

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**PLASTİK ŞEKİL VERME PROSELERİNDE FORM
VE ŞEKİLLENDİRME HATALARININ TELAFİ
EDİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

Emre ESENER

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : MAKİNE TASARIM VE İMALAT
Tez Danışmanı : Doç. Dr. Mehmet FIRAT

Nisan 2015

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PLASTİK ŞEKİL VERME PROSESLERİNDE FORM
VE ŞEKİLLENDİRME HATALARININ TELAFİ
EDİLMESİ


DOKTORA TEZİ

Emre ESENER


Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

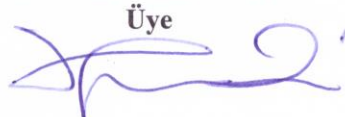
Bu tez 10/04/2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.


Prof. Dr.
Fehmi ERZİNCANLI
Jüri Başkanı


Prof. Dr.
Necmettin KAYA
Üye


Doç. Dr.
Mehmet FIRAT
Üye

Yrd. Doç. Dr.
Ufuk KULA
Üye


Yrd. Doç. Dr.
Osman Hamdi METE
Üye


TEŞEKKÜR

Doktora çalışmalarım süresince, danışman hocam Doç. Dr. Mehmet FIRAT engin bilgilerini hiçbir zaman benden esirgememiştir. Tez çalışmalarım dışında nasıl bir akademisyen olunması gerektiği ile ilgili benim için bir rol model olmuştur. Doktora çalışmalarım süresince yalnızca bilimsel yönden değil; toplum, felsefe ve tarih üzerine de engin bilgilere sahip olduğunu göstermiştir. Hem verdiği bilgilerden ve desteklerden dolayı, hem de tez çalışmam süresince sabırla beni motive etmesinden dolayı kendisine teşekkürü bir borç bilirim.

Yrd. Doç. Dr. Ufuk KULA ve Yrd. Doç. Dr. Osman Hamdi METE'nin tez çalışmam süresince göstermiş oldukları destek ve ilgiden dolayı kendilerine teşekkür ederim. Prof. Dr. Fehmi ERZİNCANLI ve Prof. Dr. Necmettin KAYA'ya tez çalışmasına yaptıkları katkılardan dolayı teşekkürü bir borç bilirim. Tez çalışması kapsamında yapılan endüstriyel uygulamalardaki desteklerinden dolayı Coşkunöz Metalform çalışanlarından, başta M. Mustafa YENİCE olmak üzere, Mesut KAYA ve Adem KARŞI'ya teşekkür ederim. Doktora çalışmalarım süresince bana her zaman destek olan Ege Vitrifiye çalışanlarından Süphan ERCAN'a teşekkür ederim. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Makine ve İmalat Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerinden Doç. Dr. Hasan YAMIK'a, tez çalışmam süresince verdiği moral desteğinden dolayı teşekkür ederim.

Doktora çalışmalarım süresince tükenmez sabrı ile bana destek olan değerli eşim İdil IŞIKLI ESENER'e ve hayatım boyunca maddi ve manevi destekleri esirgemeyen ve her zaman yanımda duran aileme teşekkürlerimi bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
TABLOLAR LİSTESİ.....	xiv
ÖZET.....	xv
SUMMARY.....	xvi

BÖLÜM 1.

GİRİŞ.....	1
1.1. Tez Çalışmasının Amacı.....	4
1.2. Tez Çalışmasının Ana Hatları	5

BÖLÜM 2.

TASARIM AŞAMASINDA GERİ ESNEME TAHMİNİ	8
2.1. Sac Metal Formlama İşlemlerinde Şekil Bozukluğu Kavramı	8
2.2. Sonlu Elemanlar Analizleri.....	11
2.2.1. Açık zamana bağlı ve kapalı adımlı sonlu elemanlar yöntemleri.....	13
2.2.2. Ağ yapısının oluşturulması.....	14
2.2.3. Sonlu elemanlar hesaplama parametreleri.....	16
2.2.4. Sınır koşulları	18
2.3. Plastisite Teorisi ve Modellenmesi.....	21
2.3.1. Akma fonksiyonları.....	21
2.3.2. Pekleşme kuralları	24
2.3.3. Akma kuralı.....	26
2.3.4. İzotrop pekleşme kabulü yapan plastisite modelleri	26
2.3.5. Anizotropi kavramı	29
2.3.6. Anizotropik malzeme ve izotrop pekleşme kabulü yapan plastisite modelleri.....	31

2.3.7. Kinematik pekleşme kabulü yapan plastisite modelleri.....	35
2.3.8. Plastisite model parametrelerinin belirlenmesi	38
2.4. Değerlendirme.....	40
BÖLÜM 3.	
FORM KALIPLARININ TASARIMINDA GERİ ESNEME TELAFİSİ	42
3.1. Proses Parametrelerinin Geri Esneme Davranışı Üzerine Etkisi	42
3.2. Kalıp Yüzeylerinin Geri Esneme Dağılımına Göre Geliştirilmesi.....	44
3.2.1. İleri esnetme yöntemi	44
3.2.2. Deplasman ayar yöntemi.....	48
3.2.3. Literatürdeki yöntemlerin karşılaştırılması	56
3.3. Değerlendirme.....	61
BÖLÜM 4.	
KARMAŞIK FORMLAMA YÜZEYLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI	63
4.1. Sac Metal Formlama İşlemlerinde Karmaşık Yüzeyler	63
4.2. Karmaşık Yüzeylerin Bilgisayar Ortamına Aktarılması	65
4.3. Karmaşık Yüzeylerin Konumlandırılması	69
4.4. Yüzey Uyumluluk Kavramı ve Değerlendirilmesi	73
4.5. Değerlendirme.....	75
BÖLÜM 5.	
TELAFİLİ KALIP YÜZEY TASARIMI YÖNTEMİ.....	76
5.1. Tasarım Prosedürü	76
5.2. Hassasiyet Analizi.....	80
5.3. Üç Boyutlu Telafi Faktörü Dağılımı ile Geri Esneme Telafisi.....	85
5.4. Tez Çalışması Kapsamında Geliştirilen Arayüz.....	89
BÖLÜM 6.	
UYGULAMA ÖRNEKLERİ.....	94
6.1. Literatür Uygulaması: Açılı Kanal Çekme İşlemi.....	94
6.1.1. Açılı kanal çekme işlemi sonlu elemanlar modellemesi	96
6.1.1.1. Ağ yapısının oluşturulması ve ağ hassasiyetinin incelenmesi.	96
6.1.1.2. Malzeme davranışının modellenmesi	98
6.1.1.3. Parametre hassasiyet analizi.....	100

6.1.2. Açılı kanal çekme işlemi için telafili kalıp yüzeylerinin geliştirilmesi	102
6.1.2.1. Proses parametrelerinin SE geri esneme davranışına etkisi ...	103
6.1.2.2. Telafili kalıp yüzeylerinin geliştirilmesi	104
6.1.3. Sonuçların değerlendirilmesi ve literatürle karşılaştırılması	108
6.2. Endüstriyel Uygulama: DP600 Tavan Destek Sacı Form Kalıp Tasarımı	112
6.2.1. Form kalıp yüzeyi tasarımı.....	113
6.2.2. Formlama işlemi ve formlanmış parça geometrisinin bilgisayar ortamına aktarılması.....	117
6.2.3. Formlama işleminin sonlu elemanlar modellemesi.....	118
6.2.3.1. Ağ yapısının oluşturulması	118
6.2.3.2. Malzeme plastisite modellemesi	119
6.2.3.3. İlk simülasyon sonuçları	128
6.2.3.4. Parametre hassasiyet analizi.....	131
6.2.4. Geri esneme telafili form kalıp yüzeylerinin geliştirilmesi.....	132
6.2.4.1. Proses parametrelerinin SE geri esneme davranışına etkisi	132
6.2.4.2. Telafili kalıp yüzeylerinin geliştirilmesi	134
6.2.5. Adımlı telafi sonuçlarının değerlendirilmesi.....	141

BÖLÜM 7.

DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER	144
7.1. Değerlendirme.....	144
7.2. Gelecekte Yapılacak Çalışmalar İçin Öneriler	149
KAYNAKLAR	151
EKLER.....	165
ÖZGEÇMİŞ.....	200

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

σ_y	: Akma gerilmesi
BT	: Belytchko-Tsay kabuk eleman
CAD	: Bilgisayar destekli tasarım
CAM	: Bilgisayar destekli üretim
CNC	: Bilgisayar kontrollü talaşlı imalat cihazı
v	: Çene / Çekme hızı
DA	: Deplasman Ayar
Δr	: Düzlemsel anizotropi
E	: Elastisite modülü
σ_e	: Etkin gerilme
FI	: Full Integrated kabuk eleman
AHSS	: Gelişmiş yüksek mukavemetli çelik
S	: Geri esneme geometrisi
Δz	: Geri esneme miktarı
σ	: Gerilme
ε	: Gerinim
$\dot{\varepsilon}$: Gerinim oranı
F, G, H	: Hill parametreleri
σ_b	: İki eksenli akma gerilmesi
İE	: İleri esnetme
D	: İstenilen parça geometrisi
$\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$: Kartezyen koordinat sisteminde yönlere göre telafi faktörleri
CMM	: Koordinat ölçüm cihazı
F	: Kuvvet
r_0, r_{45}, r_{90}	: Lankford parametreleri
c	: Malzemedeki ses hızı

ρ_0	: Malzeme yoğunluğu
K	: Mukavemet katsayısı
r_n	: Normal anizotropi
ΔZ_{mean}	: Ortalama geri esneme miktarı
OKH	: Ortalama karesel hata
α_m	: Ortalama telafi faktörü
$\dot{\alpha}$: Öteleme gerilmesi
n	: Pekleşme üsteli
ϵ_p	: Plastik gerinim
ν	: Poisson oranı
t	: Sac kalınlığı
ζ	: Satürasyon oranı
C	: Telafi geometrisi
α	: Telafi faktörü
HSS	: Yüksek mukavemetli çelik
Δt	: Zaman adım büyüklüğü

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Otomotiv sektöründe kullanılan çelik malzemeler için uzama-çekme dayanımı grafiği	2
Şekil 1.2. Araç gövdesinde kullanılan malzeme dağılımı.....	2
Şekil 1.3. Japonya ve Avrupa Birliği ülkelerinde AHSS çelik kullanım oranları karşılaştırması.....	2
Şekil 1.4. 2007 yılı için DP çeliklerin kendi içerisindeki üretim oranları.....	3
Şekil 2.1. (a) Şekillendirme (b) Şekillendirme sonrası geri esneme (c) Geri esneme sonrası yeni iç gerilme dağılımı durumları	9
Şekil 2.2. Örnek bir sonlu elemanlar modeli.....	14
Şekil 2.3. BT kabuk elemanı düğüm noktaları ve eleman koordinat sistemi.....	17
Şekil 2.4. BT kabuk elemanı için beş katmanda sadeleştirilmiş (a) ve yedi katmanda tam çözüm (b) için hesaplama noktaları	18
Şekil 2.5. Sınır koşulları.....	20
Şekil 2.6. Şekillendirme ve geri esneme adımlarının sonlu elemanlar ile elde edilmesinde izlenen iş akış şeması.....	20
Şekil 2.7. İzotrop pekleşme durumu şematik gösterimi	24
Şekil 2.8. Kinematik pekleşme durumu şematik gösterimi.....	24
Şekil 2.9. (a) Bauschinger etkisi (b) Sac metal formlama proseslerinde eğme sırasında gerilme durumu	25
Şekil 2.10. Asal gerilme uzayında von Mises akma yüzeyi.....	28
Şekil 2.11. σ_1 - σ_2 asal gerilme düzleminde Tresca ve von Mises akma yüzeyleri...	29
Şekil 2.12. r_0 ve r_{90} parametrelerinin akma yüzeyine etkisi	33
Şekil 2.13. r_u ve σ_u parametrelerinin akma yüzeyine etkisi	33
Şekil 2.14. r_0 ve r_{90} parametrelerinin Barlat-89 akma yüzeyine etkisi.....	34
Şekil 2.15. İki yüzeyli modelin şematik gösterimi.....	36
Şekil 2.16. Sınır yüzeyi	37

Şekil 2.17. Yoshida nonlinear kinematik pekleşme modeli ile malzeme davranışının tahmini.....	38
Şekil 2.18. Çekme deneyinden elde edilen bir akma eğrisi	39
Şekil 3.1. Bir panel çekme prosesi için sürtünme katsayısının formlama sonrası geri esneme üzerine etkisi.....	43
Şekil 3.2. İleri esnetme yöntemi iş akış şeması.....	45
Şekil 3.3. İleri esnetme yönteminin şematik gösterimi (a) Gerilme tensörünün ters yönde uygulanması (b) Elde edilen telafili kalıp takımı geometrisi	46
Şekil 3.4. İleri esnetme yönteminde alfa seçimi için interpolasyon.....	47
Şekil 3.5. DA yönteminin şematik gösterimi	48
Şekil 3.6. Deplasman ayar yöntemi iş akış şeması.....	49
Şekil 3.7. Telafi faktörünün dağılım şeklinde kullanılması.	51
Şekil 3.8. Eğme prosesi	52
Şekil 3.9. IS ve DP600 çelikleri için telafi faktörünün çekme kuvvetine göre değişimi	52
Şekil 3.10. Telafi faktörü ile eğme yarıçapının değişimi	52
Şekil 3.11. (a) Tek adımlı ve (b) İteratif telafiler sonrası geri esneme yüzeyleri ...	53
Şekil 3.12. Telafi faktörünün parça üzerindeki dağılımı.....	54
Şekil 3.13. (a) Başlangıç FEA sonrası (b) İlk iterasyon sonrası (c) 5. iterasyon sonrası yüzey uyumluluk analizleri	54
Şekil 3.14. Telafi faktörü dağılımı	55
Şekil 3.15. (a) İteratif (b) Tek adımlı telafi sonrası yüzey karşılaştırmaları	55
Şekil 3.16. Formlama prosesi şematiği	57
Şekil 3.17. (a) Telafili kalıp yüzeyleri (b) Kullanılan yöntemlerin telafi performansı	58
Şekil 3.18. (a) U-kanal çekme prosesi için kullanılan kalıp geometrileri (b) Her iki yöntem için iterasyonlara göre hata oranları.....	59
Şekil 3.19. (a) Simetrik olmayan çekme prosesi geometrisi (b) Yöntemlerin telafi performansları	60
Şekil 3.20. Simetrik olmayan çekme prosesi geometrisi ve yöntemlerin telafi performansları	60
Şekil 4.1. Karmaşık yüzeyli bir sac metal malzeme ve formlama kalıpları.....	64
Şekil 4.2. CMM ve tasarıma ait parça koordinat sistemlerinin şematik gösterimi ..	65

