

T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDE YÜKSEK MUKAVEMETLİ SACLARIN
ŞEKİLLENDİRİLEBİLME ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Gökalp UYSAL

YÜKSEK LİSANS TEZİ
KONSTRÜKSİYON – İMALAT ANABİLİM DALI

BURSA 2006

ÖZET

Otomotiv endüstrisinde yolcu güvenliği, araç performansı ve yakıt ekonomisi üzerinde oluşan yeni gereksinimler doğrultusunda sektörde geliştirilmiş yüksek mukavemetli çeliklerin (Advanced High Strength Steels,AHSS) kullanımı günden güne artmaktadır. Geliştirilmiş yüksek mukavemetli çeliklerin kullanımıyla, mukavemetin artışı ile kazanılan avantajın yanısıra , malzemenin soğuk şekillendirilebilirliğinin azalması ve geri yaylanma davranışının artışı gibi bazı dezavantajları da mevcuttur . Bu çalışmada örnek seçilmiş bir parça üzerinde farklı malzemeler kullanarak, soğuk şekillendirme ve geri yaylanma simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlarda farklı tür çelik sac malzeme kullanılarak yüzey basınçları, form verilebilirlik, geri yaylanma davranışları karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler

Geliştirilmiş yüksek mukavemetli çelikler, soğuk şekillendirme, geri yaylanma, çarpma simülasyonu

COMPARISON OF COLD FORMABILITY PROPERTIES OF HIGH STRENGTH STEELS IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY

ABSTRACT

In the automotive industry, according to new needs occurring in passenger safety, vehicle performance, and fuel economy, the usage of Advanced High Strength Steels (AHSS) is increasing day by day in this sector. With the usage of Advanced High Strength Steels, in addition to getting the advantage of strength increase, there are some disadvantages like decrease of materials cold formability and increase in the action of springback. In this study, cold forming and springback simulations have been realised using different materials on the chosen sample piece. Using different kinds of steel materials in the simulations, conduct of contact pressures, formability and springback have been compared.

Keywords;

Advanced high strength steels, cold forming, springback, crash simulation

İÇİNDEKİLER

1- GİRİŞ	1
2- KONUYLA İLGİLİ ÇALIŞMALAR	2
3- MATERYAL VE YÖNTEM	3
3.1.Derin Çekme	3
3.1.1.Derin Çekme İşlemi Uygulamaları	3
3.1.2.Derin Çekme İşleminde Kullanılan Elemanlar	5
3.2.Şekillendirmeyi Etkileyen Faktörler	7
3.2.1.İşlem Değişkenleri	7
3.2.2.Malzeme Değişkenleri	9
4- SAC MALZEMELERİN SINIFLANDIRILMASI VE ÖZELLİKLERİ	12
4.1.Düşük Mukavemetli Saclar	14
4.2.Yumuşak Saclar	14
4.3.Arayer Atomsuz Saclar	15
4.4.Yüksek Mukavemetli Saclar (Konvansiyonel)	15
4.5.Fırında Sertleştirilebilen Saclar	16
4.6.İzotropik Saclar	16
4.7.Yüksek Mukavemetli Arayer Atomsuz Saclar	16
4.8.Yüksek Mukavemetli Düşük Alaşımli Saclar	17
4.9.Geliştirilmiş Yüksek Mukavemetli Saclar	17
4.9.1.Çift Fazlı Saclar	17
4.9.2.Dönüşümle Oluşturulan Plastisite Saclar	20
4.9.3.Kompleks Fazlı Saclar	22
4.9.4.Martenzitik Saclar	23
5- GELİŞTİRİLMİŞ YÜKSEK MUKAVEMETLİ SACLARIN AVANTAJLARI	24
5.1.Araç Güvenliği	24
5.2.Çevresel Nedenler	25
5.3.Araç Maliyeti	25
6- SİMÜLASYON PROGRAMINDA MALZEME DAVRANIŞI TANIMLARI	26
6.1.Elastik Malzeme Davranışı	26
6.2.Akış Eğrisi	27
6.2.1.Akış Eğrisinin Çekme Deneyinde Belirlenmesi	28
6.2.2.Akış Eğrisine Yaklaşım Metodları	29
6.3. r Değeri	32

6.4.Akma Yüzeyi Ve Çift Eksenli Gerilim Faktörü	34
6.5.Yüksek Gerilim Eğrisi	36
6.6.Uzama Limitleri Eğrisi Ve Diyagramı	38
7- SOĞUK ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ	42
7.1.Sac Şekillendirme Sonuçları	42
7.2.Yüzeylerde Oluşan Basınçlar	45
7.3.Geri Yaylanma Davranışı	47
7.3.1. Geri Yaylanma Tipleri	48
7.3.1.1.Açısal Değişim	49
7.3.1.2.Etek / Yan Duvar Bombeleşmesi	49
7.3.1.3.Burulma	51
7.3.2. Geri Yaylanma Çözümleri	52
8- Sonuçlar	59
9- Kaynaklar	61
10- Özgeçmiş	62
11- Teşekkür	63

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3. 1 Form verilmiş yuvarlak bir kabın duvarlarındaki gerilme etkileri	3
Şekil 3. 2 Çekme Kalıbının Bölümleri	4
Şekil 3. 3 Sacın Pot ile Dişi Arasında Tutulması	6
Şekil 3. 4 Form Verme Başlangıcı (İlk Deformasyon)	6
Şekil 3. 5 Form Verme Sonu (Çekme)	6
Şekil 3. 6 Uzama Limitleri Diyagramı üzerinde yağlamanın etkisi	9
Şekil 3. 7 Hadde yönüne bağlı olarak izotropiklik	10
Şekil 3. 8 Hadde yönüne bağlı olarak izotropiklik	11
Şekil 4. 1 Sac malzemelerin çekme mukavemet değerlerine göre gruplandırılması	13
Şekil 4. 2 Çift Fazlı Sacın Mikro Yapısı	18
Şekil 4. 3 Farklı Malzeme Türlerinin Gerilim - Gerinim grafikleri	18
Şekil 4.4 GYMÇ ve YMCÇ'lerin fırında sertleşebilirlikleri	19
Şekil 4.5 Dönüşümle Oluşturulan Plastisite Sacların Mikro Yapısı	20
Şekil 4.6 TRIP ve HSLA malzemelerinde delik uzamasının karşılaştırılması	21
Şekil 4.7 Farklı Malzeme Türlerinin Gerilim - Gerinim grafikleri	21
Şekil 4.8 Martensit yapılu malzemenin karbon miktarının çekme mukavemeti ile ilişkisi	23
Şekil 5.1 Farklı Malzemelerin Enerji Emme Miktarlarının Karşılaştırılması	24
Şekil 6.1 Poisson oranının şematik gösterimi	26
Şekil 6.2 Yumuşak çelikler için tipik akış eğrisi kopma noktası	27
Şekil 6.3 Çekme deneyi numunesi ve şematik gösterimi	28
Şekil 6.4 Akış eğrisine yaklaşım	29
Şekil 6.5 Gerilime bağlı olarak örnek r- değerleri.	32
Şekil 6.6 Hadde yönü	32
Şekil 6.7 Değişik r_0 , r_{45} , r_{90} değerlerine bağlı olarak küresel sac çekilmesi	33
Şekil 6.8 Hill 48 modelindeki akma mukavemetleri	34
Şekil 6.9 Hill 79 modelindeki akış yüzeyi ve biaxial mukavemet faktörü	35
Şekil 6.10 Gerilim oranının fonksiyonu olarak maksimum mukavemet katsayısı	37
Şekil 6.11 Farklı gerilim oranlarındaki akış eğrileri, farklı akış eğrileri gerilimleri	37
Şekil 6.12 Major temel gerilmenin ve Minör temel gerilmenin Ölçülmesi	39
Şekil 6-13 Çekme deneyindeki gerilmenin şematik gösterimi	39
Şekil 6.14 Bulge testindeki mukavemet/gerilme durumu	40
Şekil 6.15 Uzama limit eğrisi	40

Şekil 6.16 Malzeme kopma tahminleri için FLD 'nin kullanılması	41
Şekil 7.1 Simülasyon Çalışmaları İçin Örnek Seçilen Parça Geometrisi	42
Şekil 7.2 Parça Form verilebilirlik Görüntüleri	43
Şekil 7.3 Parçaların Çekme Kalıbından Çıkmış Hali	44
Şekil 7.4 Şekil 7.3 içerisindeki A Bölgesinin Detay Resmi	44
Şekil 7.5 DP600 Çekme Operasyonunda Yırtılma Yapan Bölgeler	45
Şekil 7.6 Yüzeylerde Oluşan Basınçlar	46
Şekil 7.7 Farklı Malzeme ile aynı kalıpta basılmış sac parçalar	47
Şekil 7.8 Sac malzemedeki geri yaylanma davranışı grafiksel	48
Şekil 7.9 Açısal Değişim ve Etek Yan duvar Bombelenmesi	49
Şekil 7.10 Açısal Değişim ve Etek Yan duvar Bombelenmesi	50
Şekil 7.11 Parçalarda Burulma	51
Şekil 7.12 Bükme Çeliklerine İlave Edilen Ek Form	53
Şekil 7.13 Açısal değişim ve etek bombeleşmesinin azaltılması için örnek çözümler	53
Şekil 7.14 Baskı tamponu ve Üst bükme Çeliğine eklenen formlar	54
Şekil 7.15 Çalışma boşluğunun etkisi	55
Şekil 7.16 Farklı form verme metodlarının	55
Şekil 7.17 Geri yaylanma sonuçları	57

ÇİZELGELER DİZİNİ

Tablo 4.1 farklı kalitelerde yüksek mukavemetli sacların özellikleri	14
Tablo 4.2 Çift Fazlı Sacların Kimyasal Bileşimi	20
Tablo 5.1 Farklı çekme mukavemet değerlerine sahip sacların parça ağırlığına etkisi	25
Tablo 6.1 Çelik ve Alüminyum Malzeme için E Değeri	26
Tablo 6.2 Çeşitli Malzemeler İçin r Değerleri	33
Tablo 7.1 Malzemelerin Mekanik Özellikleri	43
Tablo 7.2 Formlama Simülasyonu Sonuçları Özet Tablo	58

SİMGELER DİZİNİ

Simge	Tanım
E	Elastiklik
K	Dayanım sabiti
R	Zımba yarıçapı
e_1	Mühendislik büyük birim şekil değişimi
e_2	Mühendislik küçük birim şekil değişimi
n	Pekleşme sabiti
m	Deformasyon hızına duyarlılık üsteli
r	Plastik anizotropi faktörü
r	Düsey anizotropi faktörü
Dr	Düzlemsel anizotropi faktörü
t	Sac kalınlığı
e_1	Gerçek büyük birim şekil değişimi
e_2	Gerçek küçük birim şekil değişimi
s_{AK}	Akma dayanımı
s_C	Çekme dayanımı
e	Efektif birim şekil değişimi
s	Efektif gerilme
d	Çift eksenli basınç faktörü
ν	Poisson Oranı

1.GİRİŞ

Otomotiv endüstrisinde yolcu güvenliği, araç performansı ve yakıt ekonomisi üzerinde oluşan yeni gereksinimler doğrultusunda sektörde Geliştirilmiş Yüksek Mukavemetli Çeliklerin (GYMÇ) (Advanced High Strength Steels,AHSS) kullanımı günden güne artmaktadır. Geliştirilmiş yüksek mukavemetli çeliklerin kullanımıyla, mukavemetin artışı ile kazanılan avantajın yanısıra , malzemenin soğuk şekillendirilebilirliğinin azalışı ve geri yaylanma davranışının artışı gibi bazı dezavantajları da mevcuttur.

Geliştirilmiş yüksek mukavemetli sacların ortaya çıkmasında ve sürekli geliştirilmesinde ana rol oynayan iki neden vardır, birincisi benzer mukavemet değerlerine sahip yüksek mukavemetli düşük alaşımlı saclara oranla daha iyi formverilebilirlik özelliklerine sahip saclar olmaları, ikincisi ise Yüksek Mukavemetli Düşük Alaşımlı (YMDA) sacların ulaşamadığı yüksek mukavemet değerlerine ulaşabilmesidir.

İlerleyen bölümlerde detaylı olarak anlatılacak olan Geliştirilmiş Yüksek Mukavemetli Saclar temelde dört ana gruba ayrılabilir, Çift Fazlı Saclar (DP), Dönüşümle Oluşturulan Plastisite Saclar (TRIP), Kompleks Fazlı Sacları (CP) ve Martensitik Yapılı Saclar (Mart).

Geliştirilmiş Yüksek Mukavemetli Sacların yüksek formverilebilirlik özellikleri kompleks parça geometrilerinin üretimini mümkün kılar, bunun sonucu olarak tekil parça sayısının azalması ve üretimde esnekliğin artması ile maliyet, ağırlık ve mukavemet kazancı ortaya çıkar. Daha az parça daha az kalıp, daha az kaynak, daha düşük taşıma maliyetleri demektir. Tasarıma ve malzemeye bağlı olarak enerji emme kapasitesindeki artış, sac kalınlığını düşürebilme imkanına ve dolayısı ile parça ağırlığında azalma anlamına gelmektedir.

2. KONUYLA İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Yüksek mukavemetli çeliklerin/sacların soğuk şekillendirilmesi konusu ile ilgili yapılan çalışma ve uygulamalar özellikle son 5 – 10 yıldır ciddi bir oranda artış göstermiştir. Araştırmalar yüksek mukavemetli sacların geri yaylanma davranışları, proses kuvvetleri, form kalıbı için geliştirilen yüzeylerin prosese etkisi, simülasyon programlarının yeterlilikleri, kalıp malzemeleri ve tribolojik etmenler üzerine yoğunlaşmıştır.

Geliştirilmiş yüksek mukavemetli çeliklerin otomotiv endüstrisinde ilk kullanımları 18 ülkeden 35 farklı endüstri kuruluşunun ortak proje çatısı altında bir araya gelmesiyle gerçekleştirilmiştir. Bu projelerin ilki 1995 yılında başlayan ULSAB (Ultra Light Steel Auto Body) projesidir. Bu projenin ardından sırasıyla 2000 yılında ULSAC (Ultra Light Steel Auto Closure), ULSAS (Ultra Light Steel Auto Suspensions) ve 2002 yılında ULS-AVC (Ultra Light Steel – Advanced Vehicle Concept) gerçekleştirilmiştir ve proje sonuçları sanayi kuruluşlarının kullanımı için “Advanced High Strength Steels Guidelines” adıyla Uluslararası Demir ve Çelik Enstitüsü tarafından rapor olarak yayınlamıştır. (<http://www.worldautosteel.org>)

Geliştirilmiş Yüksek Mukavemetli Çeliklerin otomotiv endüstrisinde kullanımıyla ilgili olarak “The Use Of Advanced High Strength Steel Sheets In The Automotive Industry” başlıklı makale Roma 1. Uluslararası Yüksek Mukavemetli Çelikler kongresinde yayınlanmıştır.(Federici, C., Maggi, S., Rigoni, S , 2005)

Isıl işlem yapılmış ve yapılmamış çeliklere çekme ve germe işlemlerine tabi tutularak uygun ısıl işlem metodunun araştırılması “Çift Fazlı Çelik Saclarda Şekil Alabilirlik” başlıklı makale DEÜ Mühendislik Fakültesi, Fen ve Mühendislik Dergisinde yayınlamıştır. (Çetinel, H.,2004)

Malzemeler üzerinde enerji emme miktarı açısından incelenerek “Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Çeliklerin Enerji Absorbsiyonu Açısından Karşılaştırılması” başlıklı makale OTEKON kongresinde yayınlanmıştır. (Kaya, N., Uysal, G., Öztürk, F. , 2006)

Geliştirilmiş Yüksek Mukavemetli sacları şekillendirmede kullanılacak kalıplarda malzeme seçimleriyle ilgili olarak “Tooling solutions for advanced high strength steels” başlıklı makale çelik üreticisi SSAB firmasının seminerinde yayınlanmıştır.(Olsson, K., SSAB Seminar 2005)

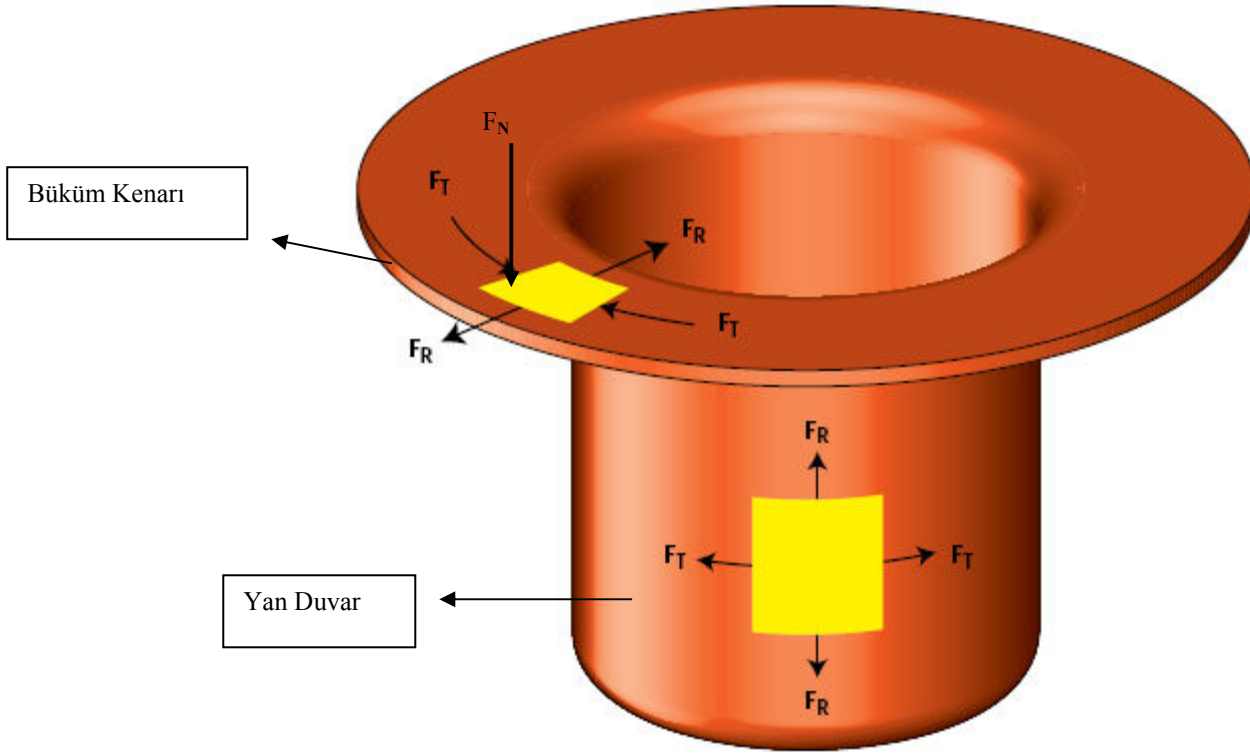
3. MATERYEL VE YÖNTEM

3.1.Derin çekme:

Derin çekme işlemi pot baskısı tarafından sıkıştırılan levha sac malzemenin erkek tarafından dişinin içerisine sıvanması 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 mukavemettir.

3.1.1.Derin çekme işleminin uygulamaları:

Endüstride derin çekme işleminin oldukça yaygın bir kullanımı vardır. Hatta bu işlem vasıtasıyla derin olmayan sığ parçaları bile üretmek mümkündür. Genel olarak üretilen parçalar içecek kutuları, derin kaplar, tencereler, tepsiler, koruyucu kaplar ve otomobil gövde parçalarıdır.



