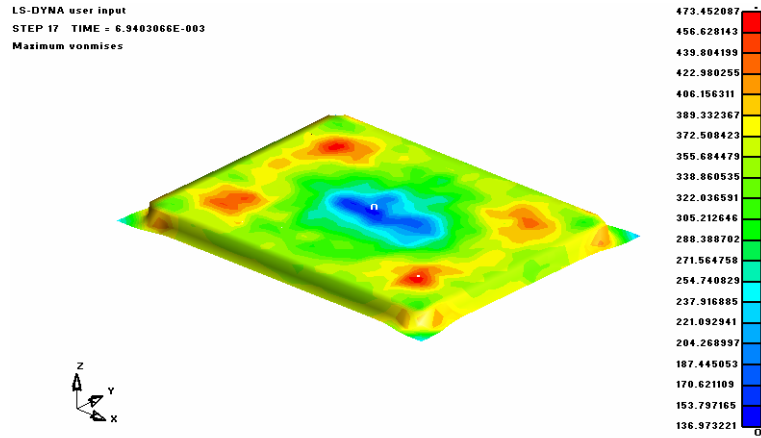


Şekil 5.4 Sac parça üzerindeki x- yönündeki gerilmeler (MPa)

Derin çekme analizi sonucu x- yönünde en büyük gerilmeler sac parçasının üst köşe kısımlarında meydana gelmiştir. Sac parçasının üst kısımları ve diğer kısımlarında gerilim dağılımı normal bir şekilde oluşmuştur.

5.4 Parça üzerinde Von mises gerilmeleri

Derin çekme analizi sonucu sac parçasının üzerinde gerilmeler meydana gelmektedir. Bunlardan biride Von mises gerilmesidir. Von mises gerilme kriterine göre sac parçası üzerinde oluşan gerilmeler Şekil 5.5' te gibi meydana gelmiştir.

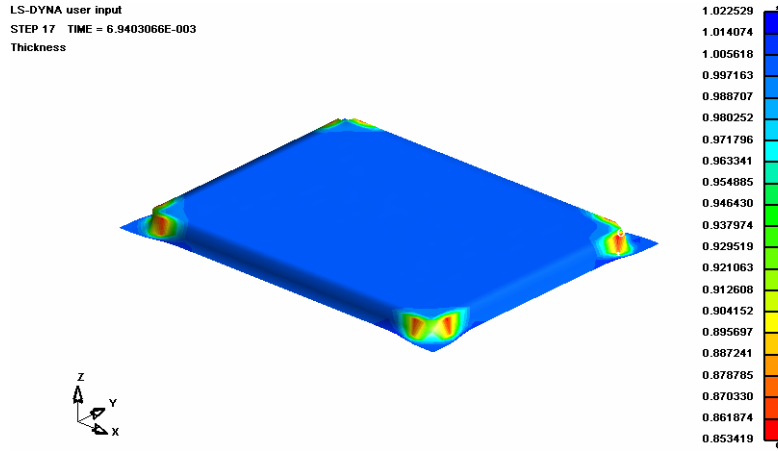


Şekil 5.5 Sac parça üzerindeki Von mises gerilmeleri (MPa)

Derin çekme analizinden elde edilen sonuca göre maksimum Von mises gerilmesi sac parçasının üst kısmının köşelerinde meydana gelmiştir. Orta kısımda ise gerilme az olduğu görülmektedir (Şekil 5.5). Bunun sebebi Von mises kriterine göre asal gerilmelerin devreye girmesi yani düşey yönde gerilme değerini de dikkate alınmasıdır.