Şekil 4.3. Temaslı ölçümlerde karşılaştırma prosesinin şematik gösterimi	66
Şekil 4.4. Lazer tarama sistemi	66
Şekil 4.5. Optik tarama sistemi	67
Şekil 4.6. Stl formatında örnek bir yüzey	67
Şekil 4.7. Metin düzenleyicisinde açılmış bir ASCII-stl dosyası.....	68
Şekil 4.8. Referans bir yüzeyden kontrol noktaları kullanılarak oluşturulan bir parametrik yüzey	70
Şekil 4.9. Geri esnemenin karşılaştırıldığı kontrol noktaları	70
Şekil 4.10. Karşılaştırma sonuçları	71
Şekil 4.11. Karmaşık geometrili çekme prosesi ve çalıştırma (P1-P4) ve geri esneme ölçüm (A1-E2) noktaları	71
Şekil 4.12. Parça üzerindeki kontrol noktaları ve formlama kalıpları	71
Şekil 4.13. Parça tarama ve sonlu elemanlar analizi sonuçları ile karşılaştırma işlemleri	72
Şekil 4.14. Endüstriyel bant şematik gösterimi.....	73
Şekil 4.15. Yüzey uyumluluk analizi şematik gösterimi.....	74
Şekil 4.16. Örnek bir yüzey uyumluluk analizi.....	75
Şekil 5.1. Tez çalışması kapsamında sunulan tasarım prosedürü iş akış şeması ...	79
Şekil 5.2. Deneysel tasarım süreci iş akış şeması	83
Şekil 5.3. 3-boyutlu yanıt yüzeyi üzerinden karar verme mekanizması	85
Şekil 5.4. DA yönteminin şematik gösterimi	85
Şekil 5.5. DA yöntemi ile telafi sonucu kalıp yüzeylerinde meydana gelen bozulmalar.....	88
Şekil 5.6. Telafi faktörünün üç boyutlu dağılım şeklinde kullanılması	89
Şekil 5.7. FFST çalışma prensibi	91
Şekil 5.8. FFST ara yüzü konumlandırma örneği	91
Şekil 5.9. FFST ara yüzü.....	93
Şekil 6.1. Çalışma kapsamında kullanılan kalıp takımı	94
Şekil 6.2. Kanal çekme prosesi deneysel maksimum geri esneme miktarı.....	95
Şekil 6.3. Sac açınımına ait (a) 3x3 mm ağ yapısı (b) 1x1 mm ağ yapısı.....	97
Şekil 6.4. Ağ yapılarına göre sonlu elemanlar analizi sonucu elde edilen geri esneme yüzeylerinin karşılaştırılması	97
Şekil 6.5. Açılı kanal çekme prosesi kalıp takımı ağ yapısı.....	98

Şekil 6.6. Farklı malzeme modelleri ile elde edilen geri esneme sonuçları	99
Şekil 6.7. Kanal çekme prosesi sonlu elemanlar analizi sonrası % incelleme dağılımı....	101
Şekil 6.8. Kanal çekme prosesi için sonlu elemanlar parametrelerinin maksimum geri esneme miktarına etki ağırlıkları.....	102
Şekil 6.9. Proses parametrelerinin geri esneme üzerindeki etki ağırlıkları.....	104
Şekil 6.10. FFST arayüzü ile geri esneme fark matrisinin hesaplanması	106
Şekil 6.11. Farklı telafi faktörlerine göre elde edilen kalıp yüzeyleri.....	106
Şekil 6.12. Farklı telafi faktörleri ile elde edilen kalıplardan çıkan geri esneme geometrileri.....	106
Şekil 6.13. Referans ve telafili kalıp yüzeyleri ($\alpha = -1$).....	107
Şekil 6.14. Referans ve telafili kalıplardan elde edilen parça geometrileri.....	108
Şekil 6.15. Hedef parça geometrisi ve telafili kalıptan ($\alpha = -1$) elde edilen geri esneme geometrilerinin yüzey uyumluluk analizi	108
Şekil 6.16. İleri esnetme yöntemi ile elde edilen telafi sonuçları	110
Şekil 6.17. Açılı kanal çekme işlemi için telafi yöntemlerinin karşılaştırılması .	110
Şekil 6.18. Açılı kanal çekme işlemi için tez çalışmasında önerilen tasarım yönteminin uygulama adımları	111
Şekil 6.19. Tavan destek sacı ve araç üzerindeki konumu.....	112
Şekil 6.20. DP600 malzemesine ait içyapı görüntüsü.....	113
Şekil 6.21. Orijinal parça geometrisi.....	114
Şekil 6.22. Parça geometrisinden elde edilen kalıp yüzeyi ve sac açılımı	114
Şekil 6.23. Tasarlanan kalıp takım yüzeyleri	114
Şekil 6.24. Tavan destek sacı form kalıpları tasarım ve imalatı	115
Şekil 6.25. Tavan destek sacı referans form kalıp yüzeylerinin tasarım ve imalat süreci	116
Şekil 6.26. Formlanmış tavan destek sacı parçası.....	117
Şekil 6.27. Formlanmış parça geometrilerinin bilgisayar ortamına aktarılması ..	117
Şekil 6.28. Tavan destek sacı formlama prosesi sonlu elemanlar ağ yapısı.....	118
Şekil 6.29. Sac açılımı ağ yapısı	118
Şekil 6.30. Eğri uydurma ile elastisi modülü tespiti	120
Şekil 6.31. Gerilme-gerinim grafiğindeki düzgünlük durumu	121
Şekil 6.32. Çekme gerilmesi tespiti için oturtulan eğri.....	121

Şekil 6.33. DP600 malzemesi için farklı numunelerle yapılan çekme deneylerine ait gerçek gerilme-gerçek gerinim eğrileri	122
Şekil 6.34. DP600 malzemesi akma eğrisi	123
Şekil 6.35. Lineerleştirme yöntemi ile K ve n değerlerinin hesaplanması.....	124
Şekil 6.36. Farklı yöntemlerle elde edilen K-n eğrilerinin karşılaştırılması	124
Şekil 6.37. DP600 malzemesi Hill akma yüzeyi	124
Şekil 6.38. Çekme ve basma durumlarında elastisite modüllerinin tespiti	125
Şekil 6.39. Eksen transformasyonunun şematik gösterimi	127
Şekil 6.40. Yükleme boşaltma deneyi sonrasında DP600 malzemesi için gerilme-gerinim grafiği	128
Şekil 6.41. DP600 malzemesi için elastisite modülünün değişim grafiği	128
Şekil 6.42. Farklı malzeme modellerinden elde edilen sonlu elemanlar sonuçlarının karşılaştırılması	129
Şekil 6.43. Konumlandırma işlemine göre yüzey uyumluluk analizi sonuçları ..	130
Şekil 6.44. Referans sonlu elemanlar analizi sonrasında elde edilen şekillendirme ve geri esneme yüzeyleri	131
Şekil 6.45. Hassasiyet analizi sonrası yüzey uyumluluk analizi	132
Şekil 6.46. Deneysel tasarım yöntemi sonrası parametrelerin geri esneme ve incelme üzerindeki etkileri.....	132
Şekil 6.47. Tavan destek sacı sonlu elemanlar analizi sonucu maksimum geri esneme	133
Şekil 6.48. Proses parametrelerinin geri esneme ve incelme üzerine etki ağırlıkları	134
Şekil 6.49. Referans sonlu elemanlar analizi sonucunda formlama ve geri esneme geometrilerinin yüzey uyumluluk analizi	135
Şekil 6.50. Ortalama telafi faktörüne göre elde edilen telafili kalıp geometrisi ..	135
Şekil 6.51. Telafi faktörü (-1) iken elde edilen yüzey uyumluluk analizi sonuçları	136
Şekil 6.52. İterasyonlar sonrasında elde edilen kalıp yüzeyleri ($\alpha = -1$).....	136
Şekil 6.53. Telafi faktörünün dağılım olarak kullanıldığı telafiler sonrasında yüzey uyumluluk analizi sonuçları	137
Şekil 6.54. İterasyonlar sonrasında elde edilen kalıp yüzeyleri (α dağılımı)	138
Şekil 6.55. İterasyonlar sonucu telafili kalıp yüzeyleri.....	139

Şekil 6.56. Telafi faktörünün üç boyutlu dağılım şeklinde kullanılması ile 5 iterasyon sonrası elde edilen sonuçların yüzey uyumluluk analizleri.....	140
Şekil 6.57. İterasyonlar sonrasında elde edilen kalıp yüzeyleri	141
Şekil 6.58. Tavan destek sacı için telafi sonuçlarının karşılaştırılması.....	143
Şekil 7.1. Geri esneme sebebiyle form kalıplarında yapılan ilave işlem sayıları..	149

TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1. FeAl alaşımı mekanik özellikleri.....	57
Tablo 6.1. Alüminyum 2008-T4 alaşımı mekanik özellikleri.....	95
Tablo 6.2. Alüminyum 2008-T4 malzemesi için malzeme modellerinde kullanılan parametreler	99
Tablo 6.3. Deneysel tasarım için belirlenen parametreler ve değerleri.....	100
Tablo 6.4. Parametre çiftlerine göre maksimum geri esneme miktarları	102
Tablo 6.5. Deneysel tasarım prosesi için belirlenen proses parametreleri ve inceleme aralıkları	103
Tablo 6.6. Deplasman ayar yönteminde kullanılan yöntemler	105
Tablo 6.7. DP600 malzemesi kimyasal kompozisyonu	120
Tablo 6.8. DP600 için çekme deneyinden elde edilen mekanik özellikler	125
Tablo 6.9. DP600 malzemesine ait elastisite modülü verileri.....	128
Tablo 6.10. DP600 Malzeme Model Parametreleri	129
Tablo 6.11. Tavan destek sacı proses parametreleri	129
Tablo 6.12. Tavan destek sacı formlama prosesi deneysel tasarım için belirlenen proses parametreleri	133

ÖZET

Anahtar kelimeler: Geri Esneme Telafisi, Sac Metal Formlama, Sonlu Elemanlar Analizi, Form Yüzey Tasarımı

Tez çalışması kapsamında, sac metal formlama işlemlerinde geri esneme telafili form kalıp yüzeylerinin geliştirilmesi için bir tasarım yöntemi önerilmiştir. Önerilen tasarım yöntemi, formlanan parçanın geri esneme sonrası şekil bozukluğunun sonlu elemanlar yöntemiyle tahmin edilmesine dayalı olup, kalıp yüzeylerinin bu bozulmayı azaltacak şekilde değiştirilmesinden oluşmaktadır. Tez çalışması kapsamında getirilen temel yenilik; sac metal formlama işlemlerinde şekil bozukluklarının, form kalıp yüzeylerinde hata oluşmaksızın üç boyutlu olarak telafi edilmesidir.

Önerilen yöntemde ilk olarak, malzeme davranışının tanımlanmasında plastisite modellerinin etkisi ele alınarak, izotrop ve kinematik pekleşme kabulü yapan kriterler çalışılmıştır. Bu kriterlerin, sonlu elemanlar geri esneme modellemesine etkileri incelenerek, hassas tahmin sonuçlarının elde edildiği modeller belirlenmiştir. Sonrasında, sonlu elemanlar modellemesinde hesaplama parametrelerinin sonuçlara etkisi deneysel tasarım yöntemi ile incelenmiştir. Önerilen yönteminin ikinci adımında, sac metal formlama işlemlerinde, formlama sonrası parçada oluşan şekil bozukluklarının telafi edilerek, formlanan parçaların istenilen tolerans boyutlarında elde edilmesi ele alınmıştır. Telafi işlemi, form kalıp yüzeylerinin malzemedeki şekil bozuklukları dikkate alınarak geliştirilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, şekil bozukluğunu üç boyutlu telafi edebilen bir yöntem önerilmiştir.

Son olarak, önerilen tasarım yöntemi, literatürde geri esneme çalışmalarında sıklıkla kullanılan bir açılı kanal çekme işleminde ve endüstriyel uygulama olarak BMW binek aracında kullanılan, tavan destek sacı formlama işleminde uygulanmıştır. Önerilen yöntemin, her iki kalıp takımı için de şekil bozukluklarını başarılı bir şekilde önlediği ve literatürde yer alan yöntemlere göre daha hassas sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

COMPANSATION OF STAMPING FORMABILITY AND SHAPE DISTORTIONS DURING DESIGN STAGE

SUMMARY

Keywords: Springback Compensation, Sheet Metal Stamping, Finite Element Analysis, Form Surface Design

In this PhD thesis, a design methodology is proposed to compensate shape distortions in sheet metal stamping processes. The proposed design methodology depends on regenerating die surfaces by means of part shape distortion obtained by finite element modelling. The originality of this study is 3-D compensation of part shape distortions without any defects on die surfaces.

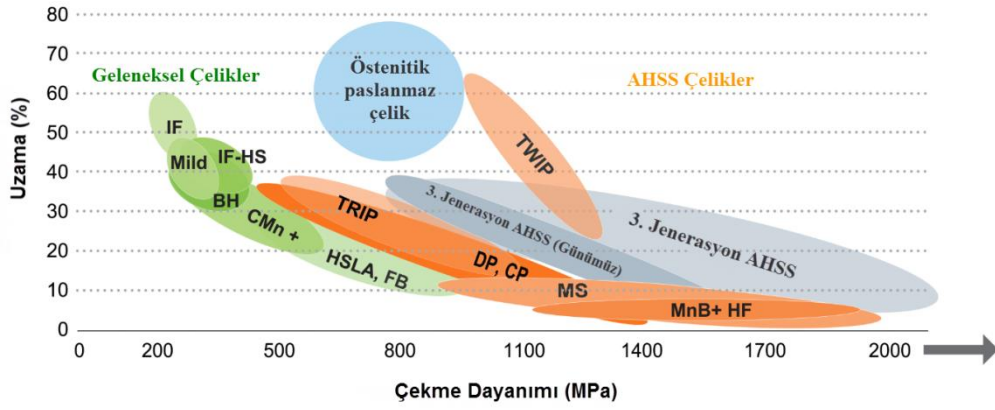
Firstly, plasticity modelling of sheet metal is studied to determine the material behavior. For this purpose, isotropic and kinematic hardening plasticity models are investigated using finite element analysis to understand their effectiveness on springback prediction using design of experiments. In the second stage of the proposed methodology, compensation of shape distortions after sheet metal stamping is considered. Compensation process is applied with regenerating stamping die surfaces by consist of springback. For this purpose, a 3-D springback compensation methodology is presented.