Şekil 3. 3Form verilmiş yuvarlak bir kabın duvarlarındaki gerilme etkileri (Schuler, 1998)

Büküm Kenarı:

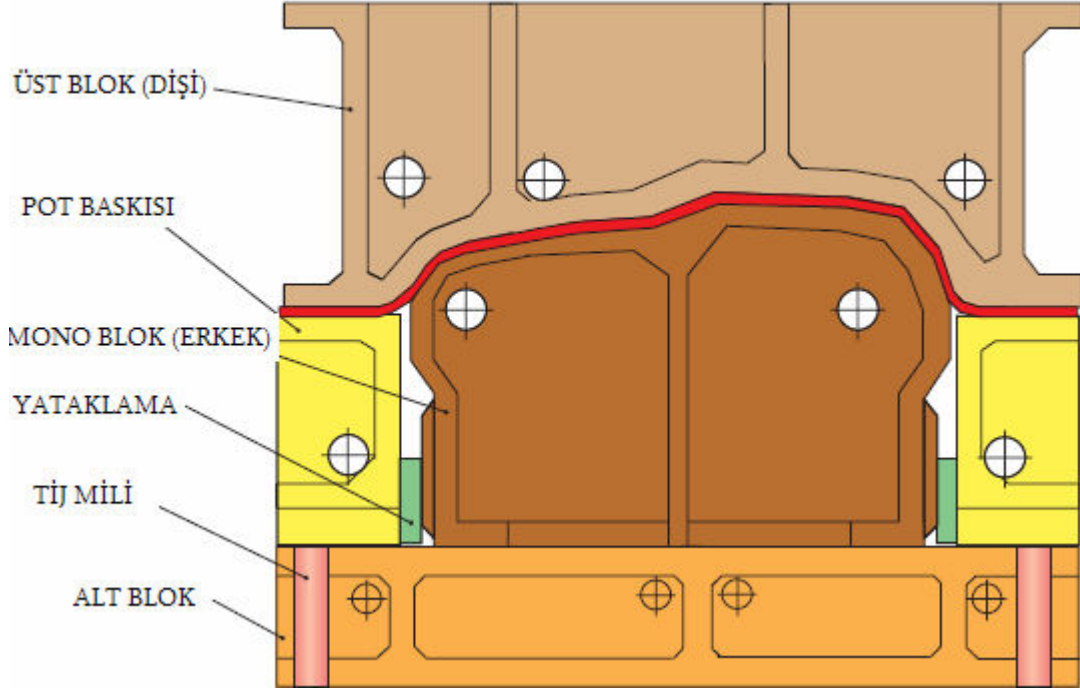
F_T : Kesite dik doğrultuda yüksek basınç gerilmesi (parça kalınlaşması) (Şekil 3.1)

F_N : Yüzeye normal yönde uygulanan potansiyel kuvveti (Kırışmayı önler) (Şekil 3.1)

F_R : Radyal yönde uygulanan sürtünme kuvveti (Şekil 3.1)

Yan duvar:

F_R : Yüksek çekme kuvveti sacı radyal yönde gerer. (Şekil 3.1)

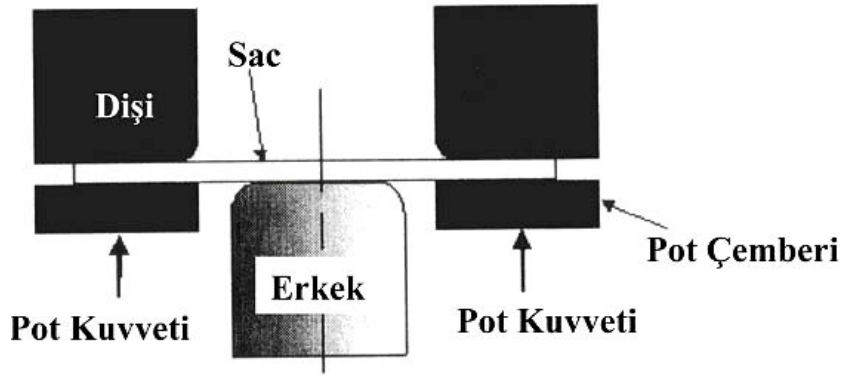


Şekil 3. 4 ekme Kalıbının Bölümleri (Schuler, 1998)

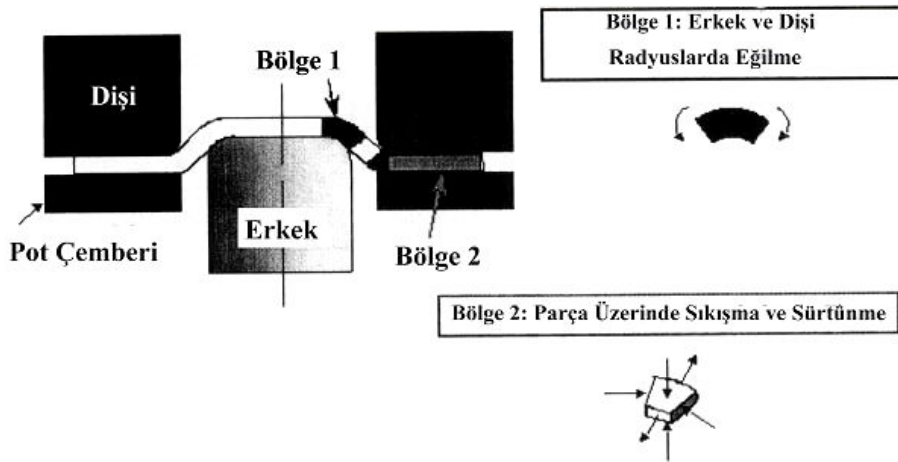
3.1.2. Derin ekme işleminde kullanılan kalıpların baŐlıca parçaları:

- **Üst Blok:** Kalıbın pres st tablasına bağlanması için kullanılır.(Şekil 3.2)
- **Alt Blok:** Kalıbın pres alt tablasına bağlanması ve kuvvet dengesi için pres alt tablası üzerinde konumlanması için kullanılır. Kalıp alt tablası ve Kalıp st tablası arasında merkezleyiciler bulunmalıdır. (Şekil 3.2)
- **Erkek :** Sac malzemeye Őekliini verir . Sacın dişinin içerisine itilmesini sağlar. Form verme esnasında öncelikle sac erkek ile temas eder, daha sonra sac nalzeme erkek üzerinde eğilmeye başlar. Erkek kuvvetinin devamı neticesinde sac malzeme akarak istenilen formu alır. (Şekil 3.2)

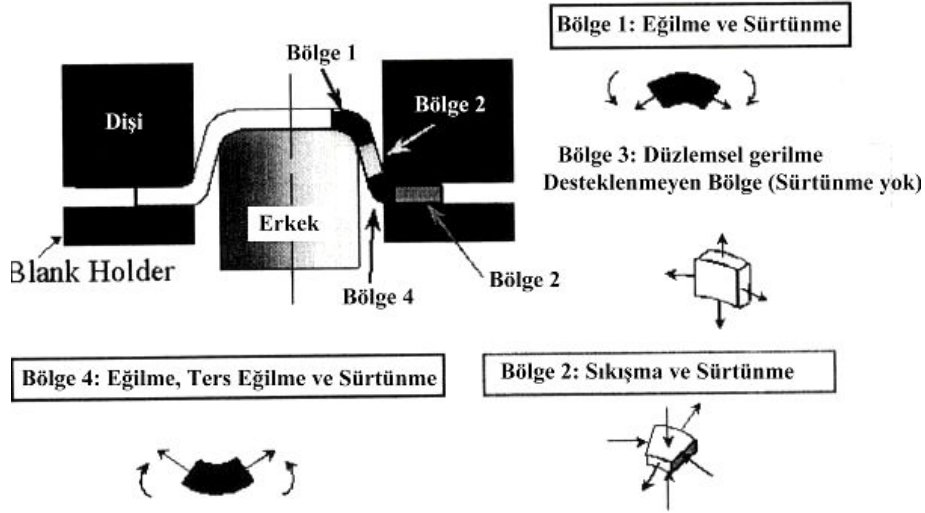
- **Dişi :** Dişi, sacın pot çemberi ile sıkıştırılmasına yardım eder. Aynı zamanda sacın son şeklini almasını sağlar. Form esnasında sac üzerinde oluşan sürtünme kuvveti sacın gerilmesini sağlar. Sac malzeme dişi içerisine aktıkça erkek ve dişi çevresindeki eğimden dolayı mukavemetlenir. (Şekil 3.2)
- **Pot çemberi:** Pot çemberi sacın dişi ile sıkıştırılmasını sağlayarak dişi içerisine düzgün akmasını sağlar. Form başlangıcında sacın gerilerek kırışmasını önler. (Şekil 3.2)
- **Tij milleri :** Pres alt tablasının altında bulunan yastıklardan pot çemberi için gereken kuvvetin taşınmasını sağlar. (Şekil 3.2)



Şekil 3. 3 Sacın Pot ile Dişi Arasında Tutulması (Autoform User Manual, 2002)



Şekil 3. 4 Form Verme Başlangıcı (İlk Deformasyon) (Autoform User Manual, 2002)



Şekil 3. 5 Form Verme Sonu (Çekme) (Autoform User Manual, 2002)

3.2 Şekillendirmeyi Etkileyen Faktörler

Sac metal formlamada proses ve form verilebilirliğin analizi için önemli temel faktörler söz konusudur. Bunlar işlem değişkenleri ve malzeme değişkenleri olarak iki ana başlık altında incelenebilir.

3.2.1 İşlem Değişkenleri

Kalıp ve zımba geometrileri, konfigürasyonları, kalıp mamul boşlukları, pot basıncı süzdürme uygulamaları gibi değişkenler sac şekillendirme işlemlerini etkileyen önemli parametrelerdir. Bu faktörler aynı zamanda şekillendirme işlemlerinin sınırlarını belirlemede önemli rol oynamaktadır. Bu parametreler arasında kalıp ve zımbaların köşe radyusları (çekme radyusu genellikle karmaşık parçalar için sabit değildir) bölgesel şekil değişimlerde çok etkin olmalarından dolayı oldukça önemlidir. Tasarımcılar tarafından keskin hatlara sahip karmaşık şekilli parçalar için küçük radyuslu zımbalar kullanmak zorunda kalmaktadır. Bu gibi durumlarda çekme radyusu ya bu hattın dışından geçmeli yada çekme operasyonunda bu değer büyütülüp kalibre operasyonunda istenilen değere düşürülmelidir. Küçük çekme radyuslarının oluşturduğu büyük yerel şekil değişimlerden dolayı imalatta büyük zorluklar çıkarmaktadır. Radyus üzerindeki bölgesel şekil değişimleri deformasyonun diğer bölgelere yayılmasını önleyerek hasar olasılığını artırır. Bu tür parçalarda yumuşak geçişlerin olmayışı, işlem sırasında kalıbın deformasyonunu takip edememesi problemini de meydana getirebilir. Ayrıca montaj sırasında zımba kalıp grubundaki eksen kaçıklıklarında şekillendirme sırasında da sac üzerinde oluşan farklı doğrultulardaki kuvvet bileşenlerini değiştirecektir. Genellikle imalat sırasında çekme kalıpları için plaka tipi yataklamalar kullanılmaktadır.

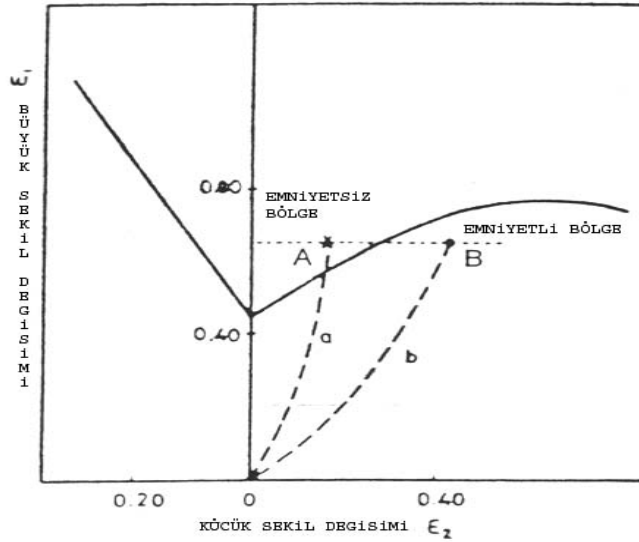
Baskı plakası basıncı şekillendirme sırasında germe ve derin çekme miktarlarını etkilemektedir. Baskı plakası basıncındaki artış derin çekmeye nazaran germe şekil değişimlerini arttıracaktır. Baskı plakası basıncı çok büyükse belirli bölgelerde baskı plakası ile dişi arasındaki sac kalınlık miktarını azaltacağından yırtılma, çok küçükse sacdaki kırışma isteğini engelleyemeyeceğinden kırışma meydana gelecektir. Sac üzerinde gerilme istendiğinde pot basıncını gereğinden fazla arttırmak yerine bu bölgelere süzdürme uygulanmalıdır.

Birden fazla şekil değiştirme işlemlerinde, ilk aşamada germe şekil değişimine uğrayan bölgeler bir sonraki aşamada derin çekme şekil değişimine uğrayabilir. Yükleme sırasındaki bu tür değişimler farklı

malzemeler üzerinde önemli etkilere sahip olabilir. Örneğin, konteyner imalatı için üretilen derin çekilmiş kaplarda ütüleme yöntemi kullanılarak çekme ve basma gerilimlerinin beraberce etkimesi ile sac kalınlıkları olabildiğince azaltılmaktadır. Optimum şartlarda yerine getirilen bu teknikler, derin çekme sırasında meydana gelen buruşuklukların giderilmesinde de oldukça etkili olmaktadır.

Düşük sünekliğe sahip yüksek dayanımlı malzemelerin germe ve bükme şekillendirme işlemlerinde genel olarak elastik kaplar kullanılır. Şekillendirme işlemi sırasında, elastik kaplar dışı kalıp görevi görürler. Zımbanın hareketi ile sac malzeme elastik kalıp içerisinde şekillendirilir ve zımbanın formunu alır. İşlem sırasında sac malzemeye elastik kalıp tarafından tüm doğrultularda aynı basınç uygulanır. Üniform bir basınç dağılımı söz konusu olduğundan basma gerilmeleri daha üniform bir incelmeye sağlar ve küçük radyuslar üzerindeki bölgesel şekil değişimleri ve bükme bölgelerindeki şekil değişimlerini azaltır. Şekillendirilmesi zor parçalar sık sık bu tür sac şekillendirme yöntemleri ile üretilmektedir. Şekillendirme sırasında metal akışı metal ile zımba – kalıp grubu arasındaki sürtünme kuvvetleri tarafından kontrol edilir. Bu kuvvetler şekil değiştirme hızına duyarlıdır. Bu artan şekil değişim hızı metalin sünekliğini etkileyerek azaltılabilir ve sacın gerilerek hasara uğramasına neden olabilir. Buna karşın artan hız kalıp ile sac arasındaki sürtünmeyi azaltarak daha üniform bir incelmeye meydana getirebilir. Ayrıca bir pres (mekanik pres) tam olarak üniform bir hız sağlayamamakta, sinüzoidal bir değişim göstermektedir. Bu nedenle artan hız ile malzeme üzerindeki bölgesel ısınmalar malzeme davranışlarının değişmesinde etkili olabilir. Sonuç olarak farklı deformasyon hızlarında farklı malzeme duyarlılığı elde edilebilmekte bu da şekillendirme özelliği üzerinde etkili olabilmektedir.

Yağlama, kalıp ile sac arasındaki sürtünmeyi azaltarak şekillendirme sırasında daha üniform şekil değişimlerinin meydana gelmesinde rol oynar. Yağlama şartlarının iyileştirilmesi ile deformasyon sırasındaki şekil değişim oranları da değişmekte, Şekil 3.6'da görüldüğü gibi hasar bölgesinde olan A noktası yağlamanın geliştirilmesi ile emniyetli bölgedeki B noktasına kaydırılabilmektedir.



Şekil 3.6 Uzama Limitleri Diyagramı üzerinde yağlamanın etkisi (Autoform User Manual, 2002)

a) Yağlama kullanılmamış b) Yağlama kullanılmış

3.2.2 Malzeme Değişkenleri

Üretim açısından sacların en önemli malzeme 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 haddeleme ile uygulanan ısı işlemlerden oluşan termo-mekanik geçmişi tarafından kontrol edilmektedir. Malzemenin bu özelliklerini belirlemek ve analiz edebilmek için aşağıdaki özelliklerin saptanması gerekmektedir.

✓ **Akma Dayanımı**

Belirgin bir üst akma noktası , katılma sırasında N, O, H, C gibi arayer atomlarının dislokasyon boşluklarına yerleşerek dislokasyonun hareketini önlediği basit karbonlu sakınletirilmemiş çelik gibi malzemelerde görülür. Bir parçanın tüm bölgelerinde kalıcı ve homojen bir şekil değişimi elde edebilmek için bu üst akma gerilmesi aşılmalıdır. Bu sebeple sac şekillendirme işlemlerinde malzemenin belirgin akma göstermesi istenmez.

✓ **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.

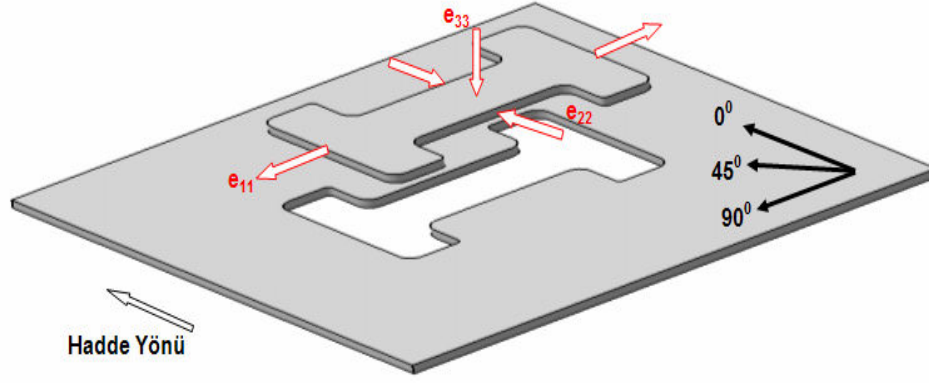
✓ **Deformasyon Hızına Duyarlılık Üsteli**

Metal malzemelerde deformasyon hızı ile malzemenin akma gerilmesi arasında $\sigma = C \cdot \dot{\epsilon}^m$ şeklinde tanımlanan bir ilişki mevcuttur. Burada $\dot{\epsilon}$ birim şekil değişim hızı , m deformasyon hızına duyarlılık üsteli ve C ise bir malzeme sabitidir. Malzemedeki şekil değiştirme dağılımında rol oynayan diğer bir faktörde şekil değişim hızına duyarlılıktır. Bu özellik artan şekil değiştirme hızı ile meydana gelen akma gerilmesindeki artış ile tanımlanır. Deformasyon hızına duyarlılık üsteli m'nin büyük değerleri malzemenin boyun verme olarak tanımlanan kararsız şekil değişme olayının gecikmesine neden olmaktadır. Diğer bir değişle m'nin büyük değerleri malzemenin iyi şekillendirilebilir olduğunun önemli bir göstergesi sayılmaktadır.

Şekillendirme işlemlerinde , şekil değiştirme miktarı ve şekil değiştirme hızındaki artışlar çoğunlukla sürtünmeli ve geometrik sınırlamalardan dolayı meydana gelmektedir. Hem pekleşme üsteli, hemde deformasyon hızına duyarlılık üsteli, üniform olmayan yerel boyun vermenin azalmasında ve hasara kadar olan şekil değişim miktarının artmasında önemli rol oynamaktadır.

✓ **Plastik Anizotropi**

Sac levha üzerinden alındığı yönden bağımsız olarak aynı özellikleri her yönde aynı olarak gösteren malzemelere izotropik malzeme denilmektedir.



Şekil 3. 7 Hadde yönüne bağlı olarak izotropiklik (AHSS Application Guidelines, 2005)

Bir malzemenin anizotropik plastisite değeri plastik gerinim oranı yada r-değeri olarak adlandırılır. Bu değer klasik çekme testinden elde edilebilir.

$$r = \epsilon_{22} / \epsilon_{33}$$

r değerinin yüksek olması test numunesinin boyun vererek deforme olacağını fakat incelmenin göz ardı edilebileceğini belirtir. İki farklı anizotropi vardır. Bunlar düzlemsel anizotropi ve normal (dik) anizotropidir.

Düzlemsel anizotropide malzeme özellikleri sac düzleminde farklılık gösterir, normal anizotropide malzemenin kalınlığı yönündeki özellikleri düzlemindekiler ile farklılık gösterirler (Şekil 3.8)

İzotropi : $r_0 = r_{45} = r_{90} = 1$

Düzlemsel Anizotropi Δr : r_0, r_{45}, r_{90} birbirinden farklıdır

Normal Anizotropi r_m : $r_0 = r_{45} = r_{90}$ fakat 1 e eşit değildir

$$r_m = (r_0 + r_{90} + 2r_{45})/4$$

$$\Delta r = (r_0 + r_{90} - 2r_{45})/4$$

Anizotropi derecesi metalin kristal yapısı ile ilgilidir. Bu yapı sacın malzemesine ve geçirdiği üretim süreçlerine bağlıdır (kimyasal kompozisyon, sıcak haddeleme sıcaklığı, ısıtım işlemi prosesi, vb.). Soğuk haddeleme r değeri üzerinde ciddi bir etkiye sahiptir. Genel olarak soğuk hadde yüzdesi arttıkça r değeri artar. Normal anizotropi, r_m , derin çekilebilirlik ile ilişkilidir. r_m değeri arttıkça sacın derin çekilebilirlik özelliği ve çekilebilirlik derinliği artar. Düzlemsel anizotropi, Δr , çekme prosesinde oluşabilecek kulaklanma ile ilintilidir.

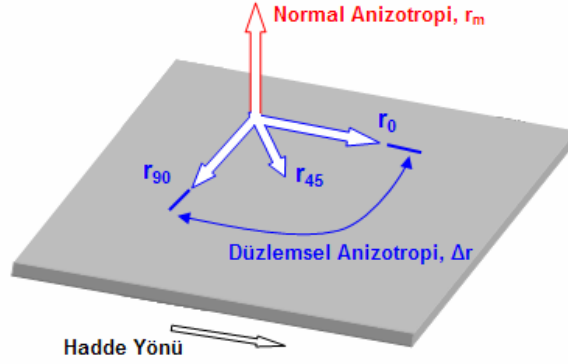
Yüksek Δr değeri kulaklanma riski artışı anlamına gelir.

$\Delta r > 0$ kulaklanma 0° ve 90° yönünde

$\Delta r < 0$ kulaklanma 45° yönünde

$\Delta r = 0$ kulaklanma oluşmaz : izotropik yapı

Genelde yüksek normal anizotropi değerine sahip bir malzemenin düzlemsel anizotropi değeri de yüksektir.



Şekil 3.8 Düzlemsel ve Normal Anizotropi (AHSS Application Guidelines, 2005)

4.SAC MALZEMELERİN SINIFLANDIRILMASI VE ÖZELLİKLERİ

Bu bölüm sac veya sac malzeme olarak geçen tüm tanımlar çelik malzeme olarak algılanmalıdır. Örnek olarak, İngilizcede “Dual Phase Steels” olarak geçen tanımın tam olarak Türkçe karşılığı “Çift Fazlı Çelikler” olsada bu dökümanda “Çift Fazlı Saclar” olarak geçmektedir.

Sac malzemelerin sınıflandırılmasında tüm dünyada kabul gören ve kullanılan bir sistem bulunmamaktadır, günümüzde yaygın olarak kullanılan metod, sac malzemelerin metalurjik özelliklerine göre yapılan sınıflandırma metodudur.(AHSS Application Guidelines, 2005)

IF : Interstitial – Free Steels	Arayer Atomsuz Saclar
MILD : Mild Steels	Yumuşak Saclar
BH : Bake Hardenable Steels	Fırında Sertleşebilen Saclar
IS : Isotropic Steels	İzotropik Çelikler
IF-HS : High Strength Interstitial – Free Steels	Yük. Mukavemetli Arayer Atomsuz Saclar
CMn : Carbon Manganese Steels	Karbon Manganezli Saclar
HSLA : High Strength Low Alloy Steels	Yüksek Muk. Düşük Alaşımli Saclar
TRIP : Transformation Induced Plasticity Steels	Dönüşümle Oluşturulan Plastisite Sacları
DP : Dual Phase Steels	Çift Fazlı Saclar
CP : Complex Phase Steels	Kompleks Fazlı Saclar
MART : Martensitic Steels	Martensitik Saclar

İkinci sınıflandırma metodu sacların mukavemet değerlerine göre yapılır.