5.5 Parça Üzerinde Sac Kalınlığının Değişimi

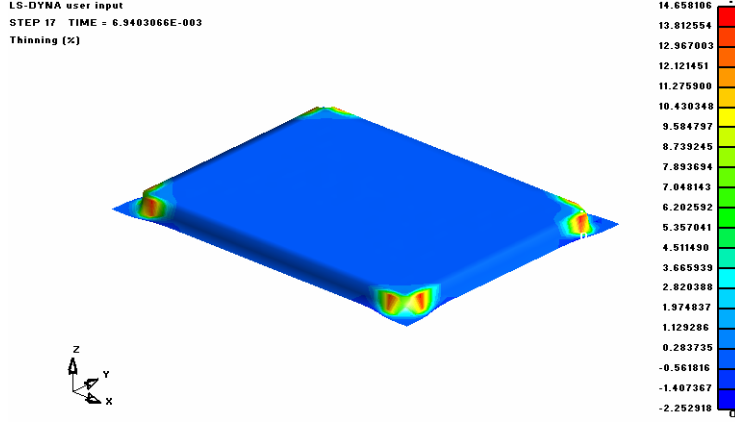
Derin çekme işlemi sonucu; iş parçasının soğuk şekillendirmeye zorlamasından dolayı sac parçasının üzerinde kalınlık değişimi meydana gelebilmektedir. Gerçekte sacın her tarafında kalınlığın değişmemesi istenir. Fakat teoride yapılan hesaplamalar ile gerçek sonuçlar birbirini karşılamayabilir. Bu yüzden derin çekme işleminde kalınlık değişiminin oluşması engellenemez bir dezavantaj gösterilebilir.



Şekil 5.6 Sac parçasının kalınlık değişimi (mm)

Derin çekme analizinden elde edilen sonuca göre parça üzerinde meydana gelen kalınlık değişimi Şekil 5.6' da gibidir. Gerçek derin çekme işlemi ve analizde 1 mm kalınlığında Al 1017 çelik sac malzeme kullanılmıştır. Analiz sonucuna göre sac parçası üzerinde kalınlığın azalması ve artması olmak üzere 2 durum söz konusudur. Parçanın özellikle köşe kısımlarında 0.15 mm incelme, diğer kısımlarda ise 0.02 mm artış görülmektedir (Şekil 5.6). Gerçekte çekilen parçamızdan alınan sonuçlarda incelme ve kalınlaşma bölgelerinin aynı olduğu görülmüştür. Değer olarak ise incelmenin 0.1 mm, kalınlık

artışının da 0.01 olduğu belirlenmiştir. Parçanın köşe kısımlarında incelme; derin çekme işlemi esnasında basınç yükünün köşelerde daha tesirli olmasından kaynaklanmaktadır. Sac parçasının incelme faktörünün derin çekme işlemi üzerindeki etkisi Şekil 5.7’ de görülebilir.



Şekil 5.7 Parça üzerinde incelme (mm)

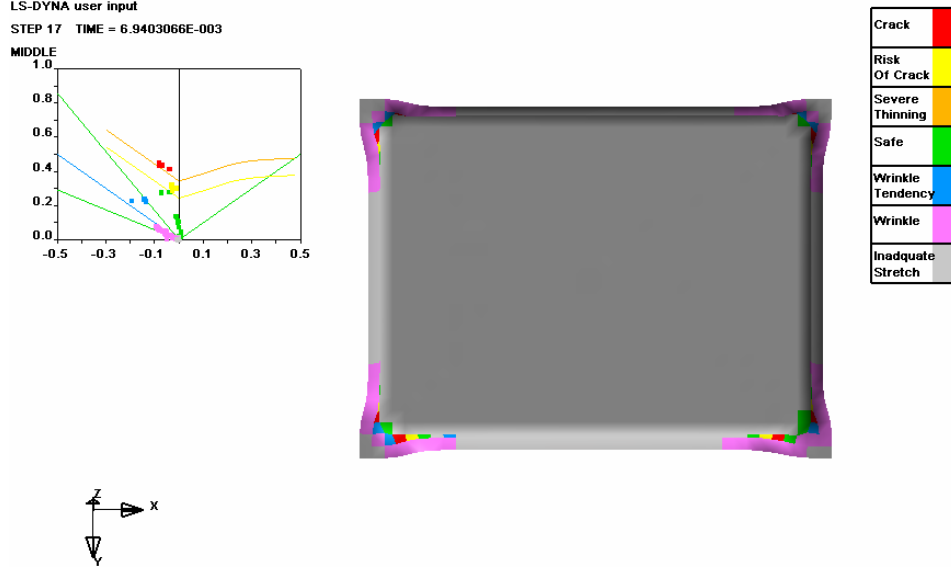
Çizelge 5.1 Kalınlık ve incelme değerlerinin gerçek deney numune sonuçları ile karşılaştırılması

	Kalınlık	İncelme
Analiz sonuçları	0.02 mm	0.15 mm
Deneysel sonuçlar	0.01 mm	0.1 mm