Finally, the proposed methodology is applied on a channel forming process as a literature example and BMW roof stiffener stamping process is studied as an industrial application. As a result, it is seen that the proposed method can compensate both die surfaces effectively and achieves more accurate results compare to other methods in the literature.

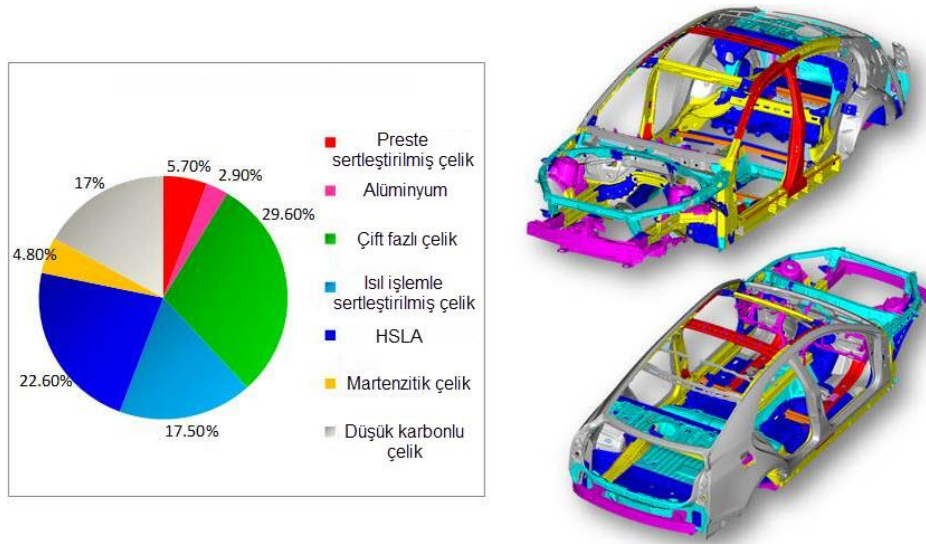
BÖLÜM 1. GİRİŞ

Günümüz otomotiv sektöründe, ağırlık/dayanım avantajlarından dolayı yüzlerce sac metal parça kullanıldığından, sac metal formlama işlemleri vazgeçilmez bir konumdadır. Sac metal formlama işlemlerinde, üretilecek parça geometrilerine ait form kalıp yüzeylerinin tasarımı oldukça büyük önem taşımaktadır. Ayrıca formlanan parçalar, üretim için belirlenen boyut toleranslarını yakalayabilmelidir. Otomotiv sektöründe, yaklaşık her iki senede bir yeni model aracın geliştirildiği düşünüldüğünde [1–2], araçlarda kullanılan sac metal parçaların formlanması için gereken kalıp takımlarının tasarımının ve imalatının önemi ortaya çıkmaktadır.

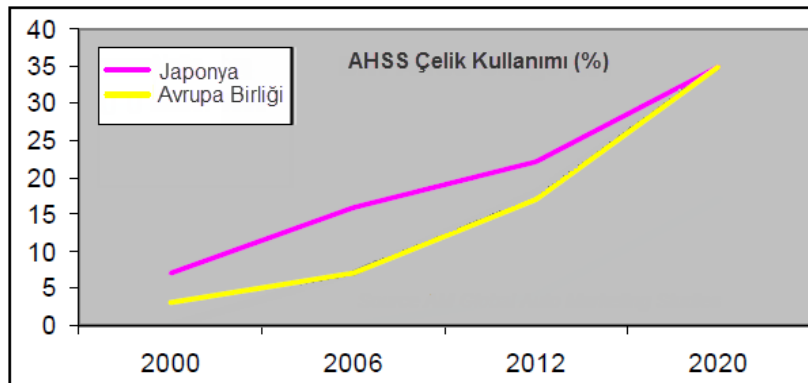
Otomotiv sektöründe, güvenlik önlemleri ve yasal zorunluluklardan dolayı, araç ağırlıkları 1984 yılı sonrasında artış göstermiştir [3]. Araçlardaki bu ağırlık artışı, yakıt sarfiyatını ciddi oranlarda arttırmış ve bu probleme bir çözüm arayışı içerisine girilerek, birçok yeni malzeme tasarımı gerçekleştirilmiştir [4–8]. Yeni malzemelerin tasarımı sürecinde, Yüksek Mukavemetli Çelikler (HSS: High Strength Steel) ve sonrasında da günümüzde efektif bir şekilde kullanılan Gelişmiş Yüksek Mukavemetli Çelikler (AHSS: Advanced High Strength Steel) otomotiv sektöründeki yerlerini almışlardır. Gelişmiş yüksek mukavemetli çelikler ağırlık/dayanım özelliklerinden dolayı otomotiv sektörü için vazgeçilmez bir malzeme grubu olmuştur [9–12]. Bu sayede bir çok sac parçada, düşük karbonlu çeliklerin yerini, gelişmiş yüksek mukavemetli malzemeler almış, böylelikle parçadan beklenen dayanım daha ince sac malzemelerle elde edilerek araçlarda hafifletme sağlanmıştır. Şekil 1.1’de otomotiv sektöründe kullanılan çeliklerin uzama-çekme dayanımı eğrisi üzerindeki konumları görülmektedir, Şekil 1.2’de ise otomobillerde kullanılan sac metal parçalara ait malzemelerin araç gövdesindeki dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Otomotiv sektöründe kullanılan çelik malzemeler için uzama-çekme dayanımı grafiği [8]



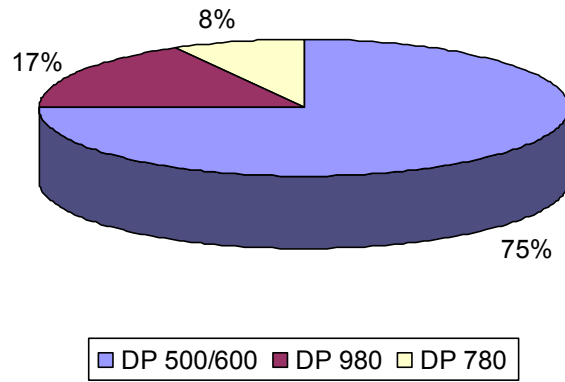
Şekil 1.2. Araç gövdesinde kullanılan malzeme dağılımı [13]



Şekil 1.3. Japonya ve Avrupa Birliği ülkelerinde AHSS çelik kullanım oranları karşılaştırması [14]

Günümüzde ortalama bir binek aracın ağırlığının %62'si çelik malzemelerden oluşmaktadır [3]. Çelik malzemeler içerisinde ise gelişmiş yüksek mukavemetli

çeliklerin kullanım oranı artışını sürdürmektedir. Japonya ve Avrupa Birliği'nde AHSS çelik kullanımının yıllara göre oranı Şekil 1.3'te verilmiştir. Yeni nesil gelişmiş yüksek mukavemetli çelik grubundan çift fazlı çelikler (DP) ve deformasyonla pekleşme gösteren (TRIP) çelik malzemeler otomotiv sektöründe sıklıkla tercih edilmektedirler. Özellikle DP çeliklerin otomotiv sektörü için önemi büyüktür. DP çelikler farklı kalitelerde bulunsa da en sık tercih edilen çift fazlı çelikler DP500/600 kalitesine sahip olan çeliklerdir. DP çeliklerin üretim oranları da bu durumu ispatlamaktadır. DP çeliklerin kendi içerisindeki üretim oranı dağılımı Şekil 1.4'te gösterilmiştir. Bu malzemeler, her ne kadar ağırlık/mukavemet yönünden avantajlı olsa da yeni nesil malzemeler olduklarından özellikle formlama davranışları açısından sahip olunan bilgi kısıtlıdır.



Şekil 1.4. 2007 yılı için DP çeliklerin kendi içerisindeki üretim oranları [14]

Otomotiv sektöründe kullanılan sac parçalar oldukça kompleks geometrilere sahip olduğundan bu parçalara ait form kalıp yüzeyleri de karmaşıktır. Bu durum, prosesin başarılı bir şekilde gerçekleştirilmesini de zorlaştırmakta ve proseste birçok problemle karşılaşılmasına neden olmaktadır. Bu problemler arasından formlama sonrasında meydana gelen geri esneme, parçada şekil bozukluğuna neden olduğundan, metot mühendisleri açısından en kritik olanıdır [15-19].

Otomotiv sektöründe formlama işlemlerinin karmaşıklığına sürekli güncellenen parça geometrileri de eklendiğinde, proses tasarımını gerçekleştiren metot mühendisliğinin önemi ortaya çıkmaktadır. Tasarım ve metot mühendislerinin, istenilen ölçü toleranslarına ve parça kalitesine sahip bir şekilde, ürünü formlama

hataları olmadan verebilecek bir kalıp takımını tasarımları ve üretmeleri gerekmektedir. Gerekli formlama kriterlerini, operasyon sayısını ve kalıp maliyetlerini azaltarak gerçekleştirmek kolay bir mühendislik prosesi değildir. Parçanın formlanabilme ve geri esneme analizleri, ayrıca formlama sonrası sac malzemede kalınlık ya da gerilme dağılımının tespit edilmesi, mühendislik analizleri açısından zaman kaybının önüne geçebilecek anahtar unsurlardır. Bu analizler, günümüzde sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilmektedir. Bilgisayar uygulamaları metot mühendislerine, malzeme özellikleri ve proses parametrelerinin etkisinin anlaşılmasına ve şekil bozukluğu hatalarının giderilmesi için sanal ortamda çalışabilme imkanı tanıyarak, hem zamandan hem de maliyetten önemli kazançlar sağlamaktadır. Metot mühendislerinin bilgisayar ortamında gerçekleştirecekleri analizlerin hassas sonuç verebilmesi için, hem malzeme ve proses özelliklerinin hem de analizde kullanılan hesaplama yöntemlerin iyi anlaşılması ve doğru bir şekilde planmış olması gerekmektedir [20–21].

Tez çalışmasında, yukarıda anlatılan bakış açısı ışığında, şekil bozukluğu hatalarını dikkate alarak sac metal form kalıp yüzeylerinin geliştirilmesi için bir tasarım yöntemi önerilmiştir. Önerilen tasarım yöntemi öncelikle bir literatür örneğine uygulanmış, ardından endüstriyel bir uygulama analiz edilmiştir. Sonuç olarak önerilen tasarım yöntemi ile her iki kalıp takımında da efektif sonuçlar elde edilmiş ve endüstride yaşanan zaman kayıplarının önüne geçen yöntemler önerilmiştir.

1.1. Tez Çalışmasının Amacı

Tez çalışmasının temel amacı, sac metal formlama işlemlerinde ortaya çıkan şekilsel ve boyutsal bozulmaların telafisini amaçlayan bir tasarım yöntemi oluşturmaktır. İlk olarak, formlama işlemine ait sonlu elemanlar analizi tahminleri üzerine çalışılmış ve tahmin hassasiyetini arttırmaya yönelik çalışmalar yapılmıştır. Bu kapsamda, malzemelerin plastisite modellemesi ve sonlu elemanlar hesaplama parametrelerinin tahmin sonuçlarına etkisi incelenmiştir. İkinci olarak, sac metal formlama işlemlerindeki karmaşık yüzeylerin üç boyutlu çalışma uzayında konumlandırılması üzerine çalışılmış ve bu amaçla bir ara yüz geliştirilmiştir. Sonrasında, şekil bozukluğu telafisi için proses parametrelerinin etkisi incelenmiş, ardından

Deplasman Ayar (DA) yöntemi kullanılarak form kalıp yüzeyleri şekil bozukluğu dikkate alınarak yeniden oluşturulmuştur. Bu amaçla, üç boyutlu telafi faktörü dağılımı ile DA yöntemi önerilmiş ve form kalıplarında meydana gelen yüzey bozulmalarının önüne geçilmiştir. Önerilen tasarım yöntemi, bir literatür örneği ve bir endüstriyel proses için uygulanmıştır.

Tez çalışmasının temel katkısı, geri esneme telafili kalıp yüzey tasarımı açısından endüstriyel ve akademik çalışmalarda kullanılacak ve literatürdeki diğer yöntemlere göre zaman kayıpları azaltılmış ve telafi hassasiyeti arttırılmış bir tasarım yöntemi sunmasıdır. Tahmin hassasiyetini arttırmak adına parametre seçiminde deneysel tasarım yöntemi kullanılarak, yöntemin proses tasarımı için de uygulanabilirliği ortaya konulmuştur. Buna ek olarak, karmaşık yüzeylerin uzayda konumlandırılması işlemini gerçekleştirebilen bir ara yüz geliştirilmiş, bu sayede yüzeylerin karşılaştırma işlemleri, oldukça hassas ve hızlı bir şekilde yapılmıştır. Ayrıca, literatürde yer alan çalışmaların büyük çoğunluğu basit benzetim kalıplarında gerçekleştirilirken, tez çalışmasında ise hem bir benzetim kalıbı hem de endüstriyel bir uygulama yer almaktadır. Çalışma kapsamında kullanılan AA2008 ve DP600 malzemeleri, telafi yönteminin, hem demir dışı malzemelerde hem de yeni nesil gelişmiş yüksek mukavemetli çeliklerde, başarılı bir şekilde kullanılabildiğini, önerilen yöntemin formlama işlemlerinde kullanılan her malzeme için başarılı sonuç verebileceğini göstermiştir. Endüstriyel uygulamalarda, telafili kalıp yüzeylerinin geliştirilmesinde yapılan iterasyonlar sonrasında kalıp yüzeylerinde bozulmalar meydana geldiği tespit edilmiş, bu kapsamda da tez çalışmasında 3 boyutlu telafi faktörü dağılımı yöntemi önerilmiştir. Bu yöntemle, telafi iterasyonları sonrasında, kalıp yüzeylerinde meydana gelen bozulma, efektif bir şekilde giderilmiş ve iterasyon sonucunda yakınsama elde edilmiştir. Böylelikle, iterasyonlarda geriye dönük iyileştirmeler yapılmasını engellenerek yine zaman kayıplarının önüne geçilmiştir.

1.2. Tez Çalışmasının Ana Hatları

Tez çalışması kapsamında yapılan çalışma yedi bölümde anlatılmıştır. Tez çalışmasının ikinci bölümünde tasarım aşamasında şekil bozukluğunun

modellenmesinde kullanılan temel prensipler ve bu prensiplere ait kavramlara yer verilmiştir. Bu kapsamda, şekil bozukluğu hataları, sonlu elemanlar analizi hesaplama parametreleri ve malzemelerin plastisite modellemesi ağırlıklı olarak literatür taraması ile incelenmiştir.