LSS : Low Strength Steels – Düşük Mukavemetli Saclar (DMS)

Çekme Mukavemet değer aralığı yaklaşık 150 – 300 MPa dır

IF, MILD

HSS : High Strength Steels – Yüksek Mukavemetli Saclar (Konvanyonel) (YMS)

Çekme Mukavemet değer aralığı yaklaşık 250 – 800 MPa dır

BH, IS, IF-HS, CMn, HSLA

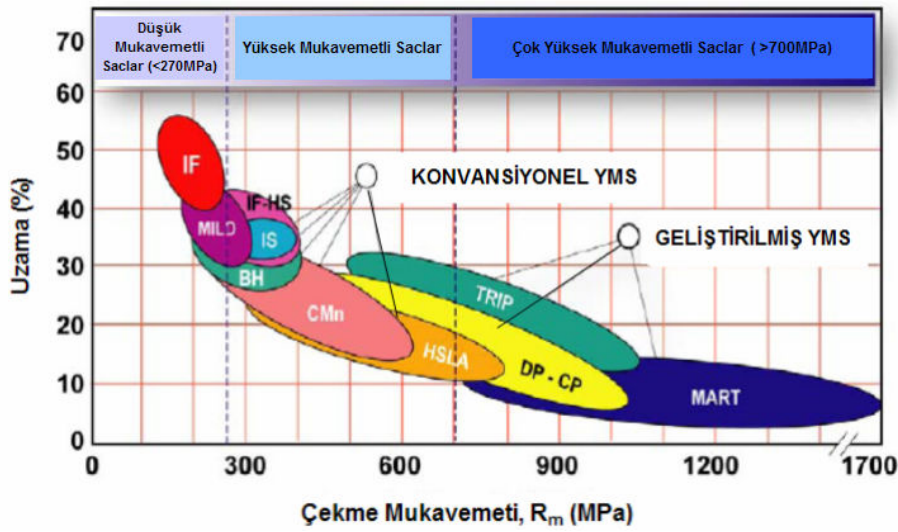
AHSS : Advanced High Strength Steels – Geliştirilmiş Yüksek Mukavemetli Çelikler (GYMÇ)

Çekme Mukavemet değeri 450 – 1700 MPa dür

TRIP, DP, CP, MART

Her sac üreticisinin patentli malzemeleri bulunmaktadır, bu malzemeler de belirtilen sınıflar içerisinde dahil edilebilir. Örnek olarak Avrupanın en önemli sac üreticilerinden Arcelor Firmasının GYMÇ sınıfına giren Usibor ve Ferrit – Beynit kaliteleri olarak adlandırılan ürünleri vardır.

Sac malzemelerin çekme mukavemet değerlerine göre gruplandırılması Şekil 4.1’de gösterilmiştir, sac çekme mukavemet değeri arttıkça önemli bir form verilebilirlik kriteri olan uzama değeri hızla düşmektedir. En yüksek uzama değerleri düşük mukavemetli saclarda elde edilebilmektedir, konvansiyonel yüksek mukavemetli sacların (HSLA) maksimum 800 MPa çekme mukavemet değerlerinde kullanılmaları (daha yüksek mukavemet değerlerinde form verilebilirlikleri çok düşüktür) dikkat çekicidir, aynı çekme mukavemet değerine sahip HSLA, DP ve TRIP sacları incelendiğinde DP ve TRIP sacları için uzama değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 4.1: Sac malzemelerin çekme mukavemet değerlerine göre gruplandırılması (AHSS Application Guidelines, 2005)

Tablo 4.1’de farklı kalitelerde yüksek mukavemetli sacların özellikleri verilmiştir. Mavi renkte gösterilenler konvansiyonel yüksek mukavemetli saclar, yeşil renkli olanlar ise Geliştirilmiş Yüksek Mukavemetli saclardır. (Anonim 2005)

Tablo 4.1: Farklı kalitelerde Y.M. Sacların özellikleri (Anonim 2005)

Sac Malzeme	Akma Mukavemeti	Çekme Mukavemeti	Akma / Çekme Mukavemeti	Uzama	n - Değeri	r - Değeri	K - Değeri
	(MPa)	(MPa)		(%)	(5-15%)		(MPa)
BH 210/340	210	340	0,62	34-39	0.18	1.8	582
BH 260/370	260	370	0,70	29-34	0.13	1.6	550
DP 280/600	280	600	0,47	30-34	0.21	1	1,082
IF 300/420	300	420	0,71	29-36	0.2	1.6	759
DP 300/500	300	500	0,60	30-34	0.16	1	762
HSLA 350/450	350	450	0,78	23-27	0.14	1.1	807
DP 350/600	350	600	0,58	24-30	0.14	1	976
DP 400/700	400	700	0,57	19-25	0.14	1	1,028
TRIP 450/800	450	800	0,56	26-32	0.24	0.9	1,69
DP 500/800	500	800	0,63	14-20	0.14	1	1,303
CP 700/800	700	800	0,88	10-15	0.13	1	1,38
DP 700/1000	700	1000	0,70	12-17	0.09	0.9	1,521
Mart 950/1200	950	1200	0,79	5-7	0.07	0.9	1,678
Mart 1250/1520	1250	1520	0,82	4-6	0.065	0.9	2,021

4.1. Düşük Mukavemetli Saclar – DMS

Çekme Mukavemet değer aralığı yaklaşık 200 – 300 MPa dır

Sac Kaliteleri : IF, MILD

Malzeme kısa tanımlarında belirtilen değerler minimum **akma** mukavemet değerleridir. Örnek olarak IF 300 arayer atomsuz sacının minimum akma mukavemeti 300 MPa'dır.

4.2. Yumuşak Saclar (Mild Steels)

Yumuşak saclar ferritik yapıdadırlar. Yüksek normal anizotropi değerine (r_m) sahip olduklarından dolayı derin çekmeye uygundur. Akma mukavemetleri 100 MPa seviyelerinde olan yumuşak sac kaliteleri mevcuttur, bunlar özellikle çekilmesi çok zor olan parçalarda kullanılırlar. Çekme mukavemetleri ise 400 MPa seviyelerine ulaşmaktadır.

Örnek Sac Malzeme Kaliteleri : XES, DC04, St12

4.3. Arayer Atomsuz Saclar (IF Steels)

Çok az arayer atomu içeren saclar, düşük akma mukavemetleri, yüksek uzama ve iyi derin çekilebilirlik özellikleri nedeniyle çok iyi şekil verilebilirlik özellikleri gösterirler. Bu tür saclar vakum gaz giderme ekipmanları yardımıyla üretilirler. Karbonitür oluşturu elementler ilavesi ile derin çekilebilirlik ve yaşlanmama özellikleri daha da geliştirilebilir. Bu amaçla katılan niobyumun (Nb) etkisi, düzlemsel anizotropiyi geliştirme ve kulaklanma olayını azaltma yönündedir. Bunun nedeni soğuk haddeleme işleminden daha önce sıcak haddelenmiş yapının küçük tane boyutlu olmasıdır. Niobyumun etkisini artırmak amacıyla malzemeye titanyum (Ti) ilavesi de yapılabilir.

Arayer atomsuz sacların akma mukavemetlerini artırmak için fosfor (P) kullanılabilir, fosfor genel olarak bilenen en etkili katı – eriyik sertleşmesine (solid – solution hardening) yol açan elementtir. Bu

malzemeler fosforlu IF sacları olarak adlandırılırlar. IF sacları fosfor elementinin de eklemesi ile 260 MPa'lık bir akma mukavemetine ulaşabilir.

Örnek Sac Malzeme Kaliteleri : IF 180, IF 220, IF 300

4.4. Yüksek Mukavemetli Saclar (Konvanyonel)

Çekme Mukavemet değer aralığı yaklaşık 270 – 700 MPa dır

Sac Kaliteleri : BH, IS, IF-HS, CMn, HSLA

Malzeme kısa tanımlarında belirtilen değerler minimum **akma** mukavemet değerleridir. Örnek olarak Arcelor 300BH fırında sertleşebilen sacın minimum akma mukavemeti 300 MPa'dır, HSLA 400 yüksek mukavemetli düşük alaşımli sacın minimum akma mukavemeti 400 MPa'dır.

Alternatif olarak kısa malzeme tanımında minimum akma ve çekme mukavemet değerleri beraber de verilebilir, örnek olarak, HSLA 350/450 sacı için minimum akma mukavemet değeri 350 MPa, minimum çekme mukavemet değeri ise 450 MPa'dır.

4.5. Fırında Sertleşebilen Saclar (BH Steels)

Fırında sertleşebilen saclar, otomotiv imalatçılarının preslerinde kolayca şekil verilebilen ve düşük mukavemetli çeliklerdir. Vakumla gazı giderilmiş sac malzemeler özel yaşlanma (bir çeşit akma mukavemetinde artış) karakteristikleri olan ürünler verir. Bu otomotiv sac ürünleri fırında sertleşebilir sac olarak bilinirler. Sac malzemeler preslerde form verilerek otomotiv gövdesi parçaları haline getirilmeden önce normal depolama sırasında yaşlanmaya dirençli olarak dizayn edilirler. Bununla beraber şekil vermede yaşlanmaya başlarlar ve boya pişirme fırınlarında ısıtıldıktan sonra malzeme tamamen yaşlanır. Orjinal sac özelliklerine göre yaklaşık 34 – 70 MPa'lık bir akma mukavemeti artışı nihai parçada elde edilir. Bu tür sac malzemeler form verilebilirlikten ödün verilmeden ezilmeye dirençli (dent resistance) parçaların üretilmesini sağlarlar.

Örnek Sac Malzeme Kaliteleri : Arcelor 160BH, Arcelor 300BH

4.6. İzotropik Saclar (IS)

İzotropik saclar ferritik mikroyapıdadırlar. Düzlemsel anizotropi değeri 0 olduğu için çekme operasyonu sırasında kulaklanma riski çok küçüktür. Gererek ve çekilerek form verilebilirlik değerleri yüksektir.

Düzlemsel anizotropi, Δr , çekme prosesinde oluşabilecek kulaklanma (earing) ile ilintilidir. Yüksek Δr değeri kulaklanma riski artışı anlamına gelir.

$\Delta r > 0$ kulaklanma 0° ve 90° yönünde

$\Delta r < 0$ kulaklanma 45° yönünde

$\Delta r = 0$ kulaklanma oluşmaz : izotropik yapı

Örnek Sac Malzeme Kaliteleri : Isotropic E220i, Isotropic E260i

4.7. Yüksek Mukavemetli Arayer Atomsuz Saclar (IF-HS Steels)

IF saclarının akma mukavemetleri genellikle düşüktür, akma mukavemetleri 150 MPa, çekme mukavemetleri ise 300 MPa civarındadır. IF saclarına fosfor, silikon ve mangan eklenerek mukavemetleri artırılmıştır. Çekme ve akma mukavemet değerleri IF saclarından yüksek olduğu için şekil verilebilirlikleri IF'ye göre daha düşüktür fakat diğer yüksek mukavemetli saclara göre oldukça yüksektir.

4.8. Yüksek Mukavemetli Düşük Alaşımli Saclar (HSLA Steels)

280 – 550 MPa arası yüksek akma mukavemet değerlerine Yüksek Mukavemetli Düşük Alaşımli (YMDA) saclar ile ulaşabilmek mümkündür. Bu sac grubu küçük taneli ferrit yapıya sahiptir, sacın sertleşme mekanizması genel olarak, kimyasal yapılarında içerdikleri mikroalaşım elementlerinin (Ti, V, Nb,...), karbon (C) ve/veya azot (N) ile oluşturduğu çökeltilerdir. Yüksek mukavemet değerlerine ulaşılabilmesini sağlayan alaşım elementleri olduğu için , bu saclara “mikro alaşımli saclar” da denir. Kimyasal yapı içerisine mangan (Mn), fosfor (P) veya silikon (Si) eklemek mukavemet değerini daha da artırır fakat yüksek mukavemet değerlerinin düşük formverilebilirlik anlamına da geldiği unutulmamalıdır.

Örnek Sac Malzeme Kaliteleri : HSLA 240, HSLA 400, HSLA 500, HSLA 700

4.9. Geliştirilmiş Yüksek Mukavemetli Saclar (GYMÇ ~ GYMS)

Çekme Mukavemet değer aralığı yaklaşık 450 – 1700 MPa dır

Sac Kaliteleri : DP, TRIP, CP, Mart

Malzeme kısa tanımlarında belirtilen değerler minimum **çekme** mukavemet değerleridir. Örnek olarak DP 600 çift fazlı sacın sacın minimum çekme mukavemeti 600 MPa'dır, TRIP 800 dönüşümle oluşturulan plastisite sacının minimum çekme mukavemeti 800 MPa'dır.

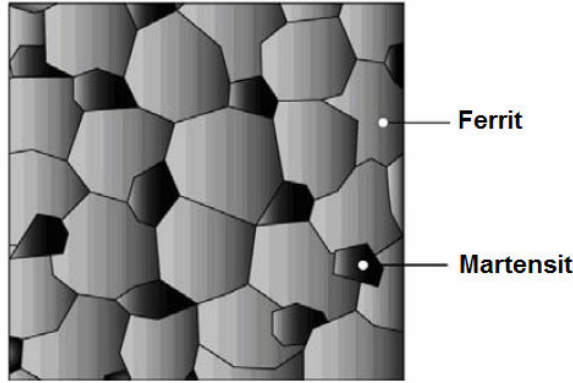
Alternatif olarak kısa malzeme tanımında minimum akma ve çekme mukavemet değerleri beraber de verilebilir, örnek olarak, DP 350/600 sacı için minimum akma mukavemet değeri 350 MPa, minimum çekme mukavemet değeri ise 600 MPa'dır.

4.9.1. Çift Fazlı Saclar (DP Steels)

Günümüzde çift fazlı sacların kullanım oranları diğer geliştirilmiş yüksek mukavemetli saclara oranla çok daha fazladır ve yeni uygulamalar ile de giderek artmaktadır, bu sebep ile bu sac türü daha detaylı anlatılacaktır.

Çift fazlı saclar ferritik (yumuşak) bir yapı içerisinde, ikincil bir yapı olan sert mardensit adacıkları içerirler. İkincil bir faz olan martensit tüm yapının yaklaşık 20 %'sini oluştururlar. Bu oran, çift fazlı sacların mukavemet değerlerini belirleyen en önemli etkidir. Martensit oranı arttıkça sacın mukavemeti artarken form verilebilirlik özelliği düşer. (Anonim 2005)

Ferrit - Martensit mikroyapılı Çift Fazlı Çelik DP - Dual Phase Steel

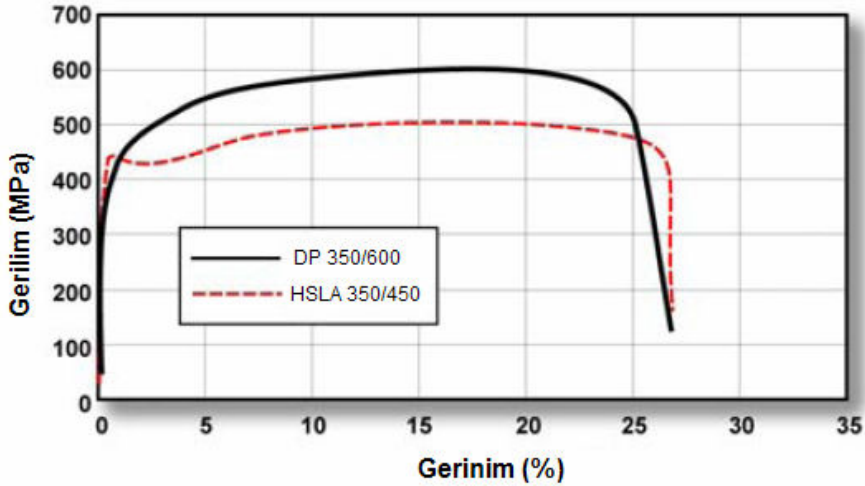


Şekil 4.2: Çift Fazlı Sacın Mikro Yapısı (AHSS Application Guidelines, 2005)

Yapı içerisinde ferrit ve martensit ile birlikte düşük oranlarda kalıntı östenit ve malzemenin kenarlarına yakın bölgelerinde malzemenin yırtılmadan uzayabilme (gerilebilme) direncini artıran beynit fazları da bulunabilir, özellikle delik kenarlamalarda ve kesilen kenarların iç bükey bükmelerinde kenar uzama yeteneği çok önemlidir.

Çift fazlı sacın yapısı Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Yumuşak ferritik yapı yüksek mukavemet değerlerine rağmen mükemmel sayılabilecek bir form verilebilirliği sağlarken, martensitik yapı ise hem malzemenin yüksek mukavemet özelliğinin hem de yüksek deformasyon sertleşebilirliğinin ana kaynağıdır.

Yüksek deformasyon sertleşmesi ve yüksek deforme edilebilirlik (uzama yeteneği) özelliklerinin birleşimi konvansiyonel yüksek mukavemetli saclara oranla daha yüksek akma değerlerine ulaşılabilmesini olası kılar.



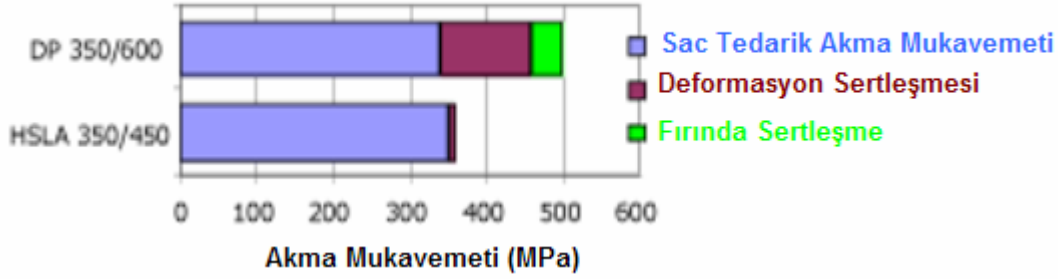
Şekil 4.3: Farklı Malzemelerin Gerilim - Gerinim grafikleri (AHSS Application Guidelines, 2005)

Şekil 4.3’te aynı akma mukavemet değerlerine sahip çift fazlı bir sac ile (DP), konvansiyonel bir sert kalite olan yüksek mukavemet düşük alaşımli bir sacın (HSLA) gerilim – gerinim grafikleri verilmiştir. Her iki sacında akma mukavemet değeri aynı olmasına rağmen çift fazlı sacın çekme mukavemet değeri daha fazladır.

Bir sac malzeme için akma/çekme mukavemet oranı ne kadar düşüğe form verilebilirlik de o kadar yüksektir, bu oranın çift fazlı sac için daha küçük olduğu görülmektedir.

DP ve HSLA saclarının, kalıpta form verme sırasında gösterdikleri deformasyon sertleşmesi karakteristikleri farklıdır. HSLA sacı için, kalıpta form verme başladığı andan itibaren sacın formverilebilirlik özelliği düşmeye başlar. DP sacının içerdiği yumuşak ferrit yapısı sayesinde, saca form verme esnasında uzun süre formverilebilirlik karakterinde bir değişme olmaz ve yüzeyde daha iyi bir gerinim dağılımı gözlenir.

Çift fazlı ve diğer geliştirilmiş yüksek mukavemetli sacların konvansiyonel sert saclara karşı bir üstünlükleri de fırında sertleşebilme özelliklerinin olmalarıdır. Bu özellik zaten yüksek olan deformasyon sonrası akma mukavemet değerini daha da artırır, akma mukavemet değerinin yüksek olması özellikle araç güvenlik parçaları için çok önemlidir, bakınız Şekil 4.4 (Shaw 2001)



Şekil 4.4:GYMÇ ve YMÇ'lerin fırında sertleşebilirlikleri (AHSS Application Guidelines, 2005)

Çift fazlı sacların günümüzde kullanılan tipik kimyasal bileşimleri Tablo 4.2'de verilmiştir. Genel olarak bu saclar 0.1 %'den daha az karbon içerirler ve bu sayede punta kaynak edilebilme kabiliyetlerine sahip olurlar. Sacın üretimi sırasında, tavlamaı takip eden hızlı soğutma sonucunda mikroyapıdaki martensitin 20 %'si oluşur. 1 ile 1.4 % arasındaki manganez, hızlı soğutmada martensitin oluşmasını sağlar. Konvansiyonel sert saclarinkine benzer bir uygulama ile, silisyum, katı eriyik sertleşmesi amacı ile ilave edilirken, vanadyum, niobyum, titanyum gibi alaşım elementleri çökelme sertleşmesi ve/veya tane boyutu kontrolü için ilave edilebilir.

Tablo 4.2: Çift Fazlı Sacların Kimyasal Bileşimi (AHSS Application Guidelines, 2005)

Üretim Yöntemi	Bileşim, %						
	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	N
Sürekli tavlama, soğuk haddelenmiş	0.11	1.43	0.61	0.12	0.08	0.06	0.01
Sürekli tavlama, sıcak haddelenmiş	0.11	1.20	0.40	-	-	-	-
Kuru tavlama	0.12	2.10	1.40	-	-	-	-
Haddelenmiş halde	0.06	0.90	1.35	0.50	0.35	-	-

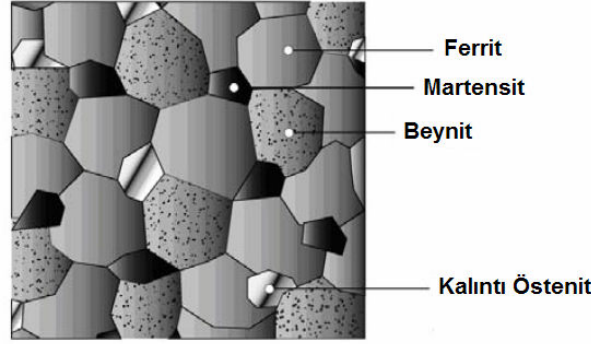
Kimyasal bileşimi değiştirerek ve kritik sıcaklıktan soğutma hızını kontrol ederek çift fazlı saclarda çok sayıda farklı mukavemet değerlerinde malzeme elde edilebilir. (Anonim 2005)

Aynı akma mukavemet değeri için, Çift Fazlı DP sacının çekme mukavemet değeri Yüksek Mukavemetli Düşük Alaşım HSLA sacının mukavemet değerinden daha büyüktür, bunun anlamı Çift Fazlı DP sacının enerji emme kapasitesinin diğer bir ifade ile DP kalitesi kullanılan aracın çarpışma performansının daha yüksek olacağıdır. Aynı araç çarpışma performansı için HSLA yerine DP kullanımı sac kalınlığında yaklaşık 10% azalma anlamına gelir. (Fekete 2001)

Otomotivde kullanım alanlarına örnek olarak tampon takviyeleri, kriko destekleri, alternatör fanları, iç ve dış kapı panelleri verilebilir.