5.6 Parça Üzerinde Buruşma Eğilimi ve Yırtılma

Derin çekme işlemi sonrası parçada buruşmanın olması istenmeyen bir olaydır. Fakat sac malzemesi ve takım tasarımı gibi faktörlerden dolayı meydana gelebilmektedir. DYNAFORM sonlu eleman paket programı derin çekme işleminin sanal ortamda simülasyonuna imkân vererek parça üzerinde hangi kısımlarında yırtılma ve buruşmaların meydana geleceğini görmemize yardımcı olmaktadır. Analizden elde

edilen sonuca göre parça üzerinde buruşmaların ve yırtılmaların hangi kısımlarda olabileceği Şekil 5.8’ de görülmektedir.



Şekil 5.8 Parça üzerinde buruşma ve yırtılma

Analiz sonucuna göre parça üzerinde kırmızı renkli kısımlar yırtılmanın, sarı renkli kısımlar yırtılma riskini içerdiği, kahve renkli kısım incelmenin en fazla olduğu, mavi renkli kısım buruşma eğiliminin olduğu, mor renkli kısım ise buruşmanın meydana geldiği, yeşil renkli kısım ise güvenli olan kısımları göstermektedir. Buna göre; buruşma parçanın köşe kısımlarına yaklaşıldıkça artmakta ve köşe en yakın kısımlardan yırtılabilmektedir. Parçada gerçek derin çekme işlemi sonrasında yırtılma meydana gelmemiştir. Programın % 80 gerçeğe yakın sonuçlar verdiği göz önünde bulundurularak analizler gerçekleştirilmiştir.

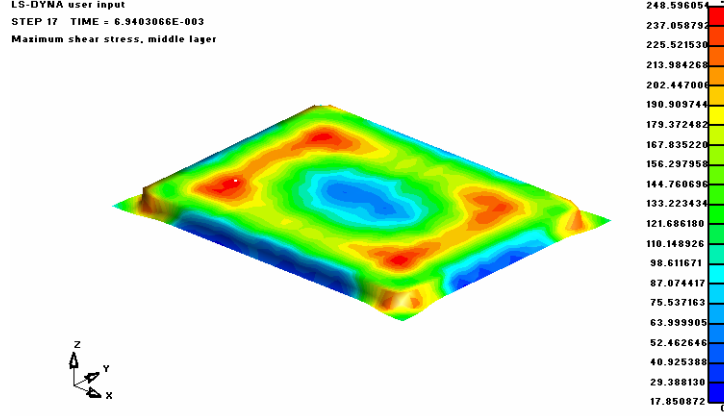


Şekil 5.9 Derin çekilmiş gerçek sac parçası

Sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen analiz sonuçları ile gerçek derin çekme işlemine tabii olmuş sac parçası üzerindeki buruşmalar aynı olduğu tespit edilmiştir. Gerçek sac parçası üzerinde meydana gelen baskı plakasının yükünün fazla olmasından kaynaklanan buruşmalar oluşmuştur. Kırmızı halkalar içerisinde kalan kısımlar gerçek sac parçası üzerindeki buruşmaları göstermektedir (Şekil 5.9).

5.7 Parça Üzerinde Kayma Gerilmeleri

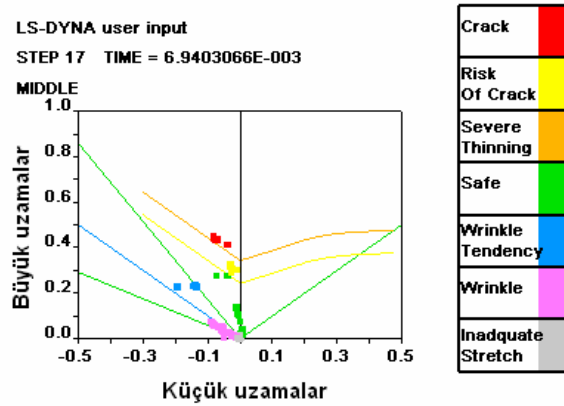
Derin çekme analizi sonucu sac parçasının üzerinde gerilimler meydana gelmektedir. Bu gerilmelerden birisi de kayma gerilmesidir. Çekme işleminden sonra parçanın hangi kısımlarda maksimum kayma gerilmesinin meydana geldiği analiz sonuçlarında görülebilir (Şekil 5.10).