Üçüncü bölümde, tasarım aşamasında geri esneme telafisi için kullanılan yöntemler ele alınmıştır. Bu kapsamda proses parametrelerinin geri esneme davranışına etkisi ve kalıp yüzeylerinin şekil bozukluğuna bağlı olarak geliştirilmesinde kullanılan İleri Esnetme (İE) ve Deplasman Ayar (DA) yöntemlerinin teorilerine yer verilmiştir.

Dördüncü bölümde, karmaşık geometrilerin çalışma uzayında karşılaştırılması anlatılmış ve formlanmış parça geometrilerinin bilgisayar ortamına aktarılması hakkında bilgi verilmiştir. Ardından, bilgisayar ortamına aktarılmış deneysel yüzeyler ve sonlu elemanlar analizlerinden alınan geometrilerin karşılaştırma için uzayda konumlandırılmalarına yer verilmiştir. Karşılaştırma sırasında göz önünde bulundurulmuş endüstriyel tolerans/hata bandı kavramı ve yüzey uyumluluk analizleri anlatılmıştır.

Beşinci bölümde, tez çalışması kapsamında sunulan, telafili form kalıp yüzeylerinin geliştirilme yöntemi detaylı olarak açıklanmıştır. Bu kapsamda, deneysel tasarım yönteminin sonlu elemanlar tahmin hassasiyeti açısından kullanımı ve tez çalışması kapsamında önerilen, 3 boyutlu telafi faktörü dağılımı ile deplasman ayar yöntemine yer verilmiştir. Bu bölümde son olarak, tez çalışması kapsamında geliştirilen karmaşık yüzeylerin uzayda konumlandırılmasını sağlayan ara yüzün çalışma prensibi anlatılmıştır.

Altıncı bölümde, önceki bölümlerde anlatılan tasarım yönteminin uygulamaları yer almaktadır. Önerilen yöntem ilk olarak, bir literatür örneği olan açılı kanal çekme işlemine uygulanmıştır. Endüstriyel uygulama olarak ise çekme miktarı düşük, geometrisinde yüksek eğrilik barındıran ve çift fazlı çelik malzemesine sahip, tavan destek sacı formlama işlemi ele alınmıştır. Her iki kalıp geometrisi açısından da önerilen yöntemin etkili bir şekilde kullanılabilirliği gösterilmiş ve yöntemin, telafili form kalıp yüzeylerinin geliştirilmesinde oldukça başarılı olduğu tespit edilmiştir.

Yedinci bölümde tez çalışması kapsamında uygulanan yöntemler özetlenmiş ve sonuçlar literatürdeki diğer yöntemlerle karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Son olarak ileriki dönemlerde bu konuda çalışma yapmayı hedefleyen araştırmacılar için önerilerde bulunulmuştur.

BÖLÜM 2. TASARIM AŞAMASINDA GERİ ESNEME TAHMİNİ

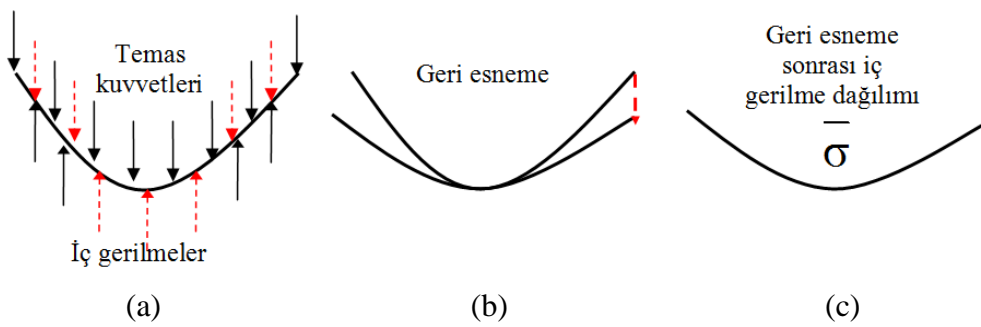
Tez çalışmasının bu bölümünde, tezin ana konusunu oluşturan şekil bozukluğu kavramı üzerinde durulmuştur. Bu kapsamda öncelikle geri esneme kavramı, sebep-sonuç ilişkisi içerisinde incelenmiş ve geri esneme davranışının proses tasarımı aşamasında modellenmesinin önemi anlatılmıştır. Tahmin yöntemi olarak sonlu elemanlar yöntemine yer verilmiş ve sonlu elemanlar hesaplama parametreleri incelenmiştir. Sonrasında, malzeme davranışlarının modellenmesinde kullanılan plastisite modelleri ve bu kapsamda da izotrop ve kinematik pekleşme kabulü yapan kriterler anlatılmıştır. Son olarak, plastisite modelleri için gerekli parametrelerin elde edilme yöntemlerine yer verilmiştir.

2.1. Sac Metal Formlama İşlemlerinde Şekil Bozukluğu Kavramı

Sac metaller sahip oldukları ağırlık/dayanım avantajlarından dolayı öncelikli olarak otomotiv ve havacılık sektörlerinde sıklıkla tercih edilirler. Sac metal formlama proseslerinden preste formlama en sık kullanılan yöntemlerin başında gelmektedir. Bu nedenle, formlama elemanlarının tasarımları ve metot mühendisliği oldukça önemlidir. Metot mühendisleri bütün prosesi tasarım aşamasında geliştirmektedirler. Bu kapsamda, formlama kalıp takım geometrileri ve proses koşulları sac metal malzemenin formlanabilirliği ve oluşabilecek hatalar göz önünde bulundurularak belirlenmelidir. Parça geometrisinin karmaşıklığı arttıkça yapılacak proses tasarımının da karmaşıklığı artmaktadır. Temel sac metal formlama işlemleri eğme, kesme ve gerdirme iken karmaşık prosesler genellikle eğme ve gerdirme işlemlerini içermektedirler. Sac metal formlama yöntemlerinde formlama sırasında ve sonrasında proses koşulları ve kalıp takım yüzeylerine bağlı olarak yırtılma, kırışma, kulaklanma ve şekil bozukluğu gibi birçok problemle karşılaşmaktadır. Bu hatalar arasında şekil bozukluğu, metot mühendisliği açısından en kritik olanıdır. Bunun

nedeni, şekil bozukluğu sonrasında parça toleranslarının yakalanamaması sonucunda montaj hattında büyük problemlerin yaşanmasıdır. Bu durum, oldukça büyük maliyet ve zaman kayıpları ile telafi edilebilmektedir. Bilgisayar teknolojisinin gelişimi ile birlikte tasarım aşamasının tüm adımları bilgisayar ortamında gerçekleştirilebilmektedir. Böylelikle deneme-yanılma proseslerindeki yüksek maliyet, bu sürecin bilgisayar ortamında gerçekleştirilebilmesi ile oldukça azaltılmıştır.

Şekil bozukluğunun birden fazla nedeni bulunmakla birlikte ana nedeni geri esnemedir. Geri esneme, kalıp araçlarının formlama prosesi sonrasında malzeme üzerinden kaldırılması sonucunda parça geometrisinde şekil bozukluğuna neden olmaktadır. Formlama sürecinde, sönmülenen elastik enerjinin açığa çıkmasıyla oluşan gerinimler, geometride boyutsal değişikliklere yol açmaktadır. Tam şekillendirme durumunda parça üzerinde hem temas kuvvetleri hem de iç gerilmeler mevcuttur. Kalıbın parça üzerinden kalkması ile temas kuvvetleri ortadan kalkar, parça üzerinde yeni bir iç gerilme dağılımı oluşur ve geri esneme meydana gelir (Şekil 2.1). Geri esneme temel olarak, malzemenin elastisite modülüne, akma gerilmesine ve deformasyon sırasındaki plastik gerinim miktarına bağlıdır. Bunların dışında, proses koşulları, malzeme kalınlığı gibi bir çok parametrenin geri esneme üzerinde etkisi bulunmaktadır.



Şekil 2.1. (a) Şekillendirme (b) Şekillendirme sonrası geri esneme (c) Geri esneme sonrası yeni iç gerilme dağılımı durumları

Geri esneme davranışı, temel olarak malzeme özelliklerine bağlı olduğundan, her malzemenin geri esneme davranışı farklılık göstermektedir. Malzemelerin geri esneme davranışını belirlemek adına çeşitli testler yapılmaktadır. Bu testler,

karmaşık formlama proseslerini temel bükme problemlerine ya da daha basit formlama problemlerine indirgeyen testlerdir ve benzetim testleri olarak adlandırılırlar. V kalıpta serbest bükme, U kanal çekme, kare çekme gibi testler benzetim testleri grubundadır. Bu testler sonrasında malzemenin geri esneme davranışı ve formlanabilirliği hakkında bilgi edinilir. Geri esneme, malzeme davranışının dışında proses koşullarına da bağlıdır. Parça tutucu kuvvet, malzeme kalınlığı, sürtünme gibi etmenler de geri esneme davranışı üzerinde rol oynamaktadırlar. Bu nedenle, benzetim testlerinde proses parametrelerinin de geri esneme davranışına etkileri tespit edilebilmektedir.

Literatürde de geri esnemenin deneysel olarak tespit edilmesi ve incelenmesine yönelik çalışmalar yer almaktadır. Samuel, yaptığı çalışmada [22], düşük karbonlu çelik, paslanmaz çelik ve alüminyum alaşımı malzemelerin U-kanal çekme prosesinde geri esneme davranışını incelemiştir. Geri esneme miktarının en yüksek alüminyum alaşımında, sonrasında paslanmaz çelikte ve en düşük olarak düşük karbonlu çelikte gözlemlemiştir. Aynı zamanda deneyi farklı parça tutucu kuvvet değerlerinde gerçekleştirmiş ve parça tutucu kuvvet artışının geri esneme miktarını azalttığını tespit etmiştir. Inamdar ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [23], V kalıpta serbest bükme prosesi üzerinden kalıp geometrisine göre geri esneme davranışını incelemişlerdir. Farklı zımba ve kalıp yarıçaplarının yanı sıra farklı kalıp boşluğu kullanmışlardır. Malzeme olarak alüminyum alaşımı ve çelik kullanmışlardır. Sonuç olarak kalıp geometrilerinin geri esneme davranışını etkin bir şekilde etkilediğini ve kalıp geometrisinin belirlenmesinde sac kalınlığının göz önünde bulundurulması gerektiğini tespit etmişlerdir. Tekarslan ve arkadaşları çalışmalarında [24], V kalıpta serbest bükmede bükme açısına göre geri esneme davranışını incelemişlerdir. Malzeme olarak DKP çelik malzeme kullanmışlardır. Sonuç olarak bükme açısı arttıkça geri esneme miktarının arttığını gözlemlemişlerdir. Tekarslan ve arkadaşları bir diğer çalışmalarında [25], serbest bükme prosesinde farklı kalınlıklarda paslanmaz çelik malzemesini farklı bükme açılarında incelemişlerdir. Malzeme kalınlığı ve bükme açısı arttıkça geri esneme miktarının da arttığını tespit etmişlerdir. Öztürk ve diğerleri yaptıkları çalışmada [26], V kalıpta serbest bükme prosesinde DP600 malzemesinin geri esneme davranışını hadde yönüne ve sıcaklığa bağlı olarak incelemişlerdir. Deneyler, oda sıcaklığında, 200°C ve 300°C'de gerçekleştirilmiştir.

Sonuç olarak geri esnemenin artan sıcaklıkla genel olarak azaldığını, fakat kesin bir davranış sergilenmediğini gözlemlemişlerdir. Han ve arkadaşları çalışmalarında [27], ekstrüzyon ile elde edilen AZ31 magnezyum profilinin döndürerek bükme prosesinde geri esneme davranışını, farklı sıcaklık, farklı bükme açısı ve farklı ön gerilme miktarına göre incelemişlerdir. Sonuç olarak artan sıcaklık ve ön gerilme ile geri esnemenin azaldığını, artan bükme açısı ile geri esnemenin arttığını gözlemlemişlerdir. Wang ve diğerlerinin yaptığı çalışmada [28], V bükme prosesinde AZ31 magnezyum alaşımının ılık şekillendirmede geri esneme davranışını incelemişlerdir ve artan sıcaklıkla geri esnemenin azaldığını tespit etmişlerdir. De Souza ve Rolfe yaptıkları çalışmada [29], yüksek mukavemetli çeliklerin geri esneme davranışını incelemişlerdir. Yarı silindirik formlu kanal çekme prosesinde kalıp yarıçapı, parça tutucu kuvvet ve sürtünme katsayısının geri esnemeye etkisini gözlemleyerek, geri esnemenin artan parça tutucu ve sürtünme katsayısı ile azaldığını, artan kalıp yarıçapı ile geri esnemenin artış gösterdiğini tespit etmişlerdir.

Formlama prosesi sonrası meydana gelen geri esneme dağılımı, kalıp yüzey tasarımını da doğrudan ilgilendirdiği için geri esneme davranışının tasarım aşamasında tahmin edilmesi gerekmektedir. Mühendislik uygulamalarında tahmin proseslerinde en sık kullanılan yöntem sonlu elemanlar analizleridir. Sonlu elemanlar analizleri tahmin sonuçlarının hassas olabilmesi için malzeme davranışının doğru bir şekilde modellenmesi gerekmektedir. Bu nedenle, tasarımı gerçekleştirecek metot mühendislerinin hem sonlu elemanlar analizlerine hem de malzeme davranışını tanımlayan modellere hakim olması gerekmektedir.

2.2. Sonlu Elemanlar Analizleri

Sac metal formlama proseslerinde deformasyon analizi için birçok mühendislik yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemler arasında, formlama yüklerini ve şekil değişimini belirlemede kullanılan kayma-çizgisi alan yöntemi (slip-line field method), üst ve alt sınır teknikleri (upper and lower boundary method) en sık tercih edilen yöntemlerdir. Bununla birlikte, proses ve malzeme parametrelerinin deformasyona etkilerinin tanımlanması ise sonlu farklar ve sonlu elemanlar (SE) gibi nümerik yöntemlerin geliştirilmesi sonrasında mümkün olmuştur [30].