4.9.2. Dönüşümle Oluşturulan Plastisite Saclar (TRIP Steels)

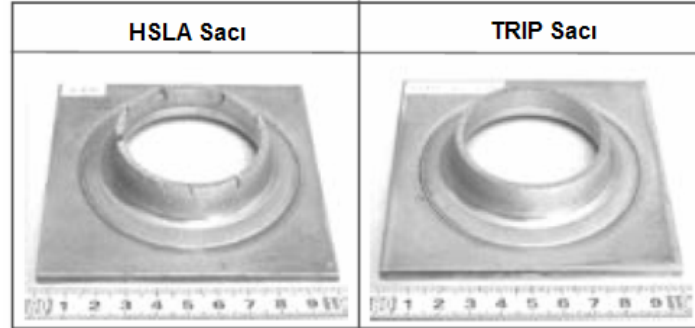
Dönüşümle oluşturulan plastisite sacları, ferrit bir yapının içerisinde minimum 5 % kalıntı östenit ile sert yapılara sahip martensit ve beynitin oluşturduğu saclardır. TRIP sacının şematik gösterimi Şekil 4.5’de verilmiştir.



Şekil 4.5: TRIP Sacların Mikro Yapısı (AHSS Application Guidelines, 2005)

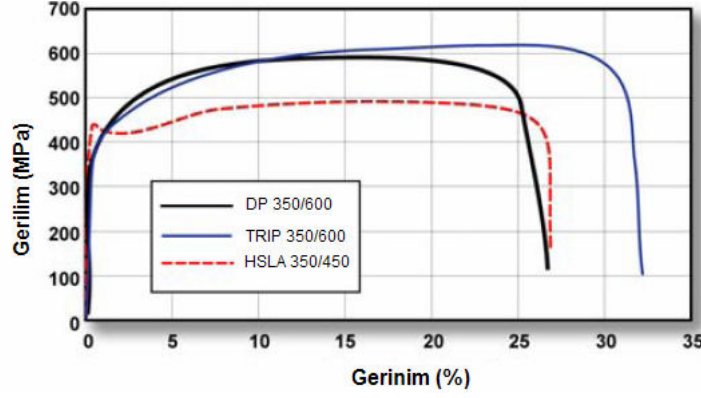
Plastik deformasyon esnasında (parçaya form verilmesi), çift fazlı saclarda olduğu gibi, yumuşak yapı içerisindeki ikincil sert fazlar yüksek miktarlarda deformasyon sertleşmesine neden olurlar. Fakat çift fazlı saclarda görülmeyen özellik, malzemedeki deformasyon ile beraber kalıntı östenit yapının martensite dönüşümü ile elde edilen deformasyon sertleşmesidir. (Anonim 2005)

DP sacı için belirtilen, beynit yapının kesilen kenarlardaki uzama kapasitesini artırıcı etkisi TRIP sacları için çok daha fazladır. Yapıdaki beynit oranı artırılarak kesme kenar uzama kapasitesi artırılır, şekil 4.6. Yüksek ferrit – beynit içeren TRIP sacları kullanılarak form verilen parçalar, döküm ve dövme ile üretilen parçalara alternatif olmuşlardır. (Schaeffler 2005)



Şekil 4.6: TRIP ve HSLA saclarında delik uzamasının karşılaştırılması (AHSS Application Guidelines, 2005)

Aynı akma mukavemet değerlerine sahip 3 farklı sacın gerilim – gerinim grafikleri Şekil 4.7’de gösterilmiştir. Görüleceği üzere en küçük deformasyon sertleşmesi HSLA’da gözlenmiştir. TRIP sacının başlangıç deformasyon sertleşme değeri DP’den küçüktür, fakat deformasyonun ilerki safharında özellikle kalıntı östenin martensite dönüşümü ile TRIP daha yüksek deformasyon sertleşebilirliği gösterirken DP’de düşüş gözlenmektedir



Şekil 4.7: Farklı Malzeme Türlerinin Gerilim - Gerinim grafikleri

Kısaca özetlemek gerekirse, TRIP saclarının deformasyon sertleşebilirliğinin, benzer akma mukavet değerlerine sahip, konvansiyonel yüksek mukavemetli saclara oranla oldukça yüksek olması malzemenin gerek şekil verilebilme ve form verilebilirlik özelliklerinin yüksek olmasını sağlar.

TRIP sacları, martensit oluşum sıcaklığını oda sıcaklığının altına çekerek östenit fazı oluşturabilmek için bileşimlerinde DP saclarına oranla daha fazla karbon içerirler. Silikon ve alüminyum kullanımı ise beyrit bölgelerinde çökelti karbürlerin oluşumunu önler.

Kalıntı östenit yapının martensite dönüşümünün deformasyonun (uzamanın) hangi safhasında başlayacağı bileşimdeki karbon oranı ile belirlenir. Düşük karbon oranlarında bu dönüşüm deformasyonun ilk safhalarında başlar ve deformasyon sürdükçe malzemede deformasyon sertleşmesine neden olur. Yüksek karbon oranlarında, kalıntı östenit çok daha stabil yapıdadır, deformasyonun daha ilerki aşamalarında martensite dönüşmeye başlar, form verilmiş parçada dahi martensite dönüşmemiş kalıntı östenit oranları yüksek olabilir. Bunun amacı kaza anında deforme olan parçanın deformasyon sertleşebilirliğini yükselterek çok yüksek miktarlarda enerji absorbe edebilmesidir. Yüksek karbon seviyesinin en önemli dezavantajı ise kaynak edilebilme yeteneğinin ciddi miktarda düşmesidir fakat kaynak parametreleri üzerinde çalışılarak bu sorun giderilebilir.

4.9.3. Kompleks Fazlı Saclar (CP Steels)

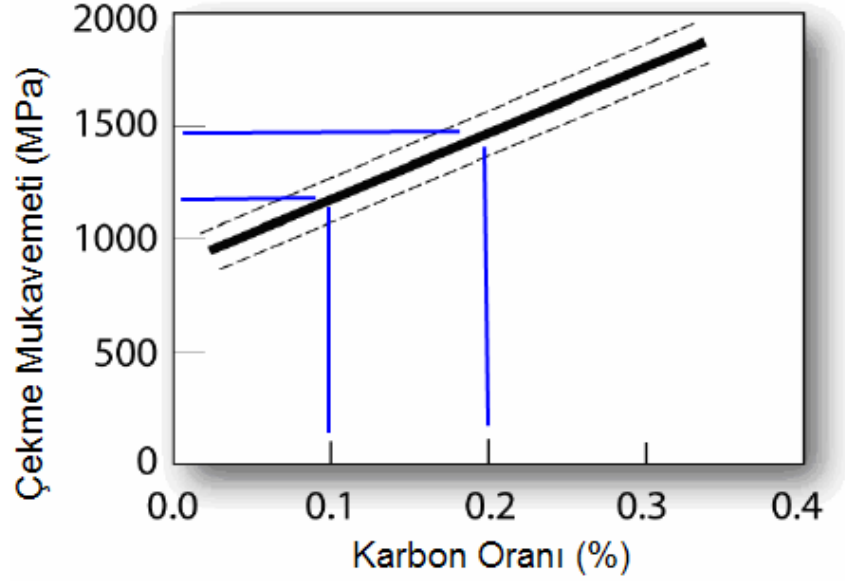
CP sacları genel olarak TRIP ve DP sacları ile çok daha yüksek mukavemet değerlerine sahip MART sacları arasında bir geçiş pozisyonundadır. CP saclarının yapıları DP ve TRIP saclarına benzerdir, ikincil sert faz oranı daha yüksek ve az oranlarda niobyum, titanyum ve/veya vanadyum içerirler, bu elementler mukavemet artışını sağlayan düzenli çökelti oluşumunu sağlarlar. Aynı çekme mukavemetine sahip DP ve TRIP saclarına göre akma mukavemetleri biraz daha yüksektir, bunun sonucu olarak deforme edilebilirlikleri daha az fakat deformasyon sertleşebilirlikleri daha fazladır. Ana kullanım alanları, enerji emme kapasitelerinin çok yüksek olması ve form verilebilirlik değerlerinin sınırlı olması nedeniyle, basit formlu, güvenlik parçalarıdır.

4.9.4. Martensitik Saclar (MART Steels)

MART saclar, sıcak haddeleme veya tavlama sırasında mevcut olan östenit yapının hızlı soğutulması ile çok büyük oranda martensite dönüşmesi ile oluşurlar. Bu yapı genelde çok sert olduğu için ek bir meneviş operasyonundan geçirilerek formverilebilirliği artırılır.

MART saclarının çekme mukavemet değerleri 2000 MPa'a kadar çıkabilmektedir. Mukavemet seviyeleri bu denli yüksek olmasına rağmen yine de orta seviyede de olsa formverilebilir malzemelerdir, örnek olarak 1500 MPa çekme mukavemet değerine sahip bir MART sacı yaklaşık 4 – 6 % uzama değer seviyelerine ulaşılır.

Bileşime eklenen karbon malzemenin sertleşebilirliğini ve oluşan martensit yapının sertleşmesini sağlar. Şekil 4.8'de menevişlenmemiş martensit yapı malzemenin karbon miktarının çekme mukavemeti ile ilişkisi verilmiştir. Farklı oranlarda ve varyasyonlarda bileşime eklenen mangan, silikon, krom, molibden, boron, vanadyum ve nikel özellikle malzemenin sertleşebilirliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.



Şekil 4.8: Martensit yapı malzemenin karbon miktarının çekme mukavemeti ile ilişkisi
(AHSS Application Guidelines, 2005)

Ana kullanım alanları kompleks fazlı (CP) saclar ile benzerdir, enerji emme kapasitelerinin çok yüksek olması ve form verilebilirlik değerlerinin sınırlı olması nedeniyle, basit formu, güvenlik parçaları uygulama alanlarındandır.

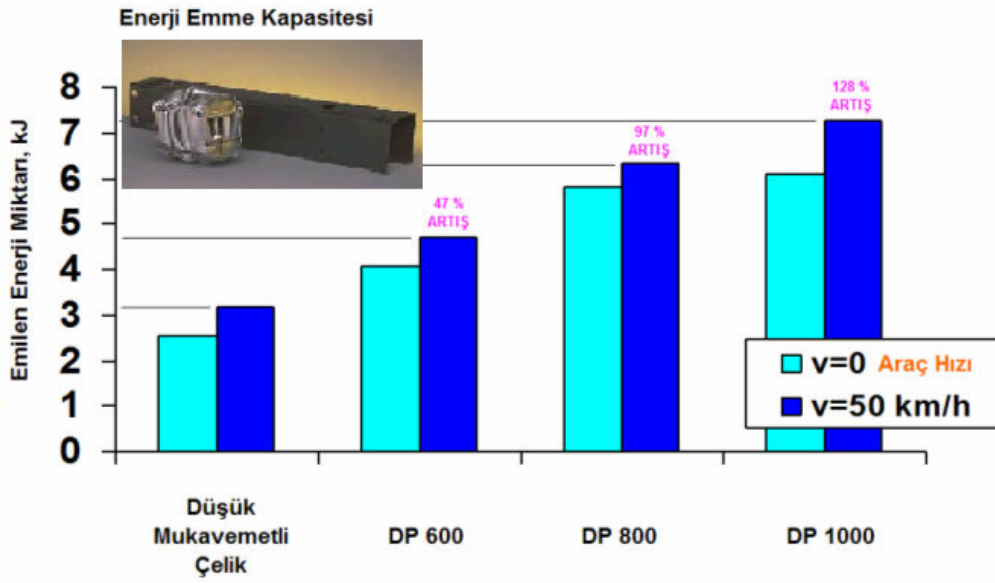
5. GELİŞTİRİLMİŞ YÜKSEK MUKAVEMETLİ SACLARIN AVANTAJLARI

5.1. Araç Güvenliği

Araç güvenlik parçalarının daha fazla enerji emme kapasitesine sahip olmaları, kaza anında yolcu güvenliğinin artması anlamına gelir. Bir malzemenin enerji emme kapasitesini belirleyen en önemli kriterler, o malzemenin form verilmiş durumdaki çekme mukavemeti ve deformasyon ile sertleşebilme yeteneğidir.

Geliştirilmiş yüksek mukavemetli sacların gerek deformasyon sertleşebilirlikleri gerekse form verilmiş durumda sahip oldukları çekme mukavemet değerleri çok yüksektir.

Şekil 5.1'de düşük mukavemetli çelik sac malzeme ile geliştirilmiş yüksek mukavemetli sac malzemelerin enerji emme kapasiteleri verilmiştir. Açıkça görüleceği üzere sac malzeme mukavemeti arttıkça absorbe edilebilen enerji miktarı da artmaktadır.



**Şekil 5.1: Farklı Malzemelerin Enerji Emme Miktarlarının Karşılaştırılması
(AHSS Application Guidelines, 2005)**

5.2. Çevresel Nedenler

Kyoto protokolüne uyum çerçevesinde 2008-2012 yılları arasında gelişmiş ülkelerin egzost gaz emisyonu değerlerinde %5.2, Avrupa Birliği için ise %8' lik azalma olması gerekmektedir. Her araç üreticisi ülke bu oranları sağlamak zorundadır. Egzost gaz emisyonlarının azaltılması ve yakıt sarfiyatının düşürülmesinin bir yolu araç ağırlıklarının azaltılmasıdır. Araç ağırlığının azalması ile beraber aracın belirli tasarım isteklerini ve güvenlik şartlarını sağlaması gerekir. Çelik hammadde imalatçıları araç üreticilerinden gelen istekler sonucu daha dayanıklı çelikler üretmektedirler. Bu nedenle yüksek mukavemetli çeliklerin yeni araç modellerinde kullanım oranının gittikçe arttığı görülmektedir. (Federici 2005)

Yukarda belirtilen hedef için üzerinde çalışılan çözümlerin başında, araç motorlarının sürekli geliştirilerek yakıtın daha verimli kullanılabilmesi ve araç üretiminde yeni, teknolojik malzemeler kullanılarak araç ağırlıklarının azaltılması, bunun sonucunda da daha az yakıt kullanımı sağlanmasıdır.

Araç gövde parçalarının yüksek mukavemetli malzemelerden üretilmesi, kullanılan sac malzemenin kalınlık değerini, bunun sonucunda ise araç ağırlıklarının azaltılmasını sağlayacaktır. Kullanılan sac malzeme çekme mukavemetinin parça ağırlığına etkisi tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1: Farklı çekme mukavemet değerlerine sahip sacların parça ağırlığına etkisi

Sac Malzeme Çekme Mukavemeti (MPa)	Parça Ağırlığında Azalma (%)
250	-
400	15 - 25
700	35 - 45
900	45 - 50
1100	50 - 55

5.3. Araç Maliyeti

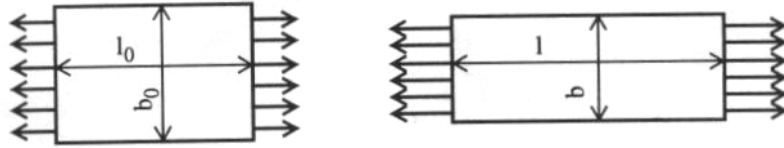
Her ne kadar geliştirilmiş yüksek mukavemetli sac malzeme maliyetleri düşük mukavemetli saclara göre yüksek olsada, form verilmiş parçanın olması gereken kalınlığının düşmesi sonucu kullanılan sac malzeme miktarının azalması, farklı parçaların tek bir parça olarak üretilebilmesi potansiyeli ve yeni teknolojilerin kullanımı ile araç toplam maliyetlerinde azalmalar elde edilmiştir.

6.SİMÜLASYON PROGRAMINDA MALZEME DAVRANIŞ TANIMLARI

Bu bölümde Young Modülü(E), Poisson Oranı(ν), Akış Eğrisi (r) değeri, çift eksenli basınç faktörü(α), maksimum basınç eğrisi ve uzama limitleri diyagramı (Forming Limit Diagram = FLD) incelenecektir. (Autoform User Manual, 2005)

6.1. Elastik Malzeme Davranışı (Elastic Material Behavior)

Elastik bölge içerisinde malzeme davranışı Young Modülü(E) ve Poisson oranı ile karakterize edilebilir. Young modülü (E) tek eksendeki basınç ve gerilme arasındaki ilişkiyi vermektedir. Poisson oranı (ν) uygulanan yöndeki gerilme ile enine gerilme arasındaki ilişkiyi vermektedir. Şekil 6-1 bunu göstermektedir.



Şekil 6-1 Poisson oranının(ν) şematik gösterimi (Autoform User Manual, 2005)

Poisson oranı şu şekilde tanımlanır.

$$\nu = \frac{b - b_0}{l - l_0}$$

E ve ν için tipik değerler;

Material	Young's modulus E [N/mm ²]	Poisson's ratio ν [-]
Steel	205'000	0.3
Aluminum	73'000	0.33

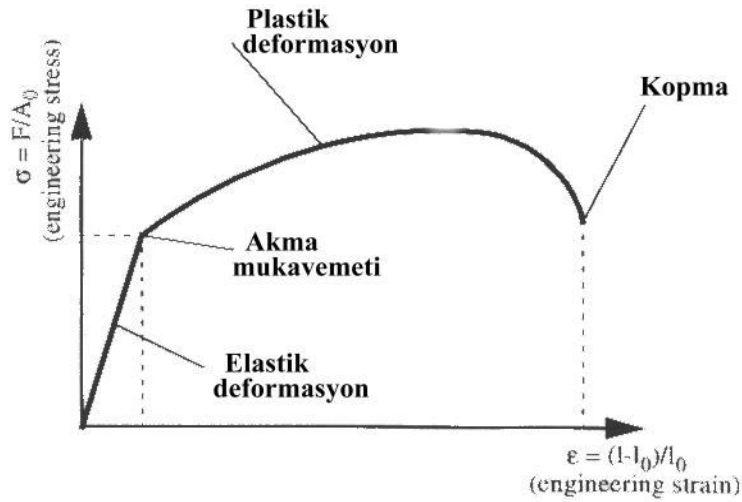
Tablo 6.1 Çelik ve Alüminyum Malzeme için E ve ν değerleri (Autoform User Manual, 2005)

6.2. Akış Eğrisi (The Flow Curve)

Form prosesi aşamasında sac malzemenin plastik şekil değiştirme kabiliyeti, sacın elastik karakteristiğinden daha önemlidir.

Akış eğrisi malzemenin tek eksenli gerilme testindeki gerilme basınç davranışını vermektedir. Şekil 6.2 yumuşak malzemeler için tipik akış eğrisini göstermektedir. Buradaki akış eğrisi sacın çapraz kesit alanına bağlı olarak toplam gerilimi boştaki genişliğindeki deformasyona bağlı olarak göstermektedir.

Akış eğrisi deformasyon oranına bağlıdır. Yavaş deformasyon proseslerinde hızlı deformasyon proseslerine oranla daha küçük gerginlikler gözlenir. Oranın etkisi over-stress eğrisi tarafından sağlanır. (Anonim 2002)

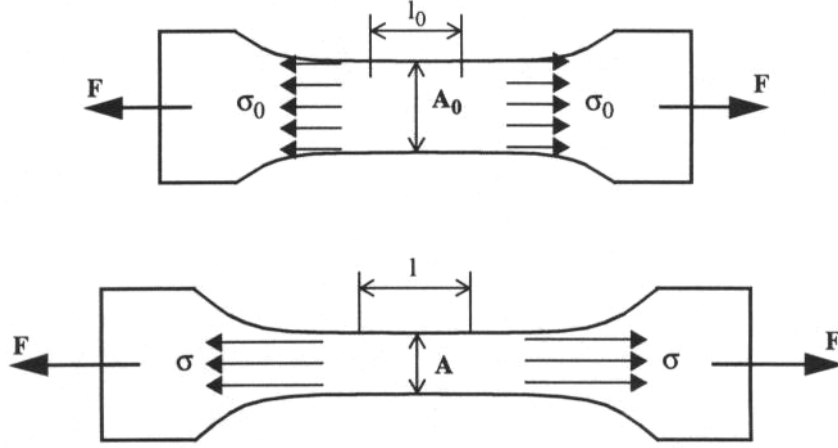


Şekil 6.2 Yumuşak çelikler için tipik akış eğrisi kopma noktası, elastik ve plastik deformasyon bölgesi görülmektedir. (Autoform User Manual, 2005)

6.2.1. Akış Eğrisinin Çekme Deneyinden Belirlenmesi

(Determination of the flow curve through a tensile test)

Malzemenin akış eğrisi şekil 6.2 görüldüğü gibi çekme deneyinden tanımlanabilmektedir. Şu şekilde hesaplanabilir.



Şekil 6.3 Çekme deneyi numunesi ve şematik gösterimi
(Autoform User Manual, 2005)

F kuvvet , L çene ara mesafesindeki değişim, A kesit alanı olarak deney safhasında hesaplanır. Deneye parça kopana kadar devam edilir.