Şekil 5.10 Parça üzerindeki maksimum kayma gerilmesi (MPa)

5.8 Şekillendirme Sınır Diyagramı

Sacın simülasyonundan sonra elemanların şekillendirme sınır diyagramındaki (ŞSD) görünümü Şekil 5.11’ deki gibi olmuştur. ŞSD grafikteki farklı renkli eğriler küçük uzamalara göre yırtılmadan gerçekleşebilecek maksimum uzamanın değişimini göstermektedir ve sac tanımında verilmesi gereken bir bilgidir. Bu grafikteki kırmızı noktalar yırtılma bölgesine hemen altındaki sarı noktalar yırtılma riskinin olduğunu, yeşil renk yeterli gerilmenin bulunduğu kaliteli çekme bölgesini, mavi kırışmaya eğilim ve mor kırışma bölgesini belirtmektedir. Mor bölgelerin negatif küçük uzama mutlak değerinin büyük uzamadan fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 5.11 Şekillendirme sınır diyagramı

6. GENEL SONUÇ

Bu çalışmada; Sonlu elemanlar metodunun derin çekme işlemine uygulanması ve gerçek bir sanayi parçası ile analiz sonuçlarının karşılaştırılması incelenmiştir. Sonlu elemanlar metodu için DYNAFORM 5.0 yazılımı kullanılmıştır. Deneysel parça olarak TERMİKEL şirketinin üretmiş olduğu fırın ön sacı belirlenmiş ve deneyler gerçekleştirilmiştir.

Fırın ön sacı derin çekilmeden önce üretici firmanın en verimli bir şekilde derin çekme yaptığı şartlar alınmış ve yazılımda analizler gerçekleştirilmiştir. Seçilen yazılım % 80 oranında fiziksel sonuçları yansıttığı yazılımın Türkiye satıcısı FİGES firması tarafından belirtilmiştir. Analizler sonucunda fırın ön sac parçasının bazı bölgelerinde kırışma, incelme, etek bölgelerinde kulaklanma ve birkaç bölgede yırtılma meydana geldiği görülmüştür.

Analizlerin sonuçlarının doğrultusunda fırın ön sacında meydana gelen kırışmaların ve kulaklanmaların baskı plakası yükünün fazla olmasından kaynaklandığı söylenebilir.

Analizlerde uygulanan şartların aynısı deneysel parçaya uygulanmış ve deneysel parçanın benzer bölgelerinde kırışma, incelme, etek bölgelerinde kulaklanma meydana gelmiştir. Fakat yırtılma bölgesi oluşmamıştır. Bunun sebepleri araştırıldığında yazılımın yırtılma riski olan bölgeleri yırtılmış gibi gösterdiği bulunmuştur. Bu durumun sebebi; analiz sonuçlarının yazılım tarafından gerçeğinden daha abartılı bir şekilde gösterilmesinden kaynaklanmaktadır.

Sonlu elemanlar metodunun derin çekme işlemine uygulandığı bu çalışmada gerçek derin çekme işlemi ile analiz sonuçlarının tutarlılığı belirlenmeye çalışılmıştır. Uygulanan sınır şartları tek hızdan oluşmuş ve hataların optimizasyonuna dikkat edilmemiştir. Bundan sonraki çalışmalarda farklı hızlar denenerek optimizasyon ve kalıp yüzeyi iyileştirme konuları incelenebilir. Ayrıca farklı malzeme özellikleri kullanılarak malzeme idealizasyonu yapılabilir.

7. KAYNAKLAR

- Alıcı, İ., 2001, “Derin Çekme Saclarının Deformasyon Davranışının İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Altıntaş, S., 1984, “Biçimlendirme Sınır Diyagramları Ve Kullanımı”, 8. Metalurji Sempozyumu, İstanbul.
- Astm E8, 1989, “Standard Test Methods of Tension Testing of Metallic Materials, American Society of Testing And Materials, New York.
- Bodur, O., H., 1975, “Metallere Plastik Şekil Verme Usulleri, Birsen Yayınevi”, İstanbul.
- Çapan, L., 2003, “Metallere Plastik Şekil Verme”, Çağlayan Kitabevi, 4. Baskı, İstanbul.
- Demirci, H.İ., Yaşar, M., Demiray, K., Karalı, M., 2005, “Derin Çekme İşlemlerinde Baskı Plakasının Cidar Kalınlığı Üzerindeki Etkisinin Ansys Ls-Dyna İle İncelenmesi”, 4. İleri Teknolojiler Sempozyumu, Konya.
- Duchêne, L. ve Habraken A.M., 2005, “Analysis of The Sensitivity of FEM Predictions to Numerical Parameters in Deep Drawing Simulations”, European Journal of Mechanics, Volume 24, Pages 614-629.
- Dynaform-Pc Applications Manual, Version 1.0, 1999, Engineering Technology Associates.
- Dynaform-Pc eta/PostGL Post Tutorial, Version 1.0, 1999, Engineering Technology Associates.
- Eta/PostGL Graph Tutorial, Version 1.0, 1999, Engineering Technology Associates.