Diğer nümerik yaklaşımlarla karşılaştırıldığında sonlu elemanlar yöntemi, sac metal formlama yöntemleri içerisinde bilgisayar destekli tasarımda en sık kullanılan yöntemdir. Tasarım ve metot mühendisleri, üretimde karşılaşılabilecek problemleri, tasarım prosedürünün erken dönemlerinde tespit edip telafi edebilmelidirler. Böylelikle, deneme-yanılma süreci için gereken zaman ve maliyet kayıpları oldukça azaltılmış olmaktadır. Hassas malzeme davranışlarının tespiti gerektiğinden, büyük deformasyonlarla çalışıldığından ve kalıp takımları ve malzeme arasında karmaşık temas durumları bulunduğundan, formlama işlemleri, sonlu elemanlar yöntemi açısından karmaşık problemlerdir. Sonlu elemanlar analizleri sac metal formlama proseslerinde 1970'li yıllarda kullanılmaya başlanılmıştır [31]. Büyük deformasyona sahip bir problemin sonlu elemanlarla çözümü ilk kez Hibbit ve diğerleri [32] tarafından sunulmuştur. İlk üç boyutlu sac metal formlama analizi ise 1978 yılında Wand ve Budionsky [33] tarafından önerilmiştir. Bu çerçevede statik-implicit, rijit plastik ve katı cisim yaklaşımı gibi birçok yöntem ve çözüm prosedürü önerilmiştir. Fakat o dönemlerde önerilen bütün yöntemlerin çözüm süresi oldukça uzun sürmekte idi. Yaklaşık 400 kabuk elemandan oluşan bir formlama prosesi yüksek seviyeli bilgisayarlarda 20 saatte çözülebiliyordu [34]. Buna karşılık, 1989 yılında Henecker ve Mattiasson [35], dinamik-eksplisit yaklaşımını sunmuşlardır. Bu yönetime göre artık 10000 kabuk elemanlı bir problem yüksek seviyeli bilgisayarlarda 1,5 saatte çözülebilmekteydi. 1990'lı yıllarla birlikte sac metal formlama prosesleri için sonlu elemanlar yaklaşımının kullanımında büyük bir artış yaşanmış ve birçok ticari yazılım piyasada yer almıştır. Günümüzde de sonlu elemanlar yönteminin sac metal formlama proseslerindeki kullanımı ve gelişimi hızlı ilerleyişini sürdürmektedir.

Sonlu elemanlar yöntemi temel olarak sanal iş prensibine dayanmaktadır. Sonlu elemanlarla modellenecek bir problem için oluşturulan sonlu elemanlar denklemleri, elemanların düğüm noktalarında oluşan yer değiştirmeleri tespit etmek için çözülmektedir. Tespit edilen yer değiştirmeler, elemanların integrasyon noktalarındaki gerilme ve gerinim tensörlerinin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Bir sac metal formlama işlemi sonlu elemanlarla modellenirse, oluşturulan denklemler, büyük yer değiştirmeler, sonlu gerinimler ve kalıp takımları ve sac metal arasındaki sürtünmeden dolayı değişen sınır koşulları bulunduğundan yüksek

nonlineerlik barındırmaktadır. Bu nedenle bu problemlerin çözümünde Newton-Raphson ya da benzer bir iterasyon yöntemi kullanılmaktadır [30].

Sonlu elemanlar uygulamaları için sonlu elemanlar modeli ve ağ yapısının oluşturulması, malzeme davranışının tanımlanması ve modellenmesi ve temas ara yüzünün belirlenmesi en temel üç hesaplama adımıdır. Temas ara yüzleri oluşturulurken, tasarım ve metot mühendisleri genellikle temas tipi ve sürtünme parametreleri ile ilgilenirler. Diğer yandan sonlu elemanlar analizlerinde eleman tipinin ve boyutunun belirlenmesi ve malzeme modelinin tespiti sonuçlar üzerinde oldukça etkilidir.

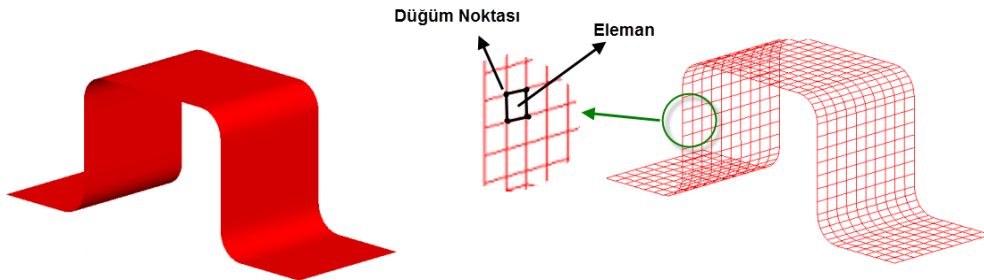
2.2.1. Açık zamana bağlı ve kapalı adımlı sonlu elemanlar yöntemleri

Sac metal formlama işlemleri, sonlu elemanlar yöntemi ile iki adımda incelenmektedir. Kalıp takımının sac açınımına şekil verdiği adım formlama adımı olarak adlandırılır. Burada, parça üzerinde kalıp takımı ve temas kuvvetleri bulunmaktadır. İkinci adımda ise kalıp takımı ve temas kuvvetleri parça üzerinden kaldırılır ve geri esneme adımı elde edilir. Geri esneme adımından sonra elde edilen parça geometrisi sonlu elemanlar analizleri için presten çıkan ürünü temsil etmektedir. Bu adımlar açık zamana bağlı (explicit) ve kapalı adımlı (implicit) yöntemlerle çözülürler. Açık zamana bağlı analizlerde, ivme ve hız kavramları zamana ve yer değiştirmeye bağlı fonksiyonlarla ifade edilmektedir. Açık zamana bağlı yöntem, birçok sonlu elemanlar çözüm yönteminden çok daha hızlı çözüme ulaşır. Bu yüzden çok eleman içeren ve zaman basamağı sık, non-lineer problemlerde tercih edilir. Kapalı adımlı yöntem, sabit ortalama ivme kabulüne dayanır. Kapalı adımlı integrasyonda zaman durağandır. Zaman basamağı miktarı keyfi olarak geniş tutulabilir, fakat istenilen sonuçlara uygun değerlerde seçilmelidir. Eğer non-lineerlik söz konusuysa zaman basamağının miktarı yakınsamayı yakalayabilecek kadar küçük seçilmelidir [36, 37]. Açık zamana bağlı ve kapalı adım yöntemleri sac metal formlama işlemlerinde, hem formlama hem de geri esneme adımları için kullanılabilirler. Ancak, literatürde yapılan çalışmalar ışığında [38-40], formlama adımı için açık zamana bağlı yöntem, geri esneme adımı için ise kapalı adımlı yöntemin kullanılması zaman kazancı ve yakınsama açısından tavsiye edilmektedir.

Formlama ve geri esneme hesaplamaları arasında temel farklılıklar mevcuttur. Formlama sırasında, sac açınımlı ve kalıp elemanlarını temsil eden rijit yüzeyler arasında, temas mekanizması kullanılarak büyük yer değiştirmeler hesaplanır. Geri esneme hesaplamalarında ise formlama adımına göre çok daha düşük yer değiştirmeler beklenir. Ayrıca geri esneme hesaplanırken oluşan yer değiştirmeler dış kuvvetler tarafından değil, parçadaki sac kalınlığı boyunca oluşan gerilme dağılımının dengesizliğinden dolayı oluşmaktadır [41, 42].

2.2.2. Ağ yapısının oluşturulması

Sonlu elemanlar yöntemi, ilgili geometrileri daha küçük sonlu parçalara ayırarak sınır koşulları ve yükleme durumlarına göre modelleyerek çözüm yapma prensibi ile çalışmaktadır. Ayrılan her bir parçaya eleman, elemana ait köşe noktalarına düğüm noktası ve tüm bu sisteme ise ağ yapısı denilmektedir. Örnek bir sonlu elemanlar modeli Şekil 2.2’de görülmektedir.



Şekil 2.2. Örnek bir sonlu elemanlar modeli

Katı, kabuk ve membran elemanlar sac metal formlama işlemleri kapsamında kalıp elemanlarında ve sac malzemelerde kullanılan üç temel eleman tipidir. Lineer şekil fonksiyonuna sahip, izotrop katı elemanlar 2 ve 3 boyutlu uzayda temas içeren deformasyon analizleri için uygundur ve sac metal dahil olmak üzere bütün formlama elemanları katı elemanlarla modellenenirler. Sac metalin eğme davranışını modelleyebilmek için kalınlık yönünde en az dört lineer elemana ihtiyaç duyulmaktadır, ayrıca üç boyutlu sonlu elemanlar modellerinde eleman sayıları oldukça fazla sayıda olabilmektedir [30]. Bu durum, sonlu elemanlar modelinin çözümünde yüksek miktarda bilgisayar kaynağı ihtiyacı ve uzun çözüm süreci

gerektirmektedir. Sac metal formlama işlemlerinde, yüksek yüzey alanı/kalınlık oranına sahip ince malzemeler kullanılmaktadır. Bu nedenle, sac düzlemine dik yöndeki gerilmeler, sac düzlemindekilere göre oldukça küçük olmakta, dolayısıyla problem, düzlem gerilme durumuna dönüşmektedir. Hem sac metalin geometrisi hem de düzlem gerilme durumundan dolayı kabuk ve membran elemanların sac metal formlama işlemlerinde kullanımı daha uygun olmaktadır.

Kabuk ve membran elemanlar, kalınlık yönündeki deformasyonun, Kirschhoff-Love ya da Reissner-Middlin koşullarıyla belirlenen yapısal bir özellik olduğu kabulüne dayalı iki boyutlu elemanlardır [30, 43-46]. Düzlem gerilme durumu ve geometrik sınır koşullarının sonucu olarak, malzemedeki kalınlık yönünde tek bir kabuk ya da membran eleman kullanarak, deformasyonun modellenmesindeki hesaplama zamanı oldukça azaltılabilmektedir. Eğme problemlerinde ise membran elemanlar, kalınlık yönünde homojen gerilme dağılımı kabulü yapmaktadır [30]. Bu nedenle, büyük endüstriyel parçaların formlama işlemlerinin sonlu elemanlar analizlerinde genellikle kabuk elemanlar tercih edilmektedir.

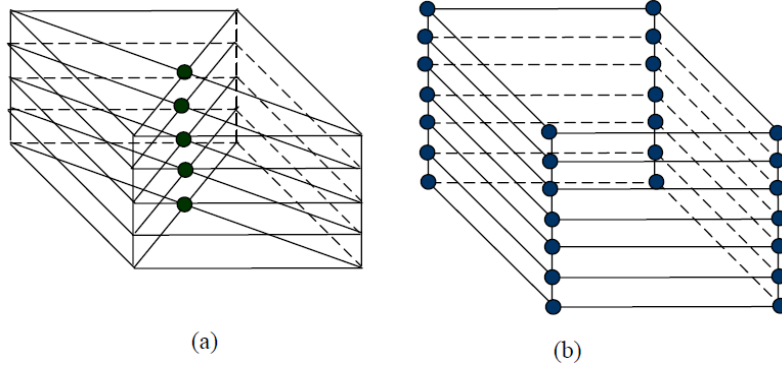
Formlama araçları, simülasyonlarda genellikle teorik olarak rijit kabul edilmekte ve bu nedenle de kalıp takımları yüzey olarak modellenmektedir. Sac metal formlama işlemlerinde formlama araçları genellikle formlama yüklerini sac metale uygulayacak şekilde bir ağ yapısı ile oluşturulurlar. Fakat sac metal malzemeler, deformasyona uğrayacağından ve gerilme-gerinim hesaplamalarının tamamı sac üzerinde yapılacağından sac metallerin ağ yapılarının oluşturulması daha hassas ve zaman alıcı bir proses olmaktadır. Kalıp yüzeylerinin karmaşıklığına bağlı olarak genellikle üç ve dört düğüm noktasına sahip elemanların birlikte kullanımı ile sac malzemelerin ağ yapısı oluşturulmaktadır. Eleman boyutlarının küçülmesi ile çözüm hassasiyetinin arttığı, fakat çözüm süresinin uzadığı bilinmektedir [30-31]. Bu nedenle sac metal malzemeler hassas çözüm elde etmek adına kalıp yüzeylerine göre daha hassas ağ yapısı ile örülürler. Diğer taraftan, her zaman küçük eleman kullanmak en avantajlı ya da en hassas çözümü vermez. Bu nedenle, ilgili geometri ve proses için uygun çözüm süresinde, hassas sonuç verebilen eleman boyutunun belirlenmesi gerekmektedir.

2.2.3. Sonlu elemanlar hesaplama parametreleri

Sonlu elemanlar analizleri tahmin sonuçları, metot mühendisleri açısından proste karar verme mekanizmaları için oldukça önemlidir. Bu nedenle, yapılan tahminlerin hassas çözümler vermesi gerekmektedir. Tahmin hassasiyeti, ağırlıklı olarak malzeme davranışının modellenmesine ve sonlu elemanlar parametrelerine bağlıdır.

Sonlu elemanlar analizlerinde eleman boyutu dışında tahmin hassasiyetini etkileyen, eleman formülasyonu, integrasyon nokta sayısı ve zaman adımı büyüklüğü gibi önemli parametreler bulunmaktadır. Bu parametrelerden eleman formülasyonu, sonlu elemanların çözüm şeklini belirlemektedir. Günümüzde birçok kabuk eleman formülasyonunun bulunması ile birlikte Belytschko-Tsay (BT), Hughes-Liu (HL) ve Full Integrated (FI) formülasyonları gerek çözüm hassasiyeti gerekse de çözüm hızı açısından en sık tercih edilen eleman formülasyonlarıdır [47].

Eleman formülasyonlarından HL kabuk elemanlarda, eleman yapısı rijit hareketlerde gerinim üretmediği için birçok uygulamada sonlu gerinim hesaplaması rahatlıkla yapılabilmektedir. Ayrıca basit yapısından dolayı hesaplanma kolaylığı sağlamakta ve sonlu enine kayma gerinimlerini üzerinde barındırmaktadır [42]. BT kabuk elemanı ise HL kabuk elemanına göre daha avantajlıdır. Bunun nedeni, BT kabuk elemanlar HL kabuk elemanlara göre daha az sayıda işleme gereksinim duymaktadır dolayısı ile çözüm süresini oldukça kısaltmakta ve hesaplama maliyetini düşürmektedir. BT kabuk elemanı, döneel koordinat sistemi üzerine oturtulmuş hız-gerinim hesaplama metodunu kullanan bir elemandır. Eleman koordinat sistemi kullanılması, lineer olmayan hesaplama karmaşasında hesaplama kolaylığı sağlarken, hıza bağlı gerinim özelliğinin olması Cauchy gerilmesiyle benzerlikler göstermektedir [42]. BT kabuk elemanlarda eleman koordinat sisteminde kabuk elemanın ortasından geçen dörtgen referans yüzeyi, dört düğüm noktası ile ifade edilir. Bu dörtgenin kenarları üzerine yerleşmiş olan birim vektörleri kullanan koordinat sistemi, elemanın şekil değiştirmesi ile beraber değişebilir durumdadır. Şekil 2.3'te kabuk elemanı oluşturan düğüm noktaları ve referans dörtgen üzerinde bulunan koordinat sistemi verilmiştir. Burada \hat{e}_1 ve \hat{e}_2 birim vektörleri, referans



Şekil 2.4. BT kabuk elemanı için beş katmanda sadeleştirilmiş (a) ve yedi katmanda tam çözüm (b) için hesaplama noktaları [42]

Bir diğer sonlu elemanlar parametresi ise zaman adımı büyüklüğüdür. Zaman adımı büyüklüğü Denklem 2.1 ile hesaplanabilir.

$$\Delta t = \frac{L}{c} \quad (2.1)$$

Burada, Δt , zaman adımı büyüklüğünü, L sonlu elemanlar ağı yapısındaki en küçük elemanın kenar uzunluğunu, c ise ses hızını temsil etmektedir. Ses hızı ise Denklem 2.2 ile hesaplanabilir.