Logaritmik gerinme (Birim şekil değiştirme) ϵ_{pl} deneyin herhangi bir aşamasında çene ara mesafesi ve toplam gerinme ϵ_{el} ile şu şekilde hesaplanır.

$$\epsilon_{pl} = \ln (l/l_0) - \epsilon_{el}$$

Elastik gerinim ϵ_{el} plastik deformasyonun başlangıcında ölçülen toplam gerinimdir. Birçok deforme edilebilir malzeme için 0,002'dir. Gerçek elastik gerinim plastik deformasyon sırasında artışlar gösterebilir bu değerdeki artış ihmal edilebilir ve

$$\epsilon_{el} = \epsilon_{el}(0) \quad \text{eşitliği yazılabilir.}$$

Gerçek mukavemet (Gerilme) σ ,uygulanan yöndeki kuvvet F ve elastik deformasyon ihmal edilerek;

$$\sigma = F/A = F/ A_0 \cdot e^{-\epsilon_{pl}} \quad \text{olarak hesaplanır}$$

σ : Gerçek mukavemet

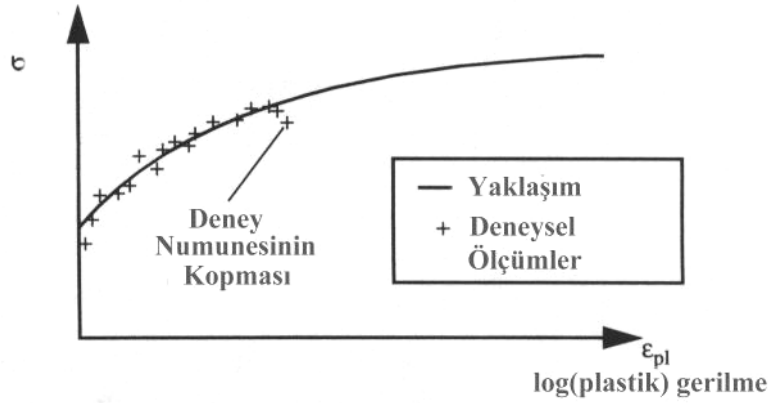
A: Belirlenen zamandaki kesit alan

A_0 :Başlangıçtaki kesit alan

Kullanılan simülasyon programında sacın ilerleme yönünün (rolling direction) belirlenebilmesi için akış eğrisine ihtiyaç duyulur. Yön , akış eğrisinden ve r değeriyle tanımlanan deformasyon davranışından bağımsızdır.

6.2.2. Akış Eğrisine Yaklaşım Metodları

Malzeme davranışına bağlı olarak numune, plastik gerinme ϵ_{pl} de 0.15 veya 0.35 oranlarında kopar. Çift eksenli gerilmelerde , kopma mukavemetindeki artışa denk gelebilen değere sacın deformasyonu esnasında rastlanabilir. Bu yüzden akış eğrisinin ekstrapolasyonuna deneysel olarak tanımlanan en yüksek mukavemet değerine(şekil 6-4'ün gösterdiği gibi ϵ_{pl} nin 1.0 olduğu) ihtiyacı vardır.



Şekil 6.4 Akış eğrisine yaklaşım (Autoform User Manual, 2005)

Akış eğrisine yaklaşımın standart metodlarından birkaçı şu şekilde tanımlanır. Buradaki σ gerçek gerilmeyi , ϵ_{pl} logaritmik plastic birim şekil değiştirmeyi , A,B,C, parametreleri ve n ise deneysel datalardan çıkarılan yaklaşım eğrisine uygun katsayıdır.

(Autoform User Manual, 2005)

Ludwik:

$$\sigma = A * (\epsilon_{pl})^n$$

Ludwik eşitliği akış eğrisine en basit yaklaşımdır. Bu nedenle yaklaşım çok gerçekçi değildir. Buradaki n değeri malzeme özelliğine bağlı bir değerdir. Ve bu denklemden çıkarılabilir.

Swift(Krupkowski):

$$\sigma = A * (B + \epsilon_{pl})^n$$

Chosh:

Chosh denklemi çeliklerde kullanım için tavsiye edilmektedir.

$$\sigma = A \cdot (B + \epsilon_{pl})^n - C$$

Voce:

$$\sigma = B - (B - A) \cdot e^{-m \epsilon_{pl}}$$

Hocket-Sherby:

$$\sigma = B - (B - A) \cdot e^{-m(\epsilon_{pl})^n}$$

Hocket-Sherby denklemi alüminyumlar için tavsiye edilmektedir.

Yukarıdaki denklemlerde:

A:Başlangıç akış gerilimini gösterir.

B:Maksimum akış gerilimini göstermektedir.

Ludwik,Swift ve Chosh denklemleri maksimum akış gerginliğini göstermez Bu yüzden de çelikler için daha uygundur.

Voce ve Hocket-Sherby yaklaşımları alüminyumlar için daha uygundur. Deneysel yaklaşımlar için parametreler , gerginlik ve basınç değerleri, gerekli logaritmik gerginlik değeri 1'e kadar olan denklemlerden hesaplanabilirler. 0'dan 1'e kadar olan logaritmik gerginlik değerleri oranı gerçek basıncı tanımlamak için denklemleri kullanabilir. Bu değerde, uygun olan deneysel ölçümlerin gerginlik oranını kapsamaktadır. Bu ise deneysel hataların(ölçüm datalarından oluşan) ortadan kaldırmasına yardım eder.

Bir zamanlar gerçek basınç ve gerçek gerginlik değeri, logaritmik plastik değerin 1 olduğu durumda hesaplamayı gerektirmekteydi. Eğer simülasyon döneminde yüksek eşdeğer genliğe rastlanırsa , simülasyon programı lineer şekilde ekstrapole edecektir. Ve de gerçek basınç değeri ϵ_{pl} 'nin 1 olduğu durum değerlendirilecektir. Bu eğrinin eğimi (bu geçen iki gerginlik değeri için) lineer olarak ekstrapole edilir. Bu eğri üzerinden 10 veya 20 nokta işlem için yeterlidir. Seçilen bu noktalar eğrinin başlangıcından ($\epsilon_{pl} = C$) sonuna kadar ($\epsilon_{pl} = 1$) olan arada seçilmelidir. Akış eğrisi malzemenin form alabilirliği hakkında oldukça iyi fikirler verir. Bu eğrinin altında olması malzemenin form alabilirliğini gösterir.

6.3 r değeri (r-values)

r değeri akma yüzeyinin formunu oluşturmak için kullanılır(Akma yüzeyi ve çift eksenli basınç faktörü). Bu değer çekme deneyinden deney numunesinin boyu ölçülerek hesaplanabilir.($\epsilon_1=1$ burada ϵ_{pl} ye eşit alınabilir).Çekme yönünde (uzunluğa dikeylik= ϵ_2) ve kalınlık yönünde(ϵ_3). Logaritmik gerginlik değeri r faktörünün kullanılması ile bulunur.

$$\epsilon_1 = \ln(l/l_0) \quad \epsilon_2 = \ln(w/w_0) \quad \epsilon_3 = \ln(s/s_0)$$

Yukarıdaki denklemlerde;

l:uzunluğu

w :genişliği

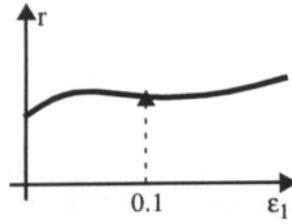
s:denei numunesinin sac kalınlığını göstermektedir.

r değeri şu denklemlerden bulunabilir.

$$r = \epsilon_2 / \epsilon_3 = \epsilon_2 / (\epsilon_1 + \epsilon_2)$$

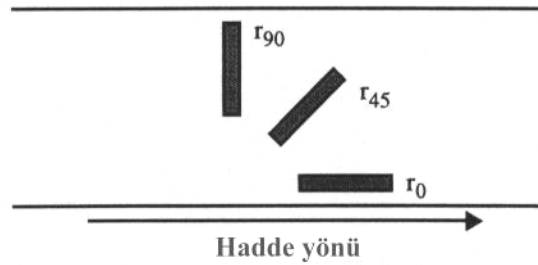
Kullanılan simülasyon programında r değeri sabit alınmaktadır. Bundan dolayı r değeri çekme deneyindeki gerginliğin fonksiyonu olarak değişebilir.

Değişik r değerleri sac numune parçanın farklı yönlerde gerilmesi ile değişebilir. Bu nedenle çekme deneyi 0° , 45° , 90° (hadde yönü) doğrultularında yapılmalıdır ve farklı r değerleri değerlendirilmelidir.

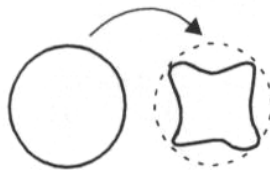


Şekil 6. 5 Gerilime bağlı olarak örnek r- değerleri (Autoform User Manual, 2005)

Değişik malzeme tipleri bu r değerlerine bağlı olarak tanımlanabilir.



Şekil 6.6 Hadde yönü (Autoform User Manual, 2005)



Şekil 6.7 değişik r_0 , r_{45} , r_{90} değerlerine bağlı olarak küresel sac çekilmesi
(Autoform User Manual, 2005)

Izotropik	$r_0 = r_{45} = r_{90} = 1$
Normal anizotropik	$r_0 = r_{45} = r_{90} > 1$
Düzlemsel anizotropik	$r_0 < r_{45} < r_{90}$

Eğer bütün r değerleri birbirinden farklı ise yuvarlak konturlu bir sac, çekme işleminden sonra yuvarlak kalmayacaktır. Bu değerlerin birbirlerinden farkları büyükse çekme işlemi esnasında sacı kontrol etmek zorlaşacaktır ve kırışma eğilimi artacaktır. Bazen r_{90} en yüksek değere sahip oluken r_{45} minimum değerde olabilmektedir.

Ortalama r değeri;

$$r_m = (r_0 + 2r_{45} + r_{90}) / 4$$

Bu r_m değeri sacın form alabilirliği konusunda oldukça ipucu vermektedir. Bu değer ne kadar büyükse sacın o kadar form alabileceğini göstermektedir.

Tipik r değerleri şöyledir.

Tablo 6.2. Çeşitli Malzemeler İçin r Değerleri (Autoform User Manual, 2005)

Material	r_m
Deep draw quality steel	~ 2
High strength steel	~ 1
Aluminum	~ 0.5

Özet olarak form vermek için uygun bir sac şöyle tanımlanabilir.

- ortalama r_m değeri büyük ve
- r_0 , r_{45} ve r_{90} arasında küçük farklar olarak gösterilebilir.

Önemli Not: Eğer kullanılacak malzemenin hadde yönü bilinmiyorsa r_0 , r_{45} , r_{90} değerleri malzeme hakkında hiçbir bilgi vermez. Bu durumda ortalama r_m değeri kullanılmalıdır.

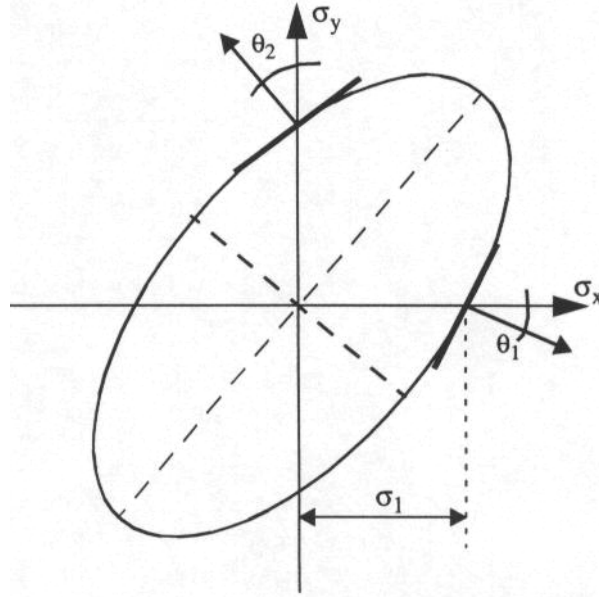
6.4. Akma yüzeyi ve çift eksenli gerilim faktörü

(Yield Surface and Biaxial Stress Factor)

Basınç bileşenleri içinde akma yüzeyi malzeme akışı durumunu tanımlar. Kullanılan simülasyon programı için değişik akma yüzeyleri kullanılabilir. En çok tercih edilen yöntem r_0 , r_{45} , r_{90} değerlerinden yararlanılarak seçilir. Ayrıca çift eksenli basınç faktöründe kullanılmaktadır. En sık kullanılan yöntem Hill yöntemidir.

Hill 48 modeli

Bu model gerilim uzayından formüle edilir. Akış yüzeyi quadratik (gerilim uzayında eliptik fonksiyon) alınır ve r_0 , r_{45} , r_{90} değerleri ve malzemenin akış gerilimi kullanılarak tanımlanır.



Şekil 6.8 Hill 48 modelindeki akma mukavemetleri (hadde ve hadde yönüne dik doğrultudaki) (Autoform User Manual, 2005)

Hill 48 modelindeki akış yüzeyi(hadde yönündeki ve hadde yönüne dik yöndeki gerilim) θ_1 ve θ_2 açıları r_0 ve r_{90} kullanılarak şu şekilde hesaplanabilir.

$$\tan(\theta_1) = r_0 / (1+r_0) \text{ ve}$$

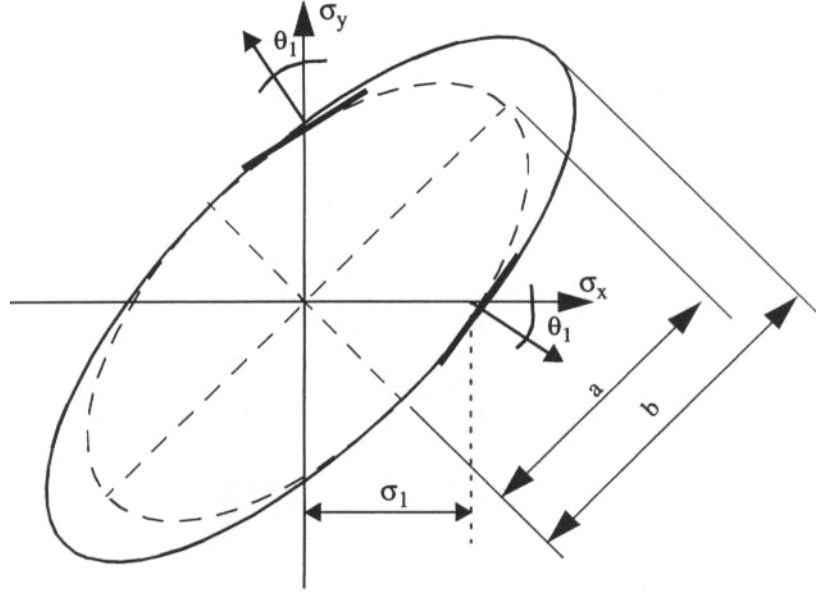
$$\tan(\theta_2) = r_{90} / (1+r_{90})$$

Hill metodunun her üç r değeri içinde avantajları vardır ve bundan dolayı malzemelerin düzlemsel anizotropik olanları bu hesaplan çıkarılırlar. Burada sadece üç r değeri r_0 , r_{45} , r_{90} (fakat çift eksenli gerilim faktörü yoktur) girdi datası olabilir. Kullanılan programın Hill modeli gibi gerilim uzayında olmayan basit bir metod kullanmaktadır. Eğer r değeri belirtilmediyse program tarafından isotropik kabul edilmektedir.

Hill 79 modeli

Hill 79 modeli, non quadratik fonksiyonu esas alan bir akma yüzeyi oluşturur.

Fakat burada her üç r değeride eşit olarak kabul edilir.($r_0, r_{45}=r_{90}$) Bu göstermektedir ki akma yüzeyi eksen boyunca uzanan bir elipsten meydana gelir.



Şekil 6. 9 Hill 79 modelindeki akış yüzeyi ve biaxial mukavemet faktörü (Autoform User Manual, 2005)

Hill 79 modelindeki akma yüzeyi ve çift eksenli gerilim faktörü

Bu modelin avantajı, çift eksenli gerilim altında malzeme akış şartlarını kullanmasıdır. Ayrıca bu modelde sadece ortalama r değeri (r_m) kullanılır.

Benzer bir model germe alanında formüle edilen simülasyon programı için uygulanabilir. Bu model çift eksenli gerilim α boyunca üç ayrı r değeri girdisi olduğunda seçilir. Bu çift eksenli gerilim faktörü direkt olarak gerilim alanındaki elips alanının uzamasını kontrol eder $\alpha = b/a$ Çift eksenli gerilim faktörünün özellikleri sac basımında kullanılan birçok malzeme için gerekli değildir. Bazı alüminyum alaşımlarında çift eksenli gerilim faktörü büyüklüğünün $\alpha = 1,1$ (α yaklaşık 1,1) özellikleri simülasyon sonuçlarını geliştirir. Gerilim faktörünün anlamlı değerleri 0,8 ile 1,2 ranjı arasındadır.

Hill 48 ve Hill 79 modellerinin birleşimi

Hill 90 modeli Hill 48 ve Hill 79 modellerinin birleşimidir. Bu model farklı r değeri r_0, r_{45}, r_{90} özelliklerinin çift eksenli gerilim sisteminde ,yüzey elipsinde uzamasına izin verir. Benzer bir model germe yüzeyinde formüle edilerek simülasyon programında kullanılabilir. Bu model üç farklı r değerinin çift eksenli gerilim faktörü girdisi olarak kullanıldığında uygulanabilir.

Katılaştırma modeli

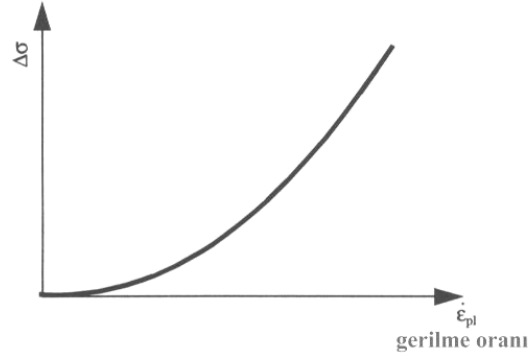
Simülasyon programı, birleşimdeki anizotropik akma yüzeyini isotropik katılaştırma eğrisi ile kullanır. Örneğin plastik deformasyonunda akma yüzeyi katılaştırma eğrisi üstündeki plastik gerilme oranına dönüştürülür.

6.5.Yüksek gerilim eğrisi (The Overstress Curve)

Bazı malzemeler için eğri akışı, deformasyon oranına bağlıdır. Deformasyondaki oran ne kadar yüksekse gerilim akış değeri de o kadar yüksek olur. Simülasyon programı hesaplamalarda ,germe oranı eşitliği $\Delta\sigma$ fonksiyonunda yüksek gerilim eğrisi özelliklerinin kullanılmasını sağlar. (örnek :birim zamandaki eşit plastik gerilimi)

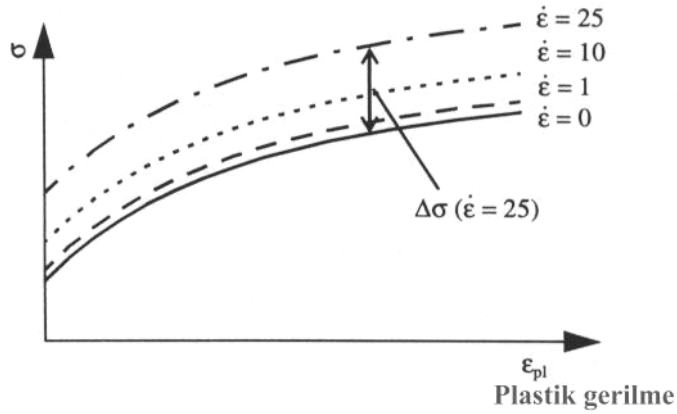
$$\Delta\sigma = f(\dot{\epsilon}_{pl}) \quad \dot{\epsilon}_{pl} = d\epsilon_{pl}/dt$$

Simülasyon programı verilen gerilim oranında yüksek gerilim faktörü girdisinin eklenmesi ile akış gerilimini artırır. Akış eğrileri, farklı gerilim oranlarında deneysel olarak tespit edilmelidir. (Bu gerilim oranlarında, gerilim testlerinin uygulanması ile) Böylelikle $\Delta\sigma$ değeri tespit edilir.



Şekil 6.10 Gerilim oranının fonksiyonu olarak maksimum mukavemet katsayısı (Autoform User Manual, 2005)

Eşit plastik gerilim oranı fonksiyonu olarak yüksek gerilim eğrisini göstermektedir. Şekil 6.10 gerilim oranı fonksiyonu olarak yüksek gerilim katsayısı (deformasyon oranı) Şekil 6.11 farklı gerilim oranlarındaki birçok akış eğrisini şematik olarak göstermektedir.



Şekil 6.11 Farklı gerilim oranlarındaki akış eğrileri, farklı akış eğrileri gerilimleri arasındaki $\Delta\sigma$ farklılıkları, yüksek gerilim eğrisi veya yüksek gerilim fonksiyonu olarak gösterilebilir. (Autoform User Manual, 2005)

6.6. Uzama Limitleri Eğrisi ve Diyagramı (FLC &FLD)

Deformasyon analizleri malzemelerin uzama sınır eğrileri karşılaştırması esasına dayanır. Sac metallere form verilmesi aşamasında potansiyel başarısızlıkları tespit edebilmek için çok önemlidir.

Şekil verilen sac malzemenin deformasyon durumu major, ana gerilim değeri veya minör ana gerilim değeri ile karakterize edilebilir. Bu sebeple deformasyon durumu plan üzerinde nokta ile temsil edilebilir. Bu noktada x-ekseni minör ana gerilimi , y-ekseni ise major ana gerilimini gösterir. Bir çok deneysel gözlemlerde görülmüştür ki, malzemelerin form alma limitleri plandaki bu eğri ile açıklanabilir. Malzemelerdeki deformasyon durumu bu eğriye ulaşırsa başarısızlığa uğrar ve yırtılır. Bu eğri uzama sınır eğrisi olarak adlandırılır. Bu sebeple malzeme noktasının deformasyonunun hesaplanması bu FLC boyunca uzanıyorsa sacın bu noktada başarısızlığa uğraması beklenir. Daha ileriki bölümlerde major ve minör ana gerilmelerin tespit edilmesi ve malzemelerin uzama limit eğrisinin kurulması anlatılmaktadır. Sacın üstündeki major ve minör ana gerilim noktaları aşağıda açıklandığı gibi tespit edilmiştir.

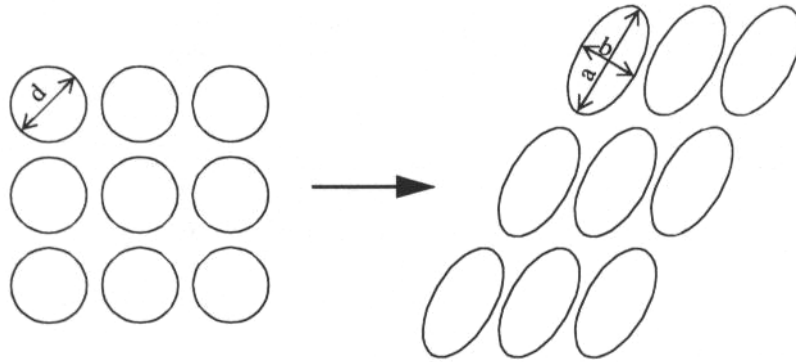
1-Sabit yarıçap(d) lı küçük dairelerin aralıkları deforme edilmemiş sac üstüne işaretlenir.