- Gantar, G., Kuzman, K., Filipic, B., 2005, "Increasing The Stability of The Deep Drawing Process By Simulation-Based Optimization", Journal of Materials Processing Technology, Volume 164-135, Pages 1343-1350.
- Gavas, M. ve İzciler, M., 2006, "Deep Drawing With Anti-Lock Braking System (ABS)", Mechanism and Machine Theory, Volume 41, Pages 1467-1476.
- Gavas, M., Yaşar, M., 2006, "Al-1050 Alaşımlı Alüminyum Sacın Kare Derin Çekilmesi ve Teorik Modelinin Oluşturulması", Teknoloji, Cilt 9, Sayı 2, Say. 119-126.
- Güneş, T., 1990, "Pres işleri Tekniği Bölüm II, TMMOB-MMO Yayınları, Yayın No: 130, Ankara.
- Gündü, T., 2000, "Derin Çekme Saclarında Derin Çekilebilirlik Özelliklerinin Belirlenmesi", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Huaibao, W., Weili, X., Zhongqin, L., Yuying, Y., Wang, Z.R., 2002, "Stamping And Stamping Simulation with a Blankholder Gap", Journal of Materials Processing Technology, Volume 120, Pages 62-67.
- Hongzhi, D. ve Zhongqin, L., 2000, "Investigation of Sheet Metal Forming by Numerical Simulation and Experiment", Journal of Materials Processing Technology, Volume 103, Pages 404-410.
- Jimma, J., Kasuga, Y., Iwaki, N., Miyazawa, O., Mori, E., Ito, K., Hatano, K., 1998, "An Application of Ultrasonic Vibration to The Deep Drawing Process", Journal of Materials Processing Technology, Volume 80-81, Pages 416-412.

- Karalı, M., 2006, “Silindirik Derin Çekme İşleminde Zimba Uç Formunun Cidar Kalınlık Dağılımına Etkisinin SEY Yöntemiyle İncelenmesi”, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, Sayı 4, say. 53-57.
- Keeler, S.P., 1968, “Understanding Sheet Metal Formability, Machinery, Vol: 74 (No.6-11), Feb.-July.
- Kırlı, O., 2003, “Derin Çekme İle Soğuk Şekillendirmenin Sonlu Elemanlar Metodu Yardımıyla Non-Linear Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bornova-İzmir.
- Kim, H.K., Hong, S.K., 2007, “FEM-Based Optimum Design of Multi-Stage Deep Drawing Process of Molybdenum Sheet”, Journal of Materials Processing Technology, Article In Press.
- Lingbeek, R., Huetink, J., Ohnimus, S., Petzoldt, M., Weiher, J., 2005, “The Development of A Finite Elements Based Springback Compensation Tool For Sheet Metal Products”, Journal of Materials Processing Technology, Volume 169, Pages 115-125.
- 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.
- Manabe, K., Koyama, H., Yoshihara, S., Yagami, T., 2002, “Development of A Combination Punch Speed And Blank-Holder Fuzzy Control System For The Deep-Drawing Process”, Journal of Materials Processing Technology, Volume 125-126, Pages 440-445.

Meinders, T., Carleer, B.D., Geijselaers, H.J.M., Huetink, J., 1998, “The Implementation of An Equivalent Drawbead Model In A Finite-Element Code For Sheet Metal Forming”, Journal of Materials Processing Technology, Volume 83, Pages 234-244.

Özgür, R., 2005, “Paetli Kompresör Rotorunun Sonlu Elemanlar ile Gerilme Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.