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho_0(1-\nu^2)}} \quad (2.2)$$

Burada, E elastisite modulünü, ρ_0 malzeme yoğunluğunu, ν ise Poisson oranını temsil etmektedir. Zaman adımı büyüklüğü, toplam zaman adımının bulunmasında kullanılmaktadır ve sonlu elemanlar analizlerinin çözüm süresini etkileyen önemli bir parametredir.

2.2.4. Sınır koşulları

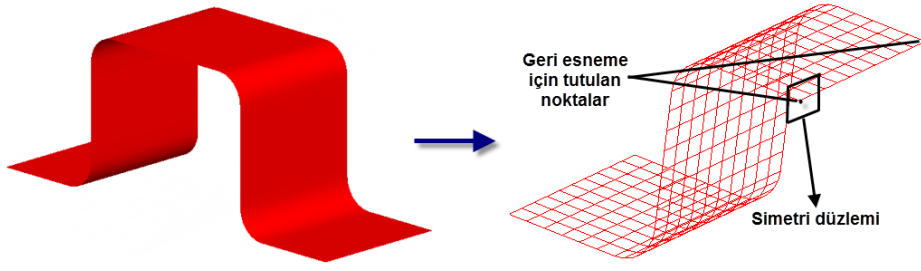
Sonlu elemanlar analizlerinde gerek prosesi tanımlamak için gerekse de çözüm süresini kısaltmak adına çeşitli sınır koşullarının tanımlanması gerekmektedir. Bu

bölümde, simetri sınır koşulu ve geri esneme adımının hesaplanması için düğüm noktalarına tanımlanan sınır koşullarına yer verilmiştir.

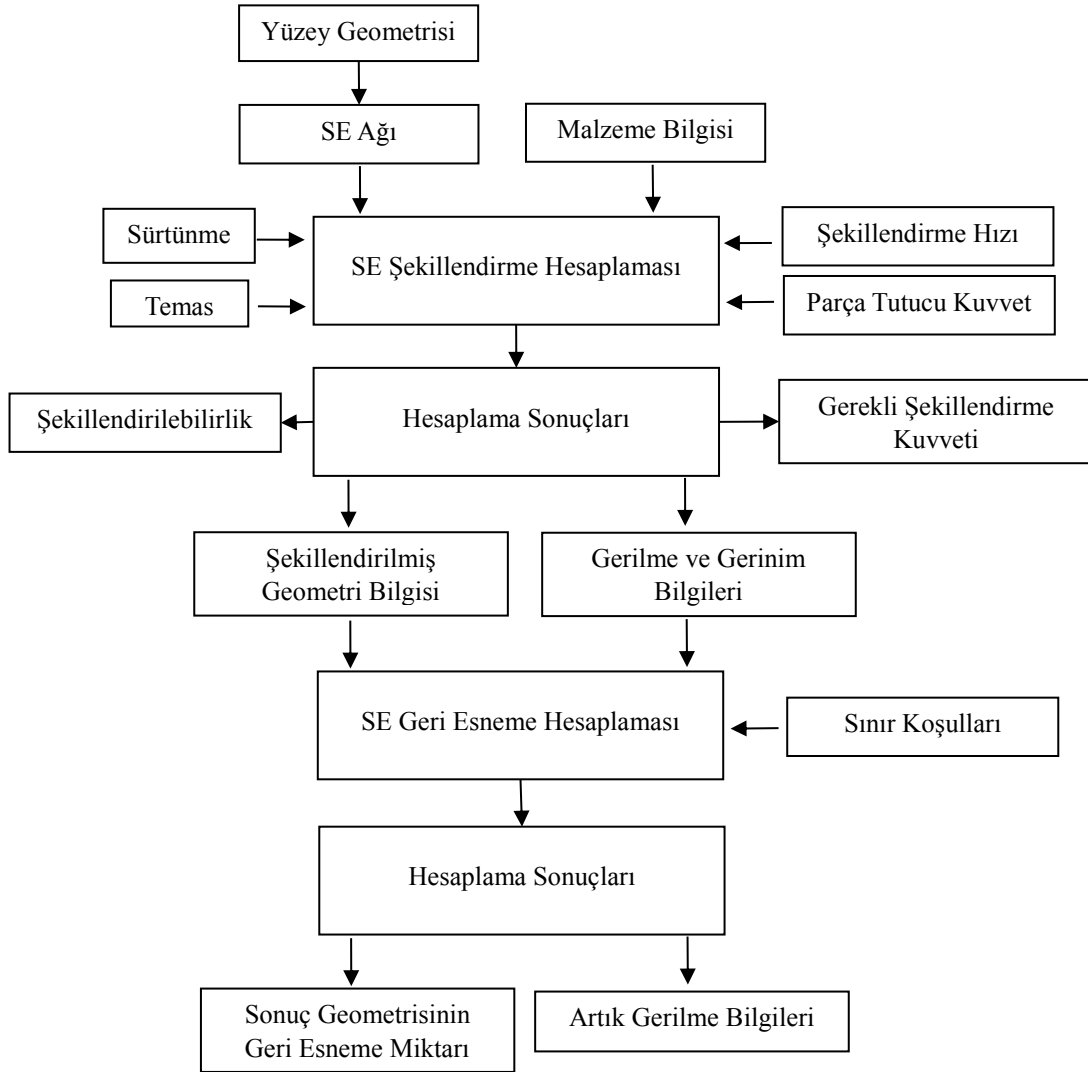
Sonlu elemanlar analizlerinin çözüm süresini kısaltmak için geometrisinde simetri bulunan kalıp takımları yarı model ya da çeyrek model olarak tasarlanabilirler. Bunun için simetri sınır koşullarının tanımlanması gerekmektedir. Simetrinin sağlandığı eksen üzerindeki düğüm noktalarının uzaydaki serbestlik derecelerinin kısıtlanması ile simetri davranışı modellenenmektedir.

Bir diğer sınır koşulu ise geri esnemenin hesaplanması için düğüm noktalarına tanımlanmaktadır. Formlama adımı sonuçları incelendikten sonra, elde edilen gerilme ve gerinim bilgilerinin de dikkate alınmasıyla, geri esneme sınır koşulları verilerek geri esneme hesaplanmaktadır. Hesaplama yöntemi, formlama geometrisi üzerindeki artık gerilmelerin ve parçadaki iç enerjinin dengelenmesi prensibi ile çalışmaktadır. Bu nedenle, kalıp takımlarına bu adımda ihtiyaç duyulmamaktadır. Dolayısıyla, kapalı adım çözüm yöntemi ile geri esneme hesap adımına geçildiğinde temas kuvvetlerine neden olan kalıp takımları kaldırılır. Formlama adımının hesaplanması sonucunda elde edilen veriler, geri esneme hesaplaması için giriş bilgileri olarak kullanılır. Geri esneme hesaplamasında, yer değişim kontrollü olarak sabitlenmiş kalıp yüzeyleri olmadığından sınır koşulları, formlanmış geometri üzerinde uygulanır. Bu adım için parçaya, formlama işleminin yapıldığı yön dikkate alınarak sınır koşulları verilmektedir [42]. Temas kuvvetleri kaldırıldıktan sonra, sınırlandırılan düğüm noktaları dışındaki noktalar uzayda gerilme dağılımına bağlı olarak yer değiştirerek geri esneme geometrisini oluştururlar.

Şekil 2.5'te örnek bir sac malzeme üzerinden simetri ve geri esneme sınır koşulları verilmiştir. Şekil 2.6'da ise sac metal formlama işlemleri için sonlu elemanlar analizinin genel iş akış şeması görülmektedir.



Şekil 2.5. Sınır koşulları



Şekil 2.6. Şekillendirme ve geri esneme adımlarının sonlu elemanlar ile elde edilmesinde izlenen iş akış şeması [42].

2.3. Plastisite Teorisi ve Modellenmesi

Sac metal formlama işlemlerinin sonlu elemanlar analizlerinde, malzeme davranışının doğru ve hassas bir şekilde tanımlanması, tahmin sonuçları üzerinde oldukça etkilidir. Formlama işlemlerinde, malzemede meydana gelen plastik deformasyonların modellenenbilmesi için malzeme davranışını tanımlayan plastisite modellerinin kullanımı, metot mühendisliği açısından oldukça kritiktir. Bu kapsamda plastisite modelleri için gerekli malzeme parametrelerinin de hassas bir biçimde belirlenmesi aynı şekilde önem arz etmektedir.

Plastik malzeme davranışı, elastik malzeme davranışından daha karmaşık bir kavramdır. Elastik kısımda, gerinimler ve gerilmeler arasında Hooke kanunu vasıtası ile lineer bir ilişki vardır. Genelde, plastik gerinimler yalnızca gerilmelerle tanımlanmazlar. Plastik gerinimler, tüm yükleme geçmişine ve gerilme durumuna nasıl ulaşıldığına bağlıdır [48]. Bir malzemenin genel gerilme durumunda plastik davranışlarını modelleyebilmek için, akmanın olduğu andaki gerilme bileşenleri arasındaki ilişkiyi açıklayan bir akma kriterine, gerilme ve gerinim oranı bileşenleri arasındaki ilişkiyi tanımlayan bir akma kuralına ve formlama işlemi süresince başlangıç akma gerilmesinin gelişimini tanımlayan pekleşme kuralına ihtiyaç vardır.

2.3.1. Akma fonksiyonları

Akma fonksiyonları, malzemedeki akmanın başlangıcını tahmin etmek için kullanılan matematiksel ilişkilerdir. Asal gerilmeler σ_1 , σ_2 ve σ_3 olarak verilirse aşağıdaki kübik ifade yazılabilir.

$$\sigma^3 - I_1\sigma^2 - I_2\sigma - I_3 = 0 \quad (2.3)$$

Bu kübik ifade, asal gerilmelerin elde edilmesi için çözülmektedir. Burada σ 'nın kökleri asal gerilmeleri ve I_1 , I_2 , I_3 ise gerilme invariantlarını temsil etmektedir. Gerilme invariantları kartezyen koordinat sisteminde,

$$I_1 = \sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz} \quad (2.4)$$

$$I_2 = \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2 - (\sigma_{xx}\sigma_{yy} + \sigma_{yy}\sigma_{zz} + \sigma_{zz}\sigma_{xx}) \quad (2.5)$$

$$I_2 = \sigma_{xx}\sigma_{yy}\sigma_{zz} + 2\tau_{xy}\tau_{yz}\tau_{zx} - (\sigma_{xx}\tau_{yz}^2 + \sigma_{yy}\tau_{zx}^2 + \sigma_{zz}\tau_{xy}^2) \quad (2.6)$$

şeklinde yazılabilir.

Burada σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} normal gerilmeler ve τ_{xy} , τ_{xz} , τ_{yz} kartezyen koordinat sistemindeki kayma gerilmeleridir. Asal gerilme bileşenleri yazılırsa,

$$\underline{\sigma} = \sigma_h + \sigma_d \quad (2.7)$$

elde edilir. Burada σ_h ve σ_d sırasıyla hidrostatik ve deviatorik gerilme bileşenleridir. Hidrostatik gerilme Denklem 2.8'deki gibi tanımlanabilir.

$$\sigma_h = \frac{1}{3}I_1 \quad (2.8)$$

Önceki plastisite araştırmalarından hidrostatik gerilmelerin akmaya etkisinin bulunmadığı ortaya konulmuştur [49]. Bu kapsamda, asal gerilmelerden hidrostatik gerilmeler çıkarılarak deviatorik gerilmeler elde edilmektedir. Deviatorik gerilmeler,

$$S_1 = \sigma_1 - \frac{1}{3}I_1 \quad (2.9)$$

$$S_2 = \sigma_2 - \frac{1}{3}I_1 \quad (2.10)$$

$$S_3 = \sigma_3 - \frac{1}{3}I_1 \quad (2.11)$$

şeklinde yazılabilir.