2-Daha sonra sac deforme edilir.Deformasyon sonucu işaretlenmiş daireler uzayarak elipse dönüşür.

3-Elips üzerindeki major ve minör eksenler ölçülür.Deforme edilmiş sac üzerindeki noktada major ve minör ana gerilmeler bu noktadaki dairenin deformasyonundan hesaplanır.

$$\epsilon_1 = \epsilon_{\max} = \ln (a/d) \text{ (major temel gerilme)}$$

$$\epsilon_2 = \epsilon_{\min} = \ln (b/d) \text{ (minör temel gerilme)}$$



Şekil 6.12 Major temel gerilmenin (ϵ_{\max}) ve Minör temel gerilmenin (ϵ_{\min}) Ölçülmesi (Autoform User Manual, 2005)

Uzama Limit Eğrisinin Kurulması

Ele alınan malzemenin sac özellikleri uzama limit eğrisini oluşturmak için sacın tam anlamıyla deforme olmasına kadar değişik test modelleri ile (laskazima şerit deneyi, çekme deneyi ve burkulma deneyi gibi) test edilerek belirlenir.

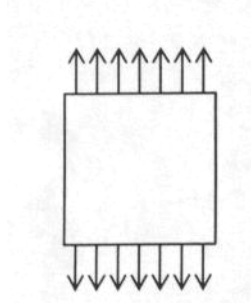
Bütün testler kopma (tam deformasyon) sırasında major ve minör ana gerilmeleri belirlemeye olanak sağlar. Bu kopma noktaları bir veya daha fazla olarak uzama limit eğrisi üzerinde görülür. Bütün bu testler sırasında gerilmenin lineer olarak sürdürülmesi önemlidir.

$$\epsilon_1 = \text{const } \epsilon_2$$

Çekme Deneyi

Deney numunesi tek ekseninde gerilir. Numune bu doğrultuda uzatılır ve bu doğrultuya dik olan doğrultuda büzülür.

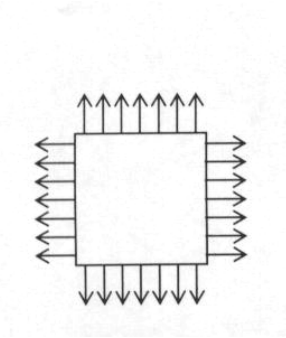
Örnek: ε_1 pozitifken, ε_2 negatiftir.



Şekil 6-13 Çekme deneyindeki gerilmenin şematik gösterimi
(Autoform User Manual, 2005)

Burkulma Deneyi

Sac numune bütün yönlerde gerilir. Bu nedenle simetrik olarak genişler. Örneğin ε_1 ve ε_2 her ikisinde pozitifdir. (Düzlemsel anizotropi bu test için ikincil öneme sahiptir.)



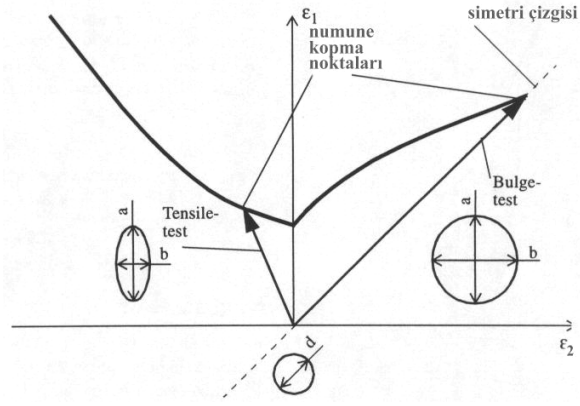
Şekil 6.14 Bulge testindeki mukavemet/gerilme durumu
(Autoform User Manual, 2005)

Nakazima Testi

Nakazima testinde değişik genişlikteki şeritler kullanılır. Bu şeritler yarım küre şeklindeki erkek tarafından yırtılma başlangıcına kadar gerilir. Uzama limit eğrisindeki farklı noktalar değişik genişlikteki şeritlerden sağlanabilir.

Uzama Limit Eğrisinin Simetrliliği

Major gerilme değerinin büyüklüğü ε_1 tanımlama dolayısıyla 0'dan büyüktür. Bu nedenle FLD üzerindeki noktaların absis (major gerilme ε_1), y ekseninin pozitif kısmı ile sınırlandırılırlar. Dahası tanımlamadan gelen major gerilme minör gerilmeden (ε_2) daha büyüktür. Sac üzerindeki gerilme durumu pozitif ε_2 bağlı olarak şekil 6.15 görüleceği üzere her zaman simetri ekseninin üzerinde bulunur. $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$



Şekil 6.15 Uzama limit eğrisi (Autoform User Manual, 2005)

Uzama Limitleri Eğrisini Belirlemedeki Zorluklar

Herhangi bir malzeme için uzama limit eğrisinin şu gerçekler ışığında tam olarak belirlenmesinin imkansız olduğu unutulmalıdır.

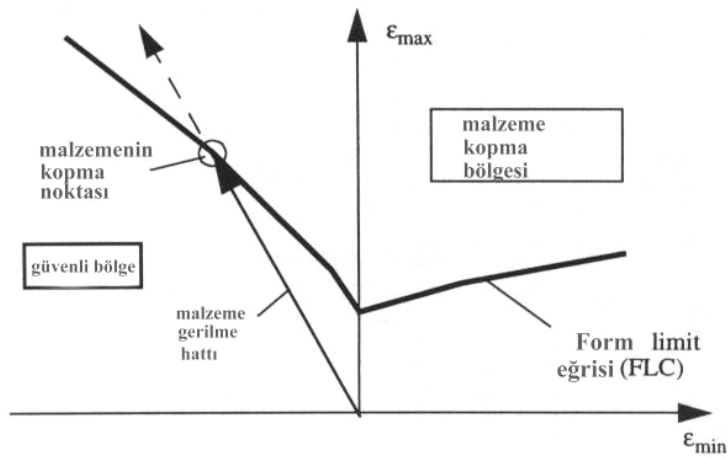
*sürtünme etkisi(örneğin nanakazıma testindeki)

*major ve minör gerilme gerçek ölçüm değerleri özellikle deney numunesinin kıvrılmış bölgesi içerisinde yer almaktadır.

Bunun yanında uzama limit eğrisi, sac kalınlığına ve ürünler arasındaki farklılıklara bağlıdır.

Uzama limit eğrisinin genel kullanımı

FLD genellikle şekil 6-16 görüleceği üzere malzemedeki bozulmayı belirlemek için kullanılır. Teorik olarak bu sadece lineer deformasyon bölgesi altında giden malzemeler için kullanılır. Bu varsayım nedeni ile uzama limit eğrisi tecrübi tanımlama temellerine göre şekillendirilirler. Pratik olarak halen diğer noktalara göre olan tahminde FLD ye bağlıdır. Sac metallere form verme prosesinde gerilme bölgesi nadiren lineerdir.



Şekil 6.16 Malzeme kopma tahminleri için FLD 'nin kullanılması (Autoform User Manual, 2005)

7. SOĞUK ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Bu çalışmada belirlenen beyaz gövde (BIW) parçası (Şekil 7.1) için derin çekme ve çevre kesme simülasyonu hazırlanmıştır. 1.2mm kalınlığında olan parça için üç farklı malzeme türü ile formlama simülasyonları gerçekleştirilmiştir.

- Soğuk haddelenmiş sac malzemesi
FeP04 ve FeE340
- Çift fazlı gel.yük. mukavemetli çelik
DP600



Şekil 7.1: Simülasyon Çalışmaları İçin Örnek Seçilen Parça Geometrisi

7.1. Sac Şekillendirilebilirlik Sonuçları

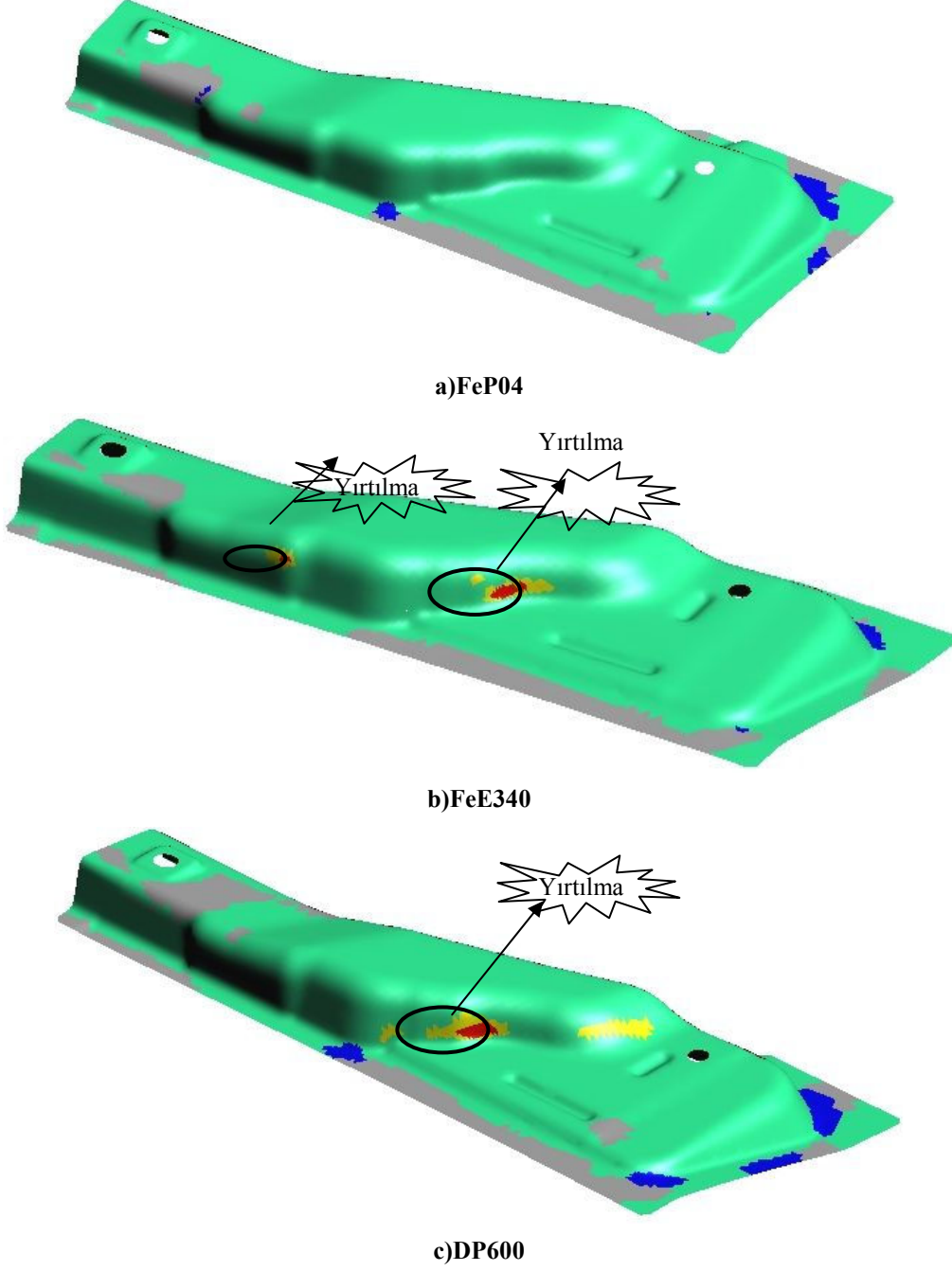
Şekil 7.2.a'da simülasyon sonuç görüntüsü yer alan yüksek form verilebilirlik özelliğine sahip FeP04 sacında herhangi bir yırtılma riski gözükmemektedir.Şekil 7.2.b'de FeE340 malzemesiyle yapılan simülasyon sonucunda parça üzerinde iki farklı bölgede yırtılmalar gözükmemektedir.Şekil 7.2.c'de ise DP600 malzemesiyle yapılan simülasyon sonucunda parça üzerinde bir bölgede yırtılma riski görülmektedir.

Üç simülasyonun sonuçları ile elde edilen veriler Tablo 7.1'deki teorik değerlerle örtüşmektedir.

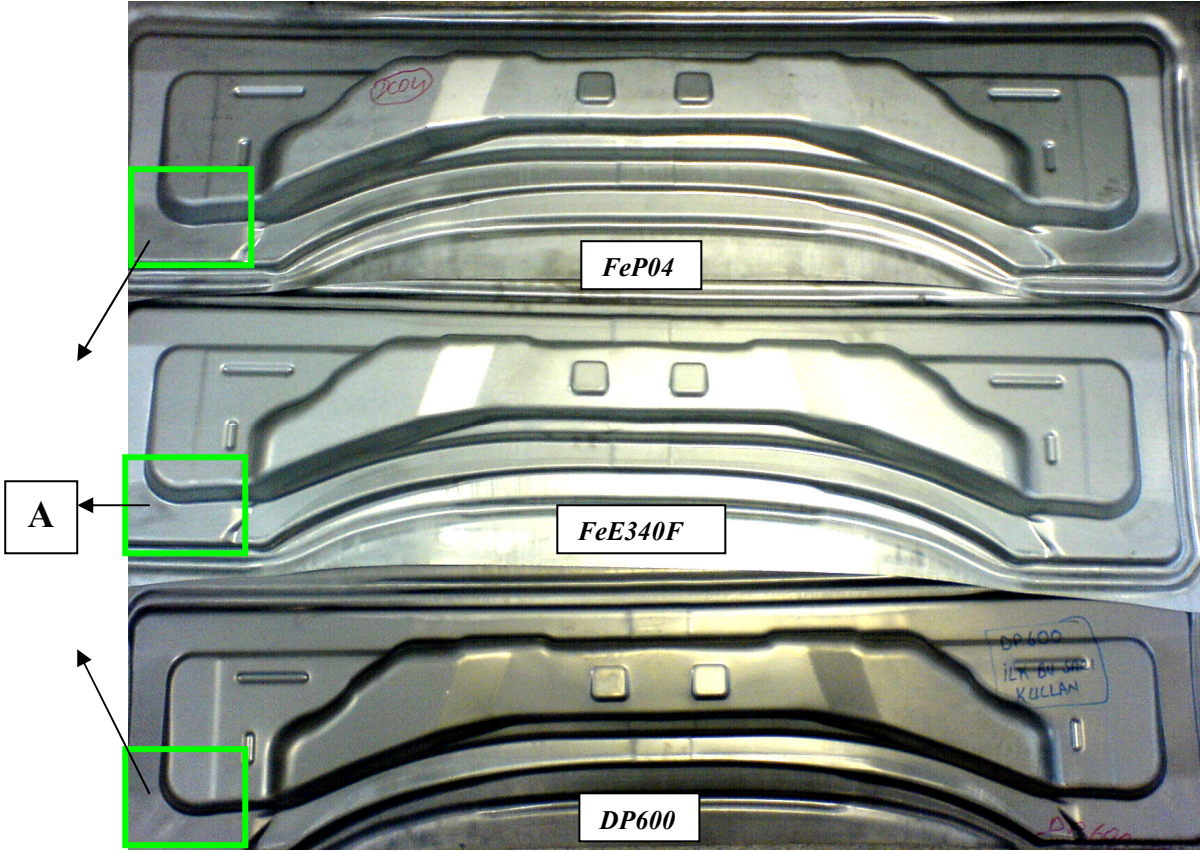
Tablo 7.1: Malzemelerin Mekanik Özellikleri

SAC MALZEME	Akma Mukavemeti (Mpa)	Çekme Mukavemeti UTS(Mpa)	Uzama %	n-değeri
FeP04	183	314	42,9	0,23
FeE340	377	443	28,4	0,15
DP600	340	602	29	0,15

Tablo 7.1 de gösterildiği gibi FeP04 en yüksek uzama değerine sahip malzemedir, ve bunun sonucu olarak parçada herhangi bir yırtılma görülmemektedir.



Şekil -7.2 – Parça Form verilebilirlik Görüntüleri



Şekil
7.3 –
Parçal
arın
Çekm
e
Kalıbı
ndan
Çıkmı
ş Hali



Şekil 7.4 – Şekil 7.3 içerisindeki A Bölgesinin Detay Resmi

Şekil 7.3 ve 7.4'te örnek seçilen parçanın çekme kalıbından çıkmış hali gözükmektedir.

Simülasyonlarda görülen yırtılma, incelme ve kırışma değerleri hemen hemen çıkan sonuçlarla örtüşmektedir.

Şekil – 7.3 üzerinde belirtilen A Bölgesindeki kırışıklıklar incelenecek olursa FeP04 üzerinde kırışıklık görülmemekte ancak DP600 ve FeE340F üzerindeki kırışıklık değerleri gözle görülür oradadır.



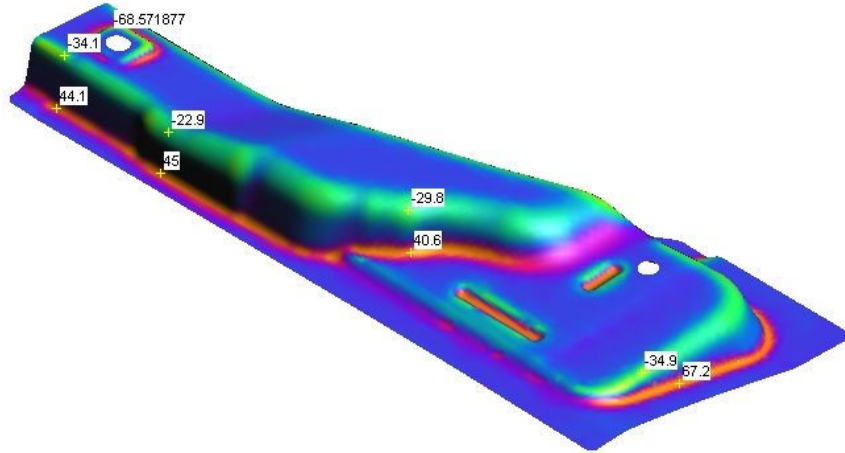
Şekil 7.5 DP600 Çekme Operasyonunda Yırtılma Yapan Bölgeler

Ayrıca DP600 malzemesinde şekil 7.5'te görüleceği gibi yırtılmalar ve incelmeler görülmektedir. Aynı şekilde FeE304F malzemesinde yapılan denemelerde de yırtılmalar görülmektedir. Ancak yapılan alıştırma deneme çalışmaları sonucunda FeE304F malzemesinde yırtıksız bir parça çıkarılabildi ancak, DP600 de benzer bir sonuca ulaşamamıştır.

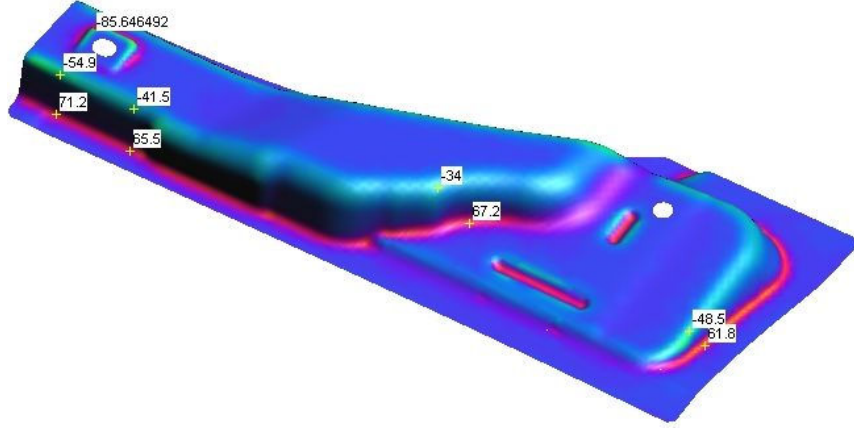
7.2. Yüzeylerde Oluşan Basınçlar

Şekil 7.6'da görüldüğü gibi farklı malzemelerin kullanımıyla kalıp elemanları üzerindeki yüzey basınç değerlerinde büyük değişimler oluşmaktadır.

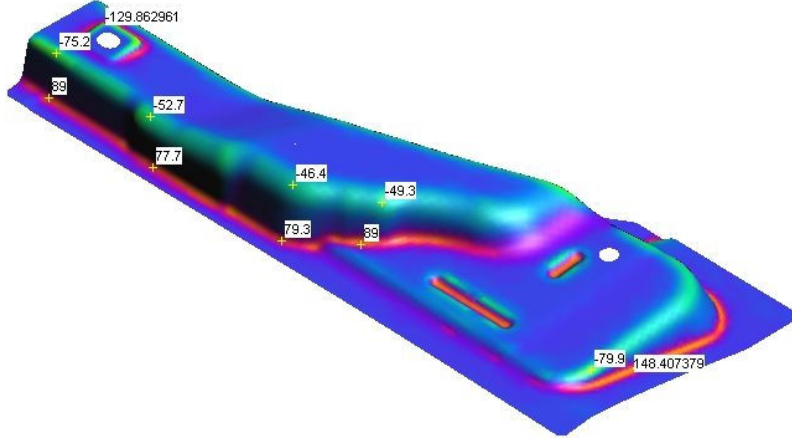
Kalıp elemanları üzerinde oluşan yüzey basınç değerleri arttıkça yüzeydeki plastik deformasyon ve sürtünme katsayısıda artmaktadır. Bu etken kalıp elemanları üzerinde hızlı aşınma, çatlama ve kırılma gibi sonuçlara neden olacaktır.



a)FeP04 (+75.6 N/mm²)



b)FeE340 (+111.5 N/mm²)



c)DP600 (+149.2 N/mm²)

Şekil 7.6: Yüzeylerde Oluşan Basınçlar

7.3. Geri Yaylanma Davranışı

Geri yaylanma karakteristiği, YMÇ ve GYMÇ arasındaki en belirgin davranış farkıdır. Örnek olarak, aynı kalıpta tünel formu verilen iki farklı malzemeye ait geri yaylanma davranışı Şekil 7.7’te görülebilir.