Topaç, M.M., 2003, “Karbonlu Çeliklerde Derin Çekmeye Etki Eden Faktörlerin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

Topçu, M. ve Taşgetiren, S., 1998, “Mühendisler için Sonlu Elemanlar Metodu”, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Ders Kitapları Yayın No:007, Mühendislik Fakültesi Matbaası, Denizli.

Weili, X., Huibao, W., Yuying, Y., Wang. Z.R., 2002, “A Simplified Method of Wrinkling Simulation”, Journal of Materials Processing Technology, Volume 121, Pages 19-22.

7.1 İnternet Kaynakları

Erişim Tarihi

1. <http://www.grupotomasyon.com.tr>

06.09.2006

2. <http://www.figes.com.tr>

08.08.2006

8. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: Arif GÖK

Doğum Yeri: Zonguldak

Doğum Tarihi: 08.10.1981

Medeni Hali: Evli

Yabancı Dili: İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yılı)

Lise: Zonguldak Teknik ve Endüstri Meslek Lisesi

Lisans: Dumlupınar Üniversitesi

Yüksek Lisans: Afyon Kocatepe Üniversitesi

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıllar

MET Makina, CAD/CAM Sorumlusu, KÜTAHYA, 2002-2003.

AKYOL Makina, ARGE Sorumlusu, KÜTAHYA, 2003-2005.

Ankara Üniversitesi Kastamonu Meslek Yüksekokulu, Öğretim Görevlisi, 2006-devam ediyor.

Yayınları (SCI ve diğer)

1. GÖK, A., GÖK K., ÜNAL, G., ALKAN M., GAYRETLİ A., 2007, “Farklı Malzemelerin Derin Çekilebilirliklerinin Sonlu Elemanlar Metodu İle Non-Linear Analizi”, Metalurji Malzeme dergisi, yayında.

2. ALKAN, M., GÖK, K., GÖK, A., ÜNAL, G., 2007, “Farklı Malzeme Özelliklerine Sahip Yük Kancasının Nümerik Olarak Modellenmesi”, Metal Makine dergisi, 163.sy.

3. GÖK, K., GÖK, A., ALKAN, M., 2007, “CAD/CAM Sistemlerinin Kalıp İmalatında Uygulanması”, Kalıp rehberi dergisi, 4.sy.

4. ÜNAL, G., GÖK, A., GÖK, K., 2007, “Türkiye’de İş Kazalarının Sektörler Ve Meslekler Bazında Analizi”, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dumlupınar Üniversitesi,yayında.
5. ÜNAL, G., GÖK, A., GÖK, K., 2007, “Türkiye’deki İş Kazalarının İl Bazında Analizi”, TEKNOLOJİ, Karabük Teknik Eğitim,yayında
6. ÜNAL, G., GÖK, A., GÖK, K., 2007, “Occupational Accident Characteristics in Turkey”, *Archives of Environmental and Occupational Health*, (pressing)
7. GÖK, K., GÖK, A., ÜNAL, G., KARAKUŞ, M., 2007, Investigation as Experimental of Effect on Machinability with Cemented Carbide tool of Austempered Process, *Journal of Materials Processing Technology* (pressing)
8. GÖK, A., GÖK, K., ÜNAL, G., Bilimsel Seminer, “Bilgisayar Destekli Üretim Günümüz Teknolojisindeki Yeri ve Önemi”, Akdeniz Üniversitesi.
9. GÖK, A., GÖK, K., ÜNAL, G., ALKAN, M., 2007, “Aynı Kalınlıktaki Levhaların Alın Kaynağı İle Birleştirilme Şekillerinin Gerilme Yığılmasına Etkisi, TEKNOLOJİ, Cilt 10, Sayı 1, 185-193, Karabük Teknik Eğitim

Kitaplar

1. GÖK A.,GÖK K., MasterCAM, Pusula Yayıncılık, 2004
2. GÖK A.,GÖK K., CATIA, Pusula Yayıncılık, 2006
3. GÖK A.,GÖK K., AutoCAD 2006, Seçkin Yayıncılık, 2006
4. GÖK A.,GÖK K., AutoCAD 2007, Seçkin Yayıncılık, 2007
5. GÖK A.,GÖK K.,ÜNAL G., CATIA UYGULAMALARI, Seçkin Yayıncılık, 2007
6. GÖK A.,GÖK K.,ÜNAL G., SolidWORKS, Seçkin Yayıncılık, 2007(Basımda)