Deviatorik gerilmeler aşağıdaki kübik denklemin kökleri olarak elde edilirler.

$$S^3 - J_1 S^2 - J_2 S - J_3 = 0 \quad (2.12)$$

Burada, J_1 , J_2 ve J_3 deviatorik gerilmelerin invariantlarıdır ve aşağıdaki şekilde yazılabilirler.

$$J_1 = 0 \quad (2.13)$$

$$J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (2.14)$$

$$J_3 = (\sigma_1 - \sigma_h)(\sigma_2 - \sigma_h)(\sigma_3 - \sigma_h) \quad (2.15)$$

Klasik plastisite teorisinde, bir akma fonksiyonu, f , asal gerilmelerin bir fonksiyonudur ve Denklem 2.16'daki gibi yazılabilir.

$$f = f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) \quad (2.16)$$

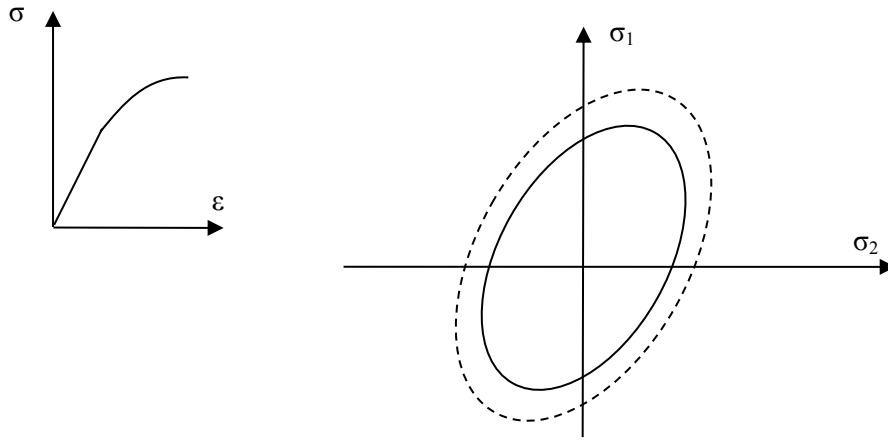
Burada $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ asal gerilmelerdir. Denklem (2.16) üç boyutlu asal gerilme uzayında "akma yüzeyi" denilen bir yüzeyin matematiksel tanımıdır. Bu yüzey, kapalı, düzgün ve konveks olmalıdır. Yüzeyin içerisindeki tüm noktalar elastik durum ile ilişkilidir. Yüzeyin üzerindeki noktalar ise plastik durumla ilişkili olup yüzeyin dışında kalan noktaların fiziksel bir anlamı bulunmamaktadır. Sac metal formlama işlemlerinde olduğu gibi düzlem gerilme durumu için akma yüzeyi bir eğri haline gelmektedir. Bu tanımla, $f < 0$ olursa malzeme davranışı elastik, $f = 0$ durumunda ise akma oluşur ve malzeme davranışı plastik durumdadır. Akmanın hidrostatik gerilmelerden bağımsız olduğu kabulü dikkate alınır,

$$f = f(J_2, J_3) \quad (2.17)$$

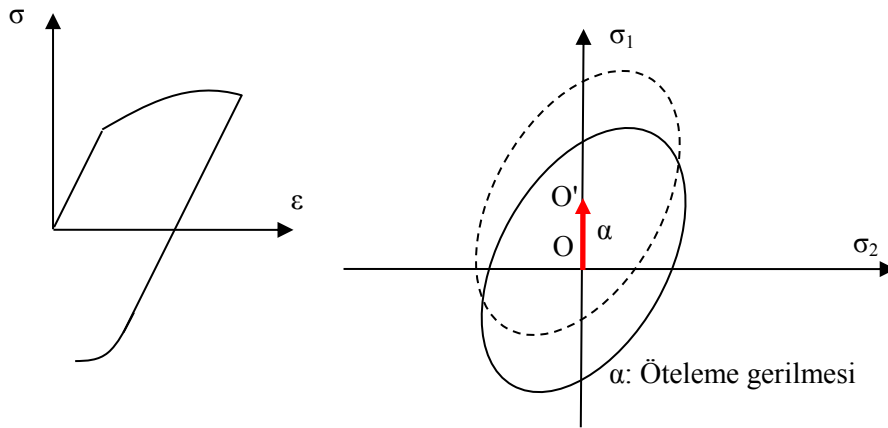
yazılabilir.

2.3.2. Pekleşme kuralları

Plastik deformasyon sırasında malzemelerin pekleşme davranışlarından dolayı akma yüzeyi şekilsel ya da boyutsal olarak değişir. Şekil değişimi, birçok malzeme için izotrop pekleşme kabulü ile elde edilmektedir. İzotrop pekleşmede, akma yüzeyi orantısız olarak genişlemektedir. von Mises akma fonksiyonuna göre akma yüzeyinin yarıçapı pekleşme sırasında artmaktadır. İzotrop pekleşme davranışının şematik gösterimi Şekil 2.7’de verilmiştir.



Şekil 2.7. İzotrop pekleşme durumu şematik gösterimi

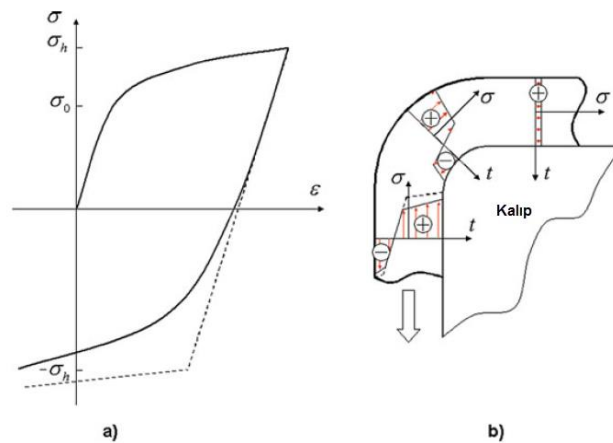


Şekil 2.8. Kinematik pekleşme durumu şematik gösterimi

İzotrop pekleşme kuralı kabulü yapılan malzemelerde akma davranışı çekme ve basma durumlarında aynıdır. Bu yaklaşım bazı malzemeler için doğru olmakla birlikte, genel malzeme davranışını tanımlamak adına hassas değildir. Bu kapsamda

akma yüzeyinin boyutunun değişmediği, yalnızca yer değiştirdiği kinematik pekleşme kavramı kullanılmaktadır. Kinematik pekleşme modelleri çekme-basma yüklemeleri sonucunda malzeme davranışını tanımlayabilmektedir. Kinematik pekleşme davranışının şematik gösterimi Şekil 2.8’de verilmiştir.

Sac metal formlama işlemlerinde malzemenin önemli bir bölümü orantısız olmayan yüklemeye maruz kalır. Kalıp yarıçapından ya da süzdürme çubuklarından geçiş sırasında malzeme kalınlık yönünde çekme-basma yüklemesi altındadır. Malzemelerin plastisite davranışı, yalnızca mevcut duruma bağlı olmamakla birlikte önceki deformasyon durumu da mekanik davranışa etki etmektedir. Orantısız olmayan yükleme sırasında mekanik özellikleri etkileyen parametrelerden birisi de Bauschinger etkisidir. Bu durum genellikle gerinim yönünün değişmesi sonucu malzemenin akma gerilmesinde meydana gelen düşüşle ilgilidir. Bauschinger etkisinin şematik gösterimi Şekil 2.9’da verilmiştir.



Şekil 2.9. (a) Bauschinger etkisi (b) Sac metal formlama proseslerinde eğme sırasında gerilme durumu [31]

İlk olarak malzeme bir σ_h gerilmesine kadar çekme yüküne maruz kalır ve sonrasında yük boşaltılarak basma yükü uygulanır. Plastik deformasyon, basma (negatif) akma gerilmesinden önce gerçekleşir. Benzer bir durum sac metal formlama proseslerinde malzeme kalıp yarıçapından geçerken oluşur (Şekil 2.9-b). İlk eğme durumunda malzemenin dış kısmında çekme ve iç kısmında basma durumu vardır. Malzeme akışı sırasındaki ikinci durumda sac kalınlığı boyunca gerilme durumu tersine etkiler ve Bauschinger etkisi meydana gelir.

Özellikle geri esneme tahmini için ters yükleme durumlarında malzeme davranışını hassas olarak tanımlayabilmek zorunludur. Geri esneme miktarı malzemenin akma dayanımına ve elastisite modülüne bağlı olduğundan Bauschinger etkisini de içeren malzeme modellerinin kullanılması özellikle AHSS ve alüminyum alaşımları gibi yeni nesil malzemeler açısından oldukça önemlidir. Bauschinger etkisi genellikle anizotropik pekleşme kullanılarak tahmin edilir. Fakat, deneyler akma yüzeyindeki değişimin karmaşık olduğunu ve hem öteleme hem de boyut ve şekil değişiminin gerçekleştiğini göstermektedir [31].

2.3.3. Akma kuralı

Plastik davranış için akma kuralları, elastik davranışını tanımlayan Hooke kanununa benzerdir. Hooke kanunu elastik gerinimlerle gerilmeler arasındaki ilişkiyi tanımlarken, akma kuralları plastik gerinimlerle gerilmeler arasındaki ilişkiyi tanımlamaktadır. Genel formda akma kuralı,

$$\partial \varepsilon_{ij}^{pl} = \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} d\phi \quad (2.18)$$

şeklinde yazılabilir. Burada $\partial \varepsilon_{ij}^{pl}$ plastik gerinimi, g potansiyel akma fonksiyonunu ve $d\phi$ ise pozitif değerde bir sabiti temsil etmektedir. i ve j indisleri 1-2-3 ya da x-y-z eksenlerini temsil etmektedir. Burada, “ f ” akma fonksiyonu olarak alınırsa, akma $g=f$ durumunda gerçekleşmektedir.

2.3.4. İzotrop malzeme ve izotrop pekleşme kabulü yapan plastisite modelleri

Malzeme davranışını tanımlayan modeller, bünyelerinde çeşitli kabuller barındırmaktadırlar. Bu kapsamda öncelikle malzemeyi ve pekleşme davranışını izotrop kabul eden modellere yer verilmiştir.

En eski akma kriteri 1864 yılında Tresca [50] tarafından sunulmuştur. Bu kriter gereği, malzeme elastik bölgeden plastik bölgeye maksimum kayma gerilmesi (τ_{max})

kritik bir değere ulaştığında geçmektedir. Bu durumdan ötürü bu kritere maksimum kayma gerilmesi kriteri de denilmektedir. Genel durum için kriter aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\max \{|\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_2 - \sigma_3|, |\sigma_3 - \sigma_1|\} = \sigma_0 \quad (2.19)$$

Burada σ_1 , σ_2 , σ_3 asal gerilmelerdir. Düzlem gerilme durumu için Denklem (2.19) aşağıdaki hali alır.

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \pm \sigma_0 = \pm 2K \quad (2.20)$$

σ_x ve σ_y gerilmeleri asal gerilmelerle örtüşmezse denklem,

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2 = \sigma_0^2 \quad (2.21)$$

formunu alır.

İzotrop malzeme ve izotrop pekleşme kabulü yapan bir diğer önemli kriter, von Mises [51] tarafından geliştirilmiştir. Bu kriter hidrostatik gerilmelerin plastik akmaya neden olamayacağı görüşüne dayanmaktadır. Malzeme elastik şekil değişiminden plastik şekil değişimine gerilme durumundan bağımsız olarak şekil bozulmasının elastik enerjisinin kritik bir değere ulaşması ile geçer. Bu nedenle bu kritere maksimum şekil değiştirme enerjisi kriteri de denilmektedir.

von Mises akma fonksiyonu, klasik plastisite hesaplamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Bu fonksiyon akmanın hidrostatik gerilmeden bağımsız, yalnızca J_2 'ye bağımlı olduğu kabulüdedir ve aşağıdaki formda yazılabilir.

$$f(J_2) = J_2 - k^2 \quad (2.22)$$

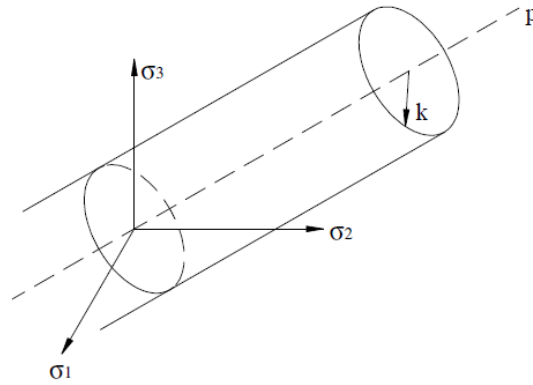
Burada k , kayma akma gerilmesidir ve pekleşme davranışı gösteren malzemeler için plastik gerininin bir fonksiyonudur. von Mises etkin gerilmesi yazılırsa,

$$\sigma_e = \sqrt{3J_2} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (2.23)$$

olur. von Mises akma yüzeyinin asal gerilme uzayındaki durumu için $f(J_2)$ sıfıra eşitlenirse,

$$J_2 = k^2 \quad (2.24)$$

elde edilir. von Mises akma yüzeyi k yarıçapında dairesel kesitli bir silindirdir ve eksenleri hidrostatik basıncın yönünde tanımlanır. Şekil 2.10.'da akma yüzeyi şematik olarak gösterilmiştir.

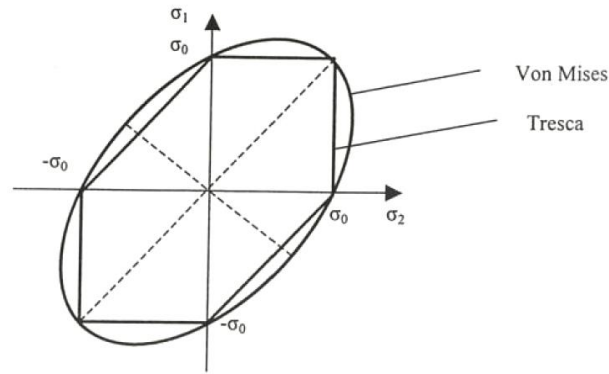


Şekil 2.10. Asal gerilme uzayında von Mises akma yüzeyi [52]

Düzlem gerilme durumu için von Mises kriteri aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + \sigma_1^2 + \sigma_2^2 = 2\sigma_0^2 \quad (2.25)$$

Bu ifade σ_1 - σ_2 asal gerilme düzleminde bir elipsi temsil etmektedir. Asal gerilme düzleminde von Mises akma yüzeyine ait elips Tresca poligonunun köşe noktalarından geçer. Tresca ve von Mises Akma yüzeyleri Şekil 2.11'de gösterilmiştir.



Şekil 2.11. σ_1 - σ_2 asal gerilme düzleminde Tresca ve von Mises akma yüzeyleri [31]

Bir diğer akma kriteri olarak 1972 yılında Hosford [53], von Mises kriterinin geliştirilmiş halini geliştirmiştir.

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^m + (\sigma_2 - \sigma_3)^m + (\sigma_3 - \sigma_1)^m = 2Y^m \quad (2.26)$$

Burada Y tek eksenli akma gerilmesidir ve $1 < m < \infty$ aralığındadır. $m=1$ için ifade Tresca akma kriterine, $m=2$ için ise von Mises akma kriterine dönüşmektedir.