DP 350/600

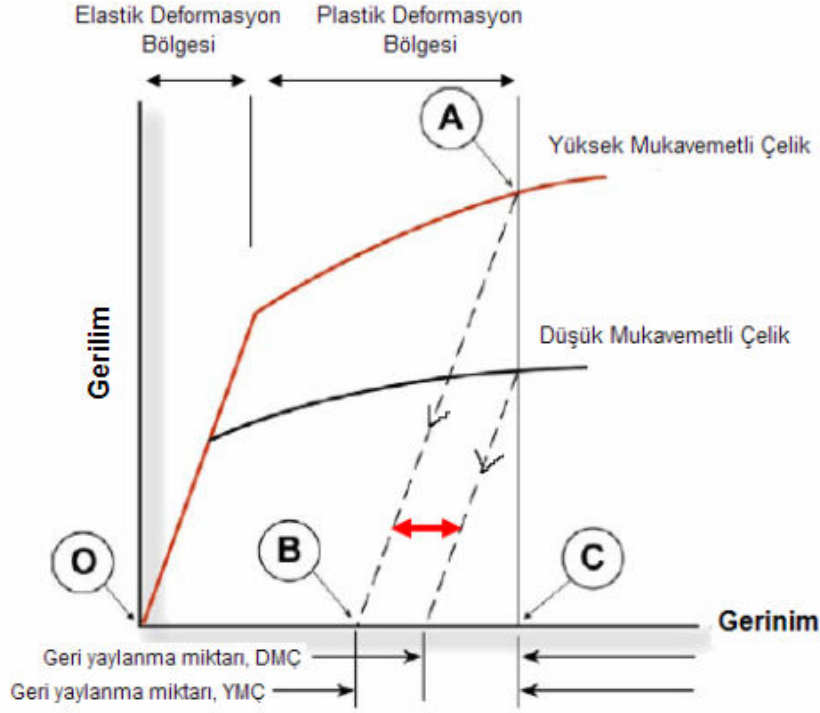
HSLA 350/450

Şekil 7.7: Farklı Malzeme ile aynı kalıpta basılmış sac parçalar

Gerinim dağılımları hemen hemen aynı olmasına rağmen DP ve HSLA saclarının özelliklerinin farklılığından kaynaklanan gerilim dağılımları çok farklıdır.

Kalıpta şekil verilen tüm sac malzemeler kalıptan çıkarıldıktan sonra kalıp erkek ve/veya dişi formundan belli bir oranda farklılık gösterirler. Geometrideki bu sapmaya geri yaylanma (elastik deformasyon) denir. Sac malzemedeki geri yaylanma davranışı grafiksel olarak Şekil 7.8’te gösterilmiştir.

Plastik deformasyon bölgesinin **A** noktasında malzeme üzerindeki kuvvetlerin kalkması (kalıp üst grubunun yukarı yönde hareketinin başlaması) grafikte **AB** çizgisi olarak gösterilmiştir. OB malzemedeki kalıcı deformasyon, BC ise elastik deformasyon (geri yaylanma) miktarıdır. Geri yaylanma miktarının küçük olması form verme sonrası parçada gözlenen deformasyonun da küçük olacağı anlamına gelmez, örneğin basit bir bükme işleminde geri yaylanma sadece radyüste olacaktır fakat radyüsteki geri yaylanma etkisi ile radyüsün devamı olan parçanın duvarlarında/eteklerinde gözlenen atma çok daha yüksek olacaktır. Geri yaylanma büyüklüğü, parça geometrisi ve form sonrası parça üzerindeki gerilimlerin dağılımları ve büyüklüklerine bağlıdır. Parça üzerindeki gerilimleri azaltmak veya homojen dağılımını sağlamak geri yaylanmayı da azaltır.



Şekil 7.8: Sac malzemedeki geri yaylanma davranışı grafiksel (AHSS Application Guidelines, 2005)

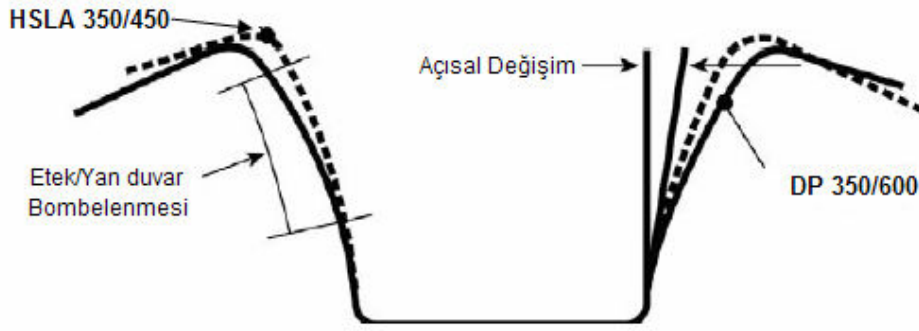
Genel olarak GYMÇ için geri yaylanma miktarları DMS ve Konvansiyonel YMÇ dan daha yüksektir. Geri yaylanma büyüklüğünün form verilmiş malzemenin akma gerilimiyle orantılı olduğu düşünüldüğünde (deformasyon sertleşmesine uğramış) bu fark daha iyi anlaşılır.

7.3.1 Geri Yaylanma Tipleri

Genel olarak araç gövde iskeletini oluşturan parçalarda üç farklı geri yaylanma tipi gözlenir.

1. Açısal Değişim
2. Etek / Yan Duvar Bombeleşmesi
3. Burulma

7.3.1.1. Açısal Değişim



Açısal Değişim ve Etek/Yan duvar Bombelenmesi

Şekil 7.9: Açısal Değişim ve Etek Yan duvar Bombelenmesi
(AHSS Application Guidelines, 2005)

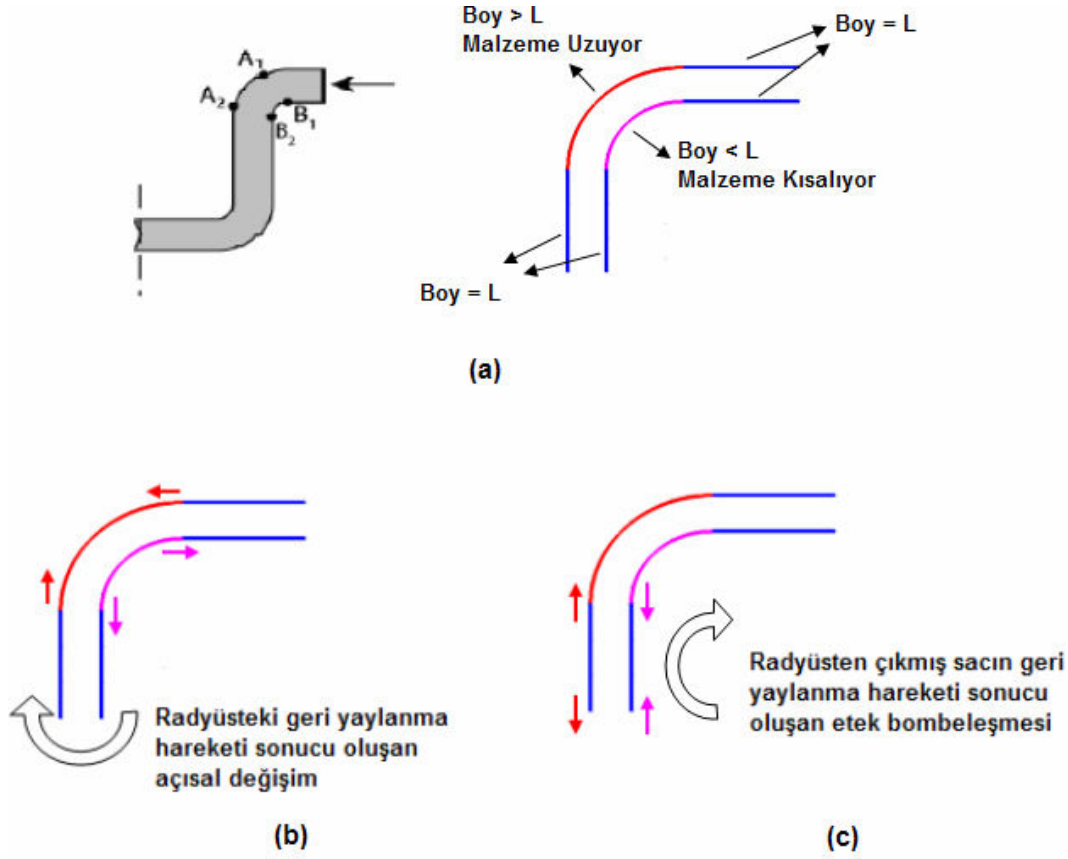
Daha önceki bölümlerde değinildiği gibi form verme sonrası parçanın özellikle yanal duvarlarında geri yaylanma gözlenir. Söz konusu duvarların teorik (genellikle kalıp erkek geometrisi) ve gerçekleşen konumları arasındaki açı *açısal değişim* olarak adlandırılır. Bu açı erkek çekme radyüsünden ölçülür. Eğer parça duvarlarında etek bombelenmesi oluşmamış ise ölçülen açı tüm duvarda aynıdır.

Açısal değişimin nedeni çekme radyüsünde hareket halindeki sacda meydana gelen bükme ve doğrultma prosesi sonrası sac kalınlığı yönünde oluşan gerilim farkıdır. Şekil 7.10.b'den görülebileceği gibi kuvvet ortadan kalktığı zaman dış radyüsteki sac (uzamış olan sac) kısaltmaya, iç radyüsteki sac (kısalmış olan sac) uzamaya çalışacaktır. Bu gerilim farkı kalıp açıldığı zaman (kuvvetler ortadan kalktığında) bükme radyüsünde bükme momenti oluşturarak parça duvarında açısal değişime neden olur.

Açısal değişimi ortadan kaldırmak veya minimize etmek bükme momentini ortadan kaldırmak veya minimize etmek ile mümkündür.

7.3.1.2. Etek / Yan Duvar Bombeleşmesi

Etek bombeleşmesi Şekil 7.9 de tünel geometrili parçada görülebileceği gibi yan duvarın dış bükey şeklinde kıvrılmasıdır. Bombeleşme sac malzemenin kalıp erkek / dişi radyüsünden veya süzdürme üzerinden akması sonucu oluşur. Bunun ana nedeni sac kalınlığı yönünde düzgün olmayan gerilim dağılımıdır. Şekil 7.10.c'den görülebileceği gibi kuvvet ortadan kalktığı zaman dış radyüsteki sac (kısalmış olan sac) uzama, iç radyüsteki sac (uzamış olan sac) kısalma eğilimindedir. Sac iç yüzeyi basma gerilimine dış yüzeyi ise çekme gerilimine maruz kalır.

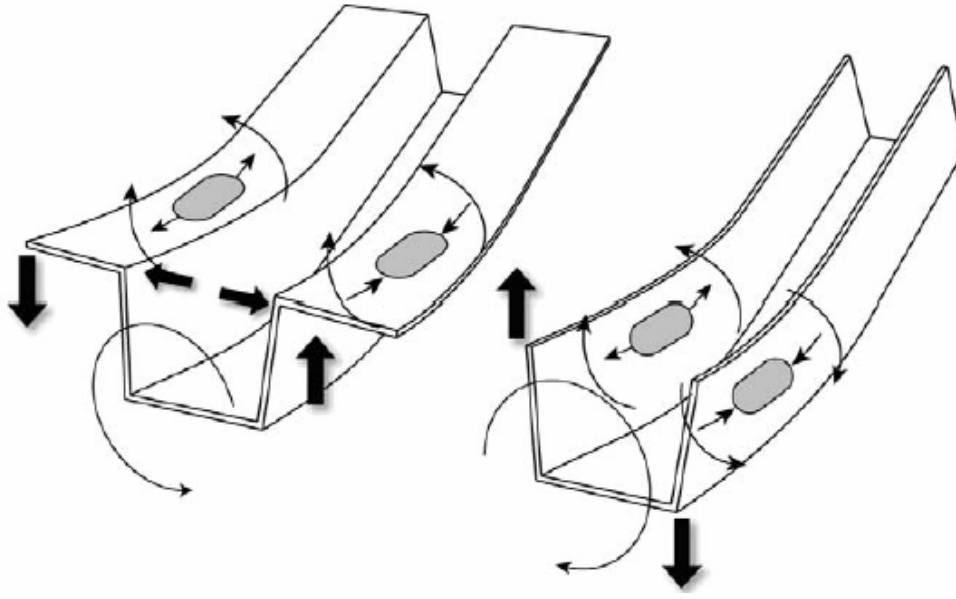


Şekil 7.10: Açılma Değişimi ve Etek Yan duvar Bombelenmesi (AHSS Application Guidelines, 2005)

Geri yaylanmadaki bu farklılık parça eteklerinde bombeleşmeye neden olur. Deforme edilen malzemenin mukavemeti arttıkça bombeleşme miktarı da artar. Form verilen malzemenin mukavemeti sadece başlangıç akma mukavemetinin yanında deformasyon sertleşmesi kapasitesinde bağlıdır. İşte bu konvansiyonel YMS ve GYMS arasındaki ana farklılıklarda biridir (GYMS'lerin deformasyon sertleşme kapasiteleri konvansiyonel YMS'lara göre oldukça yüksektir). Etek bombeleşmesinin minimize edilebilmesi sac kalınlığı yönündeki gerilim farklılıklarının minimize edilmesine bağlıdır.

7.3.1.3. Burulma

Burulma, parça üzerinde farklı iki kesitin parça ekseninde farklı açılarda dönmesi olarak tanımlanır ve parça kesitinde meydana gelen burulma momenti sonucu oluşur. Burulma momenti ise, parça üzerinde form verme sonrası kalan gerilimlerin farklı yönde hareket etmeye çalışması sonucu oluşan bir büyüklüktür. Form verme sonrası, burulma momentine neden olan gerilimler parçanın eteklerinde, duvarlarında veya her ikisinde birden oluşabilir.



Şekil 7.11: Parçalarda Burulma (AHSS Application Guidelines, 2005)

Bir parçadaki burulma miktarı parça üzerindeki dengesiz gerilimler ve parçanın burulma yönündeki mukavemeti arasındaki ilişkiden elde edilebilir. Uzun, ince parçaların burulma dirençleri düşüktür, burulma açısı aynı da olsa parça uzunluğu arttıkça burulma miktarı da artar. Burulma hareketine neden olan kuvvet çiftlerini yaratan dengesiz gerilim dağılımının azaltılması sonuç olarak parçanın burulma eğilimini de azaltacaktır. Dengesiz gerilimler simetrik olmayan parçalarda, etek uzunluğu yada yan duvar yüksekliği fazla olan parçalarda ve ani kesit değişimi içeren parçalarda yaygındır.

Parça simetrikte olsa, gerilim dağılımı simetrik olmayan parçalarda dengesiz kuvvetler (gerilimler) oluşur. Asimetrik gerilim dağılımı nedenleri olarak, pot üzerine açınım sacının hatalı yerleştirilmesi, dengesiz – hatalı yağlama, kalıp yüzeylerinin dengesiz – hatalı parlatılması, dengesiz pot kuvveti, preslerdeki geometrik hassasiyet sorunları, aşınmış çekme ve süzdürme radyüsleri sayılabilir. Bu problemler malzeme akışında dengesizliğe neden olarak gerilim farkı oluşturur, bunun sonucu oluşan burulma momenti ise parçanın burulmasına neden olur.

Burulma, parçanın burulma mukavemetinin artırılması ile, parça üzerine nervür eklenmesi ve parça dizaynlarında uzun, ince kesitlerden kaçınılması, kontrol altına alınabilir.

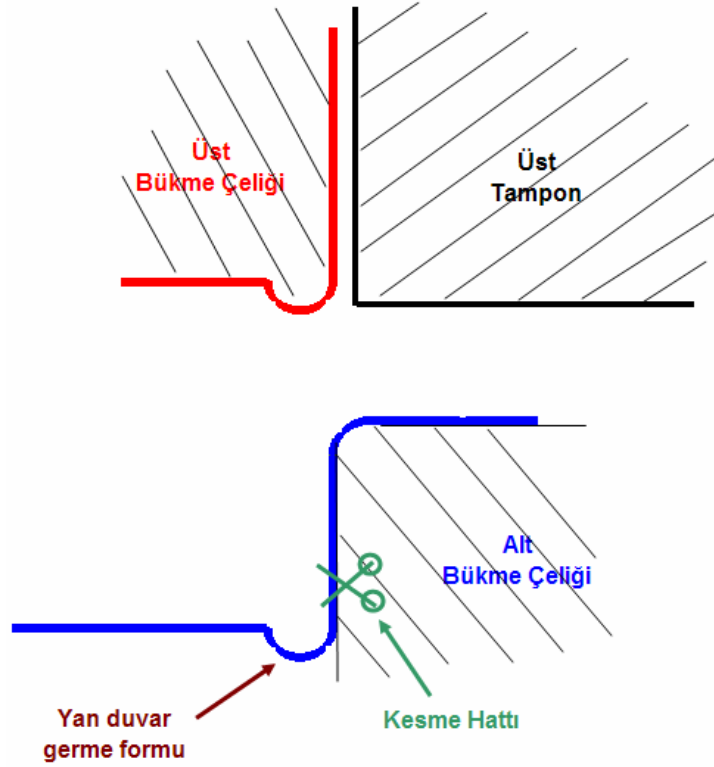
7.3.2. Geri Yaylanma Çözümleri

Proses dizaynında bazen, parça geometrisine bağlı olarak, birden fazla form verme operasyonu gerekli olabilir. İkincil operasyonlar geri yaylanmaya uğramış parça geometrisini olması gereken duruma getirmek için kullanılır. İlk operasyondan sonraki operasyonlarda parçanın ilk operasyonda deformasyon sertleşmesine maruz kaldığı unutulmamalıdır. Mümkün olduğunca her operasyon için simülasyon analizi yapılmalıdır. Sac

malzemeye, radyüs üzerinden çekerek/akıtarak veya radyüs üzerinde gerekerek form verme yerine doğrudan bükerek form vermek, denenmesi gereken bir çalışmadır.

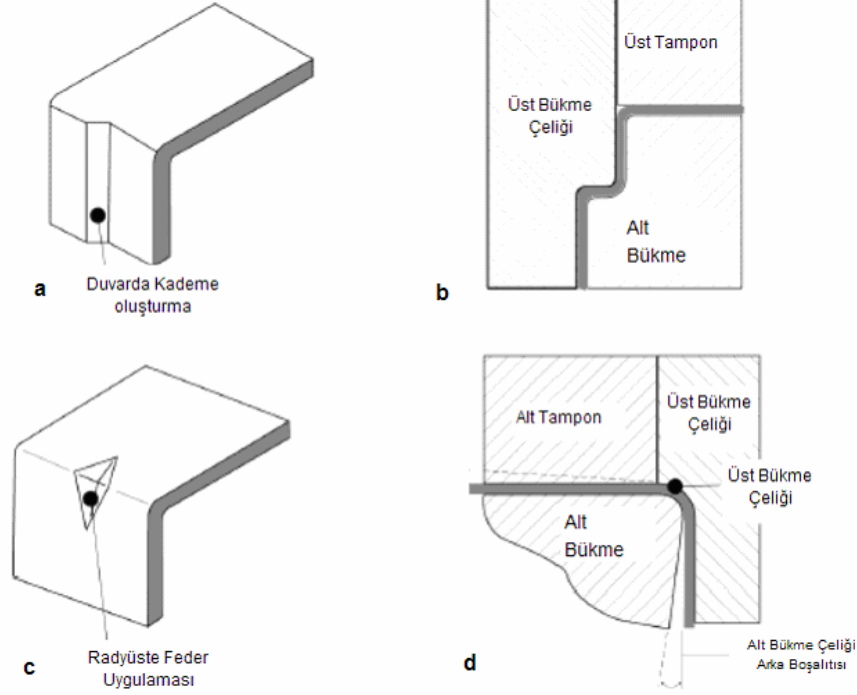
- **Açısal Değişim**

Geri yaylanma miktarının azaltılması amaçlı sac malzemeye bükme sonrası düzlemsel çekme gerilimi uygulanabilir. Örnek olarak, şekil 7.12’de gösterildiği gibi bükme çeliklerine ilave edilen bir form sayesinde yan duvarlar aşağı yönde belirli bir oranda uzatılarak (çekilerek) geri yaylanma miktarı minimize edilmiştir. Etek bombeleşmesi ve açısal değişimin minimize edilebilmesinin bir yolu da form öncesi malzemenin belli bir oranda gerilmesidir. 1% veya daha büyük bir ön germe işlemi geri yaylanma miktarını ciddi oranda azaltır fakat unutulmamalıdır ki ön germe uygulanmış malzeme deformasyon sertleşmesine uğradığı için akma mukavemeti artmış dolayısıyla form verilebilirliği azalmıştır, gereken form verme kuvveti ise akma mukavemeti oranında artacaktır.



Şekil 7.12 Bükme çeliklerine ilave edilen ek form

Şekil 7.13'te form verilmiş parçada, açısal değişim ve/veya etek bombeleşme miktarının azaltılması için çözüm önerileri verilmiştir.

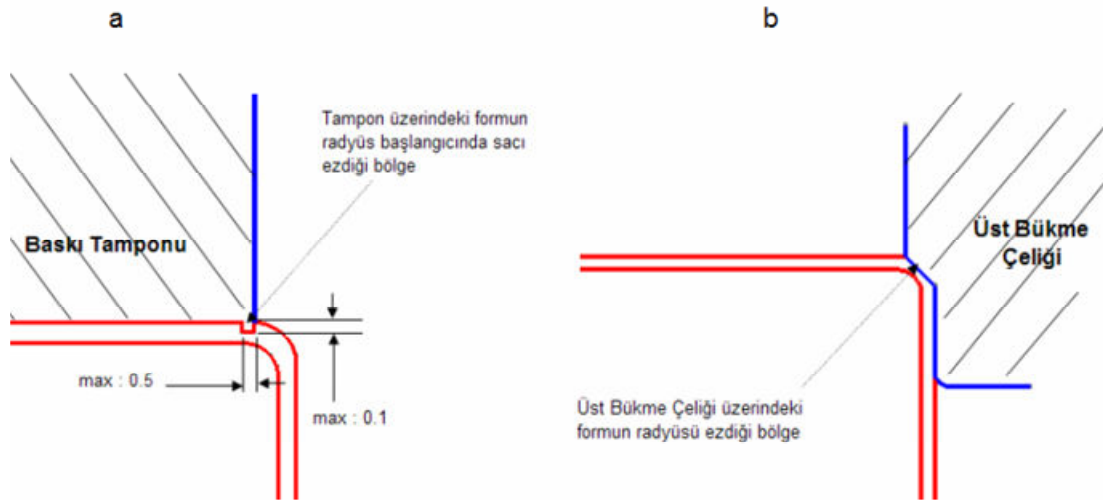


Şekil 7.13 Açısal değişim ve etek bombeleşmesinin azaltılması için örnek çözümler (AHSS Application Guidelines, 2005)

Parça duvarında kademe oluşturulması (Şekil 7.13.a), bükme çeliklerinin kademeli yapılması (Şekil 7.13.b), bükme radyüsü üzerine feder eklenmesi (Şekil 7.13.c), parça duvarlarında oluşan açısal geri yaylanma miktarını azaltır.

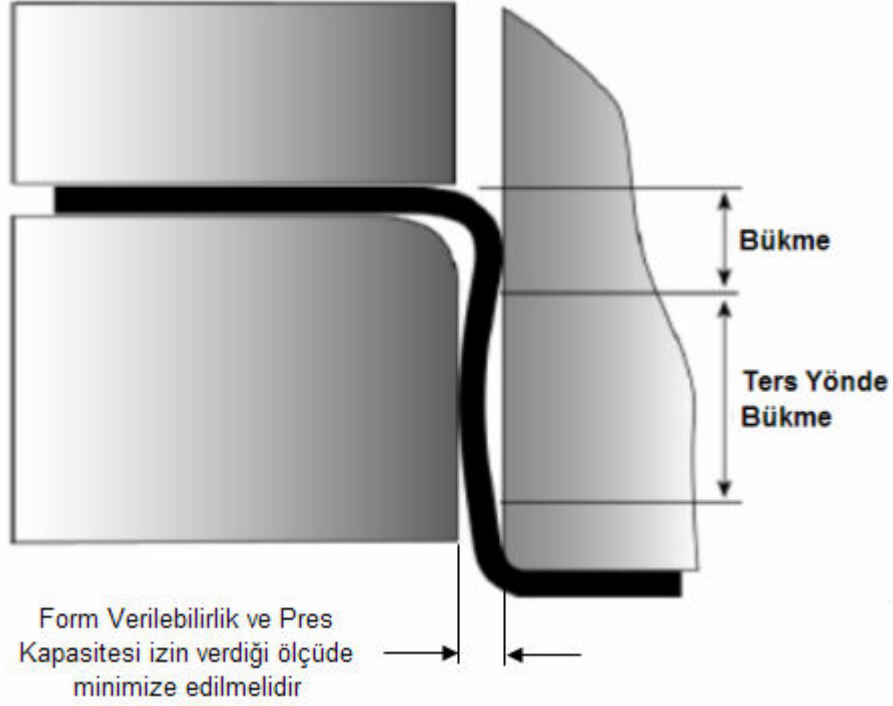
900 olan duvar/duvarlara sahip parçalarda geri yaylanma telafisi için kalıbın bükme radyüsü parça radyüsünden küçük yapılmalı ve erkek/dişi çeliklerde arka boşaltma öngörülmelidir, Şekil 7.13.d

Şekil 7.14 a'da tampon üzerinde, şekil 7.14 b'de ise üst bükme çeliği üzerinde bir geliştirme gösterilmiştir. Tampona eklenen form, bükme kuvvetinin ortadan kalkması sonucu radyüste oluşacak geri yaylanmayı dolayısıyla duvardaki açısal değişimi minimize edecektir. Üst bükme çeliğinin parça üst radyüsünü ezmesi de benzer bir fayda sağlayacaktır.



Şekil 7.14 Baskı tamponu ve Üst bükme Çeliğine eklenen formlar

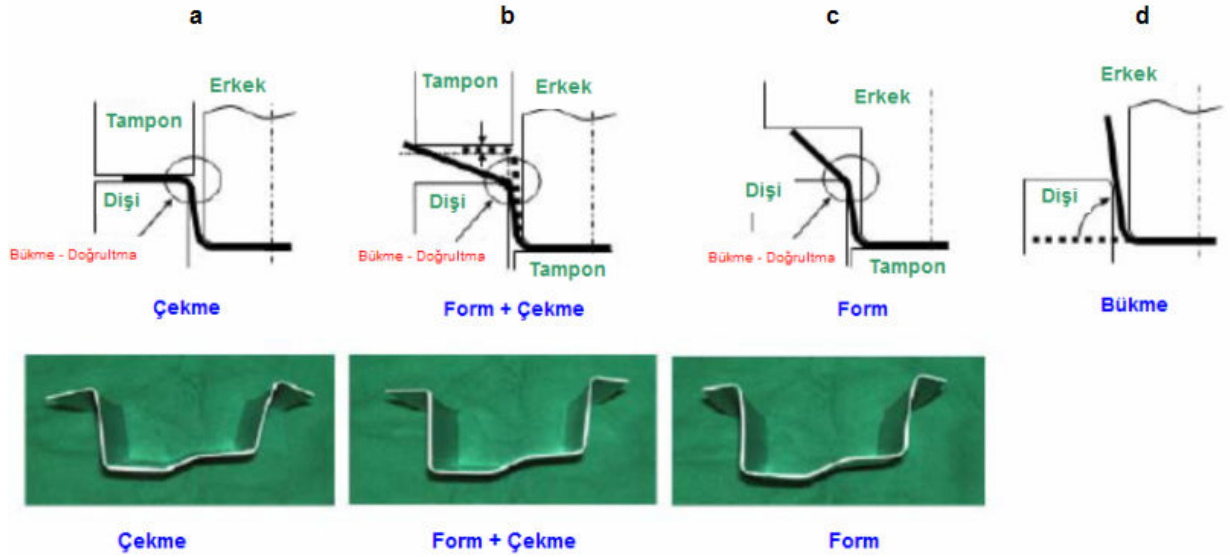
Çalışma boşlukları form verilebilirlik ve pres kapasitesi izin verdiği ölçüde minimize edilmelidir, (Şekil 7.15) Çalışma boşluğunun azaltılması sac malzenin radyüsten geçtikten sonra karşılaşılabileceği ters yönde bükme operasyonunu ortadan kaldırır bu ise parça duvarlarında oluşabilecek açısız değişimi önemli ölçüde azaltır.



Şekil 7.15 Çalışma boşluğunun etkisi (AHSS Application Guidelines, 2005)

- **Yan Duvar Bombeleşmesi**

Şekil 7.16 de aynı parça geometrisinin elde edilebileceği dört farklı form verme metodu şematize edilmiştir. Parça geometrisinin aynı olmasına rağmen form verme prosesleri farklı olduğu için sonuçta elde edilen parça geometrileri de farklı olacaktır.



Şekil 7.16 Farklı form verme metodlarının etkisi (AHSS Application Guidelines, 2005)

Şekil 7.16'da verilen dört farklı prosese ait açıklamalar :

Şekil 7.16.a : Çekme yöntemi ile şekillendirme metodu, sabit tampon baskı kuvvetine sahip alışılagelmiş form verme metodudur,

Şekil 7.16.b : Form + Çekme yöntemi ile şekillendirme metodudur. Birinci aşamada parça serbest olarak form almaya başlar, kalıp kapanmaya başladıkça tampon devreye girer, bu arada parça yaklaşık 40 – 50 % arasında form edilmiştir, tamponun devreye girmesi ile çekme işlemide başlamış olur. Bükme doğrultma deformasyonu minimum olduğu ve operasyon sonunda sac üzerinde yüksek değerlerde çekme gerilimi oluşturulabileceği için, yan duvar bombeleşmesinin azaltılmasında en etkili çözümdür,

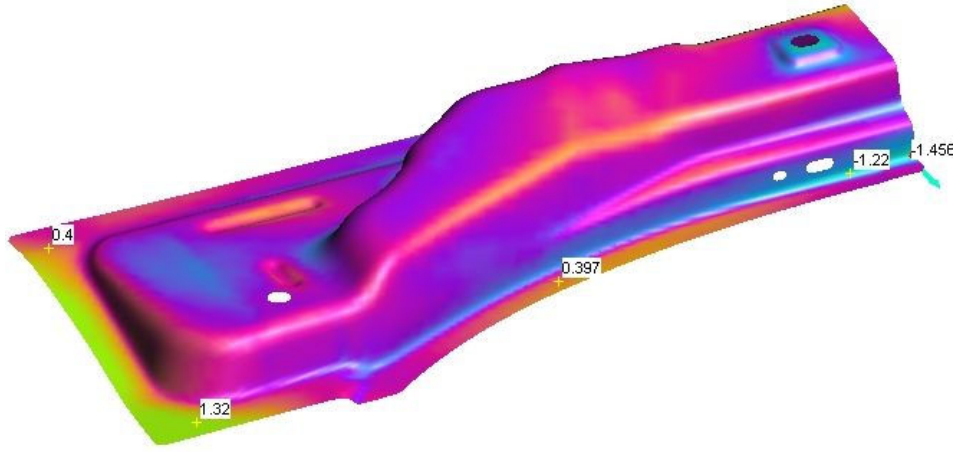
Şekil 7.16.c : Form verme verme metodu parça duvarının, operasyonun sonlarına doğru oluşmaya başladığı ve malzemenin çok az oranda bükme doğrultma deformasyonuna uğradığı bir methodur.

Şekil 7.16.d : Bükme, bilinen basit bükerek form verme metodudur, yan duvar üzerinde bükme doğrultma görülmediği için yan duvar bombeleşmesi olasılığı çok azdır fakat duvarda açılma değişim beklenmelidir.

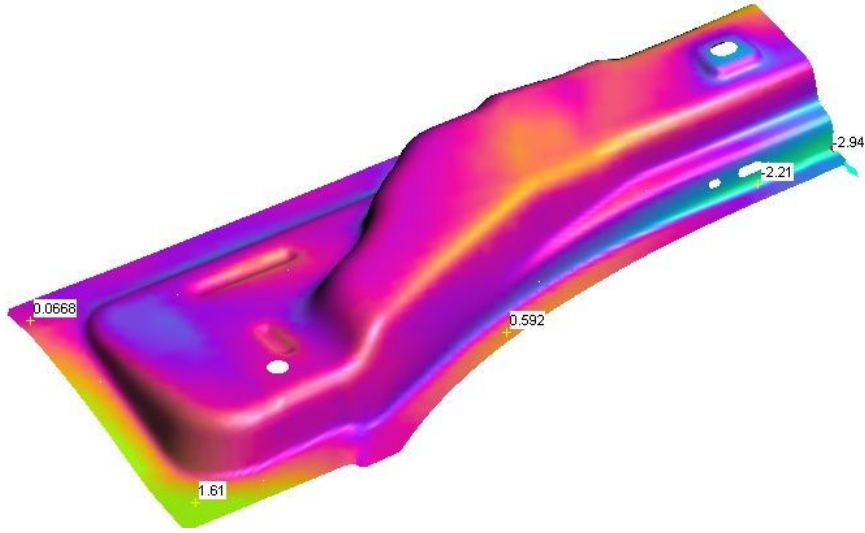
Gerçekleştirdiğimiz simülasyonlar sonucunda

- FeP04 malzeme için 1,45mm
- FeE340 malzeme için 2,95mm
- DP600 malzeme için 3,96mm

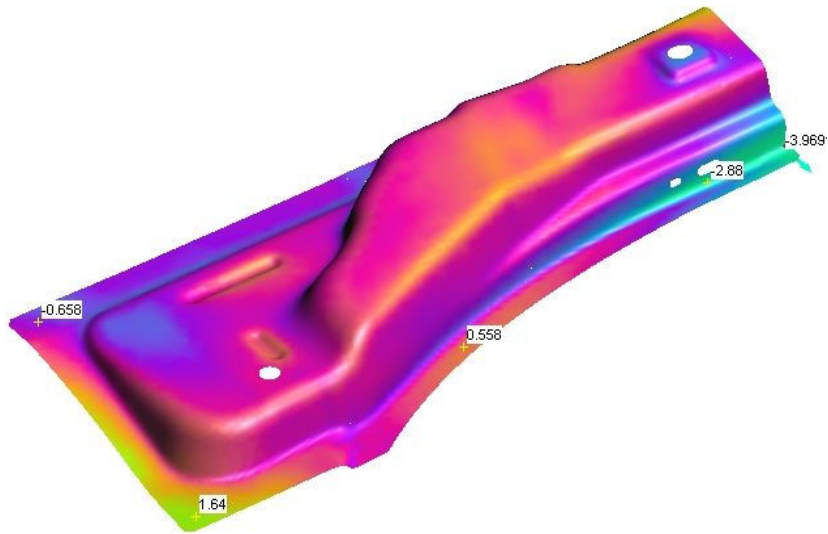
Maksimum geri yılanma değerleri gözlemlenmiştir.



a)FeP04 (1.45 mm)



b)FeE340 (2.95 mm)



c)DP600 (3.96 mm)

Şekil 7.17 Geri yaylanma sonuçları

Tablo 7.2 : Formlama Simülasyonu Sonuçları Özet Tablo

	MALZEMELER		
	FeP04	FeE340	DP600
Erkek Kuvveti	240T	360T	450T
Dişi Kuvveti	324T	441T	525T
Kontak Basınçlar (N/mm2)	+75.6	+ 111.5	+149.2
Geri yaylanma miktarı (mm)	1,45	2,95	3,96
	KARŞILAŞTIRMA		
	FeP04-FeE340	FeP04-DP600	FeE340-DP600
Erkek Kuvveti	50%	87,50%	25%
Dişi Kuvveti	36,10%	62%	20%
Kontak Basınçlar (N/mm2)	47,50%	97,40%	33,80%
Geri yaylanma miktarı (mm)	203%	273%	34,20%

Otomotiv endüstrisinde yolcu güvenliği, araç performansı ve yakıt ekonomisi üzerinde oluşan yeni gereksinimleri karşılamak amacıyla yapılan araştırma – geliştirme çalışmaları sonucunda üretilen yeni çelik türleri ile gereksinimler doğrultusunda adım adım hedefe yaklaşılsa da yeni malzemeleri şekillendirme proseslerinde büyük zorluklar ortaya çıkacaktır.Yapılan bu çalışmayla geliştirilmiş yüksek mukavemetli celik sac malzemelerin kalıp prosesi açısından çeşitli zorluklar ortaya çıkaracağı gözlenmiştir ve Tablo 7.2'deki sonuçlar elde edilmiştir, tablo 7.2'de görüleceği gibi;

- DP 600 sacı için gerekli pres tonajları diğer malzemelere göre daha yüksektir, bunun sonucu olarak kullanılacak pres tonajı seçilirken simülasyon verilerini kullanmak gerekmektedir.
- DP 600 sacında kalıp yüzeylerinde oluşan basınç değerleri daha yüksektir, kullanılan kalıp malzemesi, kaplama çeşidi, yüzey pürüzlülük değerleri ve ısıl işlem sonucu elde edilen yüzey sertliği gibi parametreler daha fazla önem kazanmaktadır.
- En yüksek geri yaylanma değerleri DP 600 sacında gözlenmiştir, sözkonusu geri yaylanma değerlerini minimuma indirmek için form radyüslerinin küçültülmesi, fazladan bükme, ön germe işlemi gibi çözümlere başvurulabilir.

8.SONUÇLAR

21. yüzyılda teknolojik değişimin hızlanması ile tüm dünyada bir anlayış değişikliği gerçekleşmektedir. Teknoloji ve bilgiye dayalı avantaj üstünlükleri rekabeti şekillendirmekte; yeni sektörler ortaya çıkarken mevcut olanlar derin bir yenilenme sürecinden geçmekte; sanayiye yaklaşım değişmekte; yoğunlaşan rekabet çok daha aktif politikaları icap ettirmektedir. Bu değişim altında şekillenen yeni sanayileşme anlayışı, küresel rekabette ayakta kalabilmek için esnekliği, hızlı yanıt verebilme yeteneğini ve yeni teknolojileri kullanabilme becerisini gerektirmektedir. Değişen koşulları altında, sanayileşmede vurgu, nicelikten niteliğe kaymakta; beceri geliştirme, kapasite oluşturmaktan, daha önemli hale gelmektedir.

Ülkemiz otomotiv sektörü, ürün ve beceri geliştirme konusunda vakit kaybetmeden gerekli atılımları gerçekleştirmek zorundadır. Gündelik üretim hedeflerini tutturma çabası içerisinde bulunan ve uzun vadeli stratejilerin geliştirilmesine zaman ayırmayan sektör mevcut durumunu daha fazla koruyamama riski ile karşı karşıyadır.

Otomotiv sektörünün faaliyetlerinin büyük oranda üretim ile sınırlı kalması, dünyadaki rekabet şartlarına bağlı olarak orta vadede Türkiye'deki üretim faaliyetlerinin ülke dışına gitmesine yol açabilecektir. Buna karşın, ürün ve beceri geliştirmenin ülkemizde yapılmaya başlanmasının katma değeri artırmanın ötesinde bir başka önemli getirisi de, üretimin gelecekte de ülkemizde devamının bir garantisi olabilmesidir.

Uluslar arası antlaşmalar ile belirlenen ve araç üreticilerinin uyması gereken düşük egzost gazı emisyonları standartları için araç gövdesinde kullanılan sac malzemelerin kalitelerinin artırılması artık kaçınılmazdır. Düşük gaz emisyonları standartlarını yakalamak için bir yol olan ağırlık azaltılması için daha kaliteli sac malzemeleri kullanılmalıdır. Daha hafif ancak çok yüksek mukavemetli malzeme kullanımı ile istenen araç tasarımı standartlarını yakalamak mümkün olabilir. Kullanılan sac mukavemetlerinin artması ile aşağıda belirtilen konular üzerinde detaylı çalışmalar yapılması gerekmektedir :

- Simülasyon yeterliliği ve simülasyon sonuç analizi,
- Proses tasarım metodolojisi,
- Kalıp malzeme seçimi ve yüzey işlemleri,
- Sac malzemenin geri yaylanma davranışı,
- Kalıp tasarım metodolojisi,

Ülkemiz otomotiv ana ve yan sanayilerinde Geliştirilmiş Yüksek Mukavemetli Çeliklere yönelik proses ve kalıp tasarımı konularında kayda değer bir çalışma ve uygulama bulunmamaktadır, fakat yakın gelecekte belirtilen yüksek mukavemetli sacların kullanımının giderek artması sonucu bu malzemeler için kısa sürede, kaliteli ve uygun maliyetli kalıplar üretebilmek pazarda tercih nedeni olacaktır.

9. KAYNAKLAR

- Carlson, B., **Choice of Tool Materials for Punching and Forming of Extra- and Ultra High Strength Steel Sheets**, 3rd SSAB International Conference
- Dutton, R., Edwards, R., **Springback Prediction and Compensation for a High Strength Steel Side Impact Beam**, 6th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3d Sheet Metal Forming Process
- Federici, C., Maggi, S., Rigoni, S., “**The Use of Advanced High Strength Steel Sheets in the Automotive Industry**”, 1st International Conference Super-High Strength Steels, 2-4 Kasım, 2005, Roma
- Fekete, J., Stibich, A., Shi, M., **A Comparison of the Response of HSLA and Dual Phase Sheet Steel in Dynamic Crash** Society of Automotive Engineers (SAE), 2001-01-3101
- Kaya, N., Uysal, G., Öztürk, F., **Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Çeliklerin Enerji Absorbsiyonu Açısından Karşılaştırılması** 3.Otomotiv Teknolojileri Kongresi - 2006
- Nonaka, T., **Development of Ultra-High-Strength Cold-Rolled Steel Sheets for Automotive Use**, NIPPON STEEL TECHNICAL REPORT No. 88
- Schaeffler, D., **Introduction to Advanced High Strength Steels**, <http://www.thefabricator.com/MetalsMaterials>
- Severson, E., Krause, B., **Stamping tools for ultra high strength steel** <http://www.thefabricator.com>
- Shaw, J., Watanabe, K., Chen, M., **Metal Forming Characterization and Simulation of Advanced High Strength Steels** Society of Automotive Engineers (SAE), 2001-01-1139
- Wallentowitz, H., Leyers, J., Parr, T., “**Materials for Future Automotive Body Structures**”, Global Automotive Manufacturing And Technology, 2003
- Autoform 3.2 User Manual, 2002
- **Advanced High Strength Steel Application Guidelines**, International Iron and Steel Institute-Committee on Automotive Applications, January 2005
- **Schuler Metal Forming Hand Book**, Springer-Verlag Heidelberg, 1998
- **ULSAB-AVC Engineering Report**, October 2001

<http://www.worldautosteel.org/ulsab-avc/>

10.ÖZGEÇMİŞ

Gökalp UYSAL, 1982 yılında Bursa'da doğdu. 1999-2003 yılları arasında Uludağ Ünivesitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde öğrenimini tamamladı.. Nisan 2003 – Temmuz 2004 tarihleri arasında IBM İş Ortağı, Grup Otomasyon firmasında CATIA Uygulama Mühendisi olarak çalıştı, Temmuz 2004- Ekim 2006 tarihleri arasında Coşkunöz Metal Form ve Makina Endüstri A.Ş.'de Proses Tasarım ve Simülasyon Mühendisi olarak çalıştı, Ekim 2006'dan günümüze Coşkunöz Ar-Ge San. ve Tic. A.Ş'de Ar-Ge mühendisi olarak çalışmaktadır

11.TEŞEKKÜR

- Bu konuda bana çalışma fırsatı veren ve her türlü desteği sağlayan danışman hocam Prof.Dr. Ferruh ÖZTÜRK'e
- Lisans ve Yüksek Lisans Öğrenim hayatımda her zaman desteklerini yanımda hissettiğim hocalarım Yrd.Doç.Dr. Necmettin KAYA ve Dr. Ali Rıza YILDIZ'a
- Uzun yıllardır bu konuyla ilgili çalışmalar gerçekleştiren ve her zaman bilgi paylaşımında bulunan çalışma arkadaşım Ecevit OKTEM'e

Teşekkürü bir borç bilirim...