2.3.5. Anizotropi kavramı

Sac metalleri, kristal yapıları ve haddeleme prosesinin karakteristiğinden dolayı anizotropi özelliği taşırlar. Bu nedenle mekanik özellikleri yöne göre farklılıklar gösterir. Anizotropi ile plastik davranışlarındaki yöne bağlı değişim Lankford parametresi ya da anizotropi katsayısı denilen terimle ifade edilmektedir [54]. Bu parametre sac metal malzemenin tek eksenli çekme deneyi ile tespit edilebilmektedir.

$$r = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_3} \quad (2.27)$$

Burada ϵ_2 ve ϵ_3 sırasıyla genişlik ve kalınlık yönündeki gerinim değerleridir. Bu orantı ifadesi ile anizotropi, aynı zamanda malzemenin incelmeye karşı gösterdiği direnç olarak yorumlanmaktadır. Denklem (2.27)'de gerinim değerleri yerine yazılırsa,

$$r = \frac{\ln \frac{b}{b_0}}{\ln \frac{t}{t_0}} \quad (2.28)$$

olur. Burada b_0 ve b başlangıç ve anlık genişlik değerleri, t_0 ve t ise başlangıç ve anlık kalınlık değerleridir. Malzeme kalınlığı, genişlik ölçüsüyle karşılaştırıldığında oldukça küçük kaldığından bu iki değer ölçümlerindeki hatalar da farklılıklar gösterecektir [31]. Benzer hata oranlarının yakalanabilmesi adına anizotropi eşitliği uzunluk ve genişlik cinsinden yazılır. Hacmin korunumu prensibi göz önüne alındığında,

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0 \quad (2.29)$$

yazılabilir. Böylece,

$$r = -\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \quad (2.30)$$

elde edilir. Denklem (2.30) aşağıdaki şekilde düzenlenebilir.

$$r = \frac{-\ln \frac{b}{b_0}}{\ln \frac{l}{l_0} + \ln \frac{b}{b_0}} \quad (2.31)$$

Burada l_0 ve l başlangıç ve anlık boylardır. Denklem (2.31) düzenlenirse,

$$r = \frac{\ln \frac{b}{b_0}}{\ln \frac{l_0 b_0}{lb}} \quad (2.32)$$

elde edilir.

Bu ifade anizotropi katsayısının belirlenmesi için pratikte kullanılan ifadedir. Anizotropi değerleri çekme deneyinden genellikle %20 uzama sonrasında alınan ölçümlerle tespit edilir [54].

Literatürde yapılan deneyler r değerinin de yöne göre değiştiğini göstermektedir. Deneysel çalışmalar genellikle hadde yönünde, hadde yönüne dik yönde ve hadde yönüne 45^0 yönünde olmak üzere üç farklı yön için gerçekleştirilir. Üç yönde de elde edilen anizotropi değerlerinin ortalaması normal anizotropi olarak adlandırılır ve Denklem 2.33 ile hesaplanabilir.

$$r_n = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \quad (2.33)$$

Normal anizotropinin hadde açısına göre değişimi düzlemsel anizotropi olarak adlandırılır ve aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$\Delta r = \frac{r_0 + r_{90} - 2r_{45}}{2} \quad (2.34)$$

2.3.6. Anizotropik malzeme ve izotrop pekleşme kabulü yapan plastisite modelleri

Hill, 1948 yılında von Mises kriterini genelleştirerek bir anizotropik akma kriteri geliştirmiştir [55]. Malzemenin üç ortogonal simetri düzleminde anizotropiye sahip olması gerekmektedir. Kriter bir ikinci dereceden bir fonksiyon olarak Denklem 2.35'teki gibi yazılabilir.

$$2f(\sigma_{ij}) \equiv F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{zx}^2 + 2N\tau_{xy}^2 = 1 \quad (2.35)$$

Burada f , akma fonksiyonu, F , G , H , L , M , N malzemenin anizotropi parametreleri ve x , y , z asal anizotropik eksenlerdir.

Düzlem gerilme durumu için ise Hill 48 akma kriteri aşağıdaki hali alır.

$$2f(\sigma_{ij}) = (G + H)\sigma_x^2 - 2H\sigma_x\sigma_y + (H + F)\sigma_y^2 + 2N\tau_{xy}^2 = 1 \quad (2.36)$$

Sac metal formlama yöntemlerinde, Lankford parametreleri r_0 , r_{45} , r_{90} ve asal anizotropik yönlerdeki akma gerilmeleri $X=\sigma_0$, $Y=\sigma_{90}$ olarak isimlendirilir. Lankford parametreleri ve F, G, H katsayıları arasındaki ilişki Denklem 2.37'deki gibi gösterilebilir.

$$r_0 = \frac{H}{G}, \quad r_{90} = \frac{H}{F}, \quad \sigma_{45} = \frac{H}{F+G} - \frac{1}{2} \quad (2.37)$$

Akma gerilmeleri ve Lankford parametreleri arasındaki ilişki,

$$\frac{\sigma_0}{\sigma_{90}} = \sqrt{\frac{r_0(1+r_{90})}{r_{90}(1+r_0)}} \quad (2.38)$$

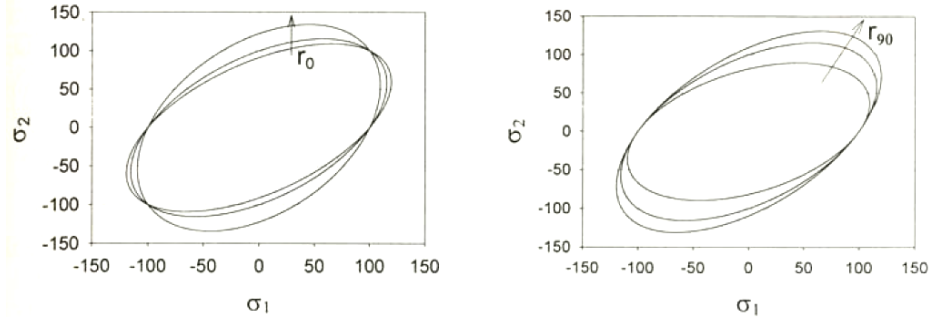
şeklinde yazılabilir. Gerilme tensörünün asal eksenlerinin, anizotropik eksenlerle çakışık olduğu durumda ($\sigma_x=\sigma_1$, $\sigma_y=\sigma_2$, $\tau_{xy}=0$), Hill 48 akma kriteri asal gerilmelere bağlı olarak aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\sigma_1^2 - \frac{2r_0}{1+r_0}\sigma_1\sigma_2 + \frac{r_0+r_{90}}{r_{90}(1+r_0)}\sigma_2^2 = \sigma_0^2 \quad (2.39)$$

Ya da Denklem (2.38)'e göre,

$$\sigma_1^2 - \frac{2r_0}{1+r_0}\sigma_1\sigma_2 + \frac{r_0+r_{90}}{r_{90}(1+r_0)}\sigma_2^2 = \frac{r_0(1+r_{90})}{r_{90}(1+r_0)}r_{90}^2 \quad (2.40)$$

yazılabilir. Denklem (2.39) ve (2.40) düzlem gerilme durumu için akmayı tanımlar ve r_0 - r_{90} parametrelerine bağlı bir elips ailesini temsil eder. Bu parametrelerin akma yüzeyine etkisi Şekil 2.12'de verilmiştir.

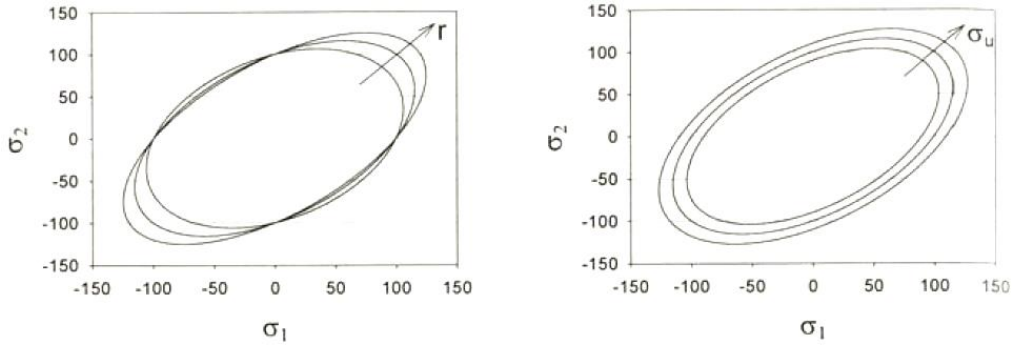


Şekil 2.12. r_0 ve r_{90} parametrelerinin akma yüzeyine etkisi [54]

Malzemenin yalnızca normal anizotropi ($r_0=r_{90}=r$) göstermesi durumunda Denklem (2.38) $\sigma_0=\sigma_{90}$ durumunu gösterir.

$$\sigma_1^2 - \frac{2r}{1+r} \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2^2 = \sigma_u^2 \quad (2.41)$$

Burada σ_u tek eksenli akma gerilmesidir. r ve σ_u 'nun akma yüzeyine etkisi Şekil 2.13'te verilmiştir.



Şekil 2.13. r_u ve σ_u parametrelerinin akma yüzeyine etkisi [54]

Denklem (2.41) iki eksenli çekme durumu ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_b$) için yazılabilir.

$$\sigma_b = \sigma_u \sqrt{\frac{1+r}{2}} \quad (2.42)$$

Burada σ_b iki eksenli akma gerilmesidir. İzotrop bir malzeme için ($r=1$), Denklem (2.42) von Mises kriterine dönüşmektedir.

Anizotropik malzemeler için sunulan bir başka akma kriteri Barlat ve Lian [56] tarafından sunulmuştur. Bunun öncesinde, Barlat ve Richmond [57], Hosford akma kriterinin izotrop malzemeler için daha genel bir halini asal eksenlerle çakışık olma zorunluluğu bulunmayan bir x, y, z koordinat sisteminde önermişlerdir.

$$f = |k_1 + k_2|^M + |k_1 - k_2|^M + |2k_2|^M = 2\sigma_e^M \quad (2.43)$$

Burada k_1 ve k_2 gerilme tensörünün invariantları ve M , Hosford akma kriterindeki üstelle (m) aynı etkide olan bir üsteldir.

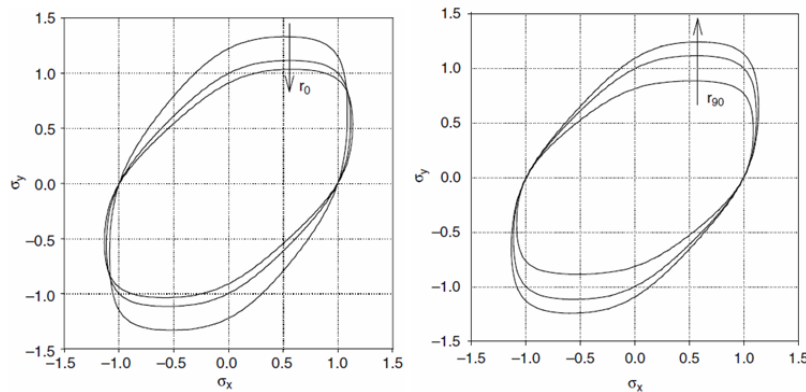
1989 yılında Barlat ve Lian [56], Denklem (2.43)'ün düzlemsel anizotropiyi içerecek şekilde genelleştirmesi ile aşağıdaki akma fonksiyonunu önermişlerdir.

$$f = a|k_1 + k_2|^M + a|k_1 - k_2|^M + c|2k_2|^M = 2\sigma_e^M \quad (2.44)$$

Burada k_1 ve k_2 parametreleri aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$k_1 = \frac{\sigma_{11} + h\sigma_{22}}{2}, \quad k_2 = \left[\left(\frac{\sigma_{11} - h\sigma_{22}}{2} \right)^2 + p^2\sigma_{12}^2 \right]^{1/2} \quad (2.45)$$

a, c, h ve p parametreleri Lankford parametrelerine bağlı katsayılardır. r_0 ve r_{90} parametrelerinin Barlat-89 akma yüzeyine etkileri Şekil 2.14'te verilmiştir.



Şekil 2.14. r_0 ve r_{90} parametrelerinin Barlat-89 akma yüzeyine etkisi [31]

Barlat akma kriteri genellikle alüminyum alaşımlarından yüksek anizotropiye sahip olan malzemeler için kullanılır. Bu kriterin dezavantajı ise iki eksenli yükleme durumları için hassas sonuç verememesidir.

2.3.7. Kinematik pekleşme kabulü yapan plastisite modelleri

Bir çok kinematik pekleşme modeli akma yüzeyinin yalnızca ötelenmesini tanımlamaktadır [31]. Chaboche [58] modelinde nonlinear izotrop ve kinematik pekleşmenin kullanımı ile karışık pekleşme kuralını geliştirmiştir. Akma kriteri aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$f = \sqrt{\frac{3}{2}} \|\mathbf{S} - \alpha\| - R - \sigma_0 = 0 \quad (2.46)$$

Öteleme gerilmesi ise Denklem 2.47'deki gibi ifade edilebilir.

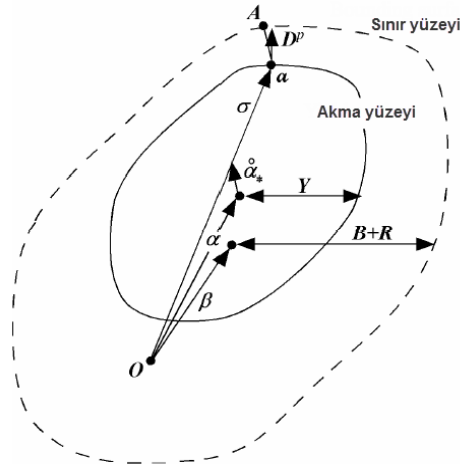
$$\dot{\alpha} = c \left(\frac{2}{3} a \dot{\epsilon}_p - \alpha \dot{p} \right) \quad (2.47)$$

Pekleşmenin izotrop kısmı yazılırsa,

$$\dot{R} = b(Q - R)\dot{p} \quad (2.48)$$

elde edilir. Burada, c, a, b ve Q malzeme sabitleridir.

Bir diğer kinematik pekleşme modeli ise Yoshida-Uemori [59] tarafından sunulmuştur. Chaboche modelini daha hassas tahminler yapabilecek şekilde geliştirmişlerdir. Bu teori pekleşme kuralını tanımlayan iki yüzeye ihtiyaç duyar, bunlar; akma yüzeyi ve sınır yüzeyidir. Formlama işlemlerinde, akma yüzeyi boyut olarak değişmez fakat deformasyonla akma yüzeyinin merkez noktası hareket eder, sınır yüzeyi ise hem şekil olarak hem de konum olarak değişir.



Şekil 2.15. İki yüzeyli modelin şematik gösterimi [47].

Şekil 2.15'te iki yüzeyli kinematik modelin şematik gösterimi görülmektedir. Burada, "O" akma yüzeyinin merkez noktasıdır, α_* , akma yüzeyinin mevcut durumdaki merkezidir ve α ise sınır yüzeyin merkezidir. β , iki yüzeyin merkez noktaları arasındaki ilişkiyi temsil etmektedir. Y , akma yüzeyinin boyutudur ve deformasyon süresince değişmemektedir. $B+R$, sınır yüzeyinin boyutunu temsil etmektedir, R izotrop pekleşme ile ilişkilidir.

$$\alpha_* = \alpha - \beta$$

$$\alpha_* = c \left[\left(\frac{a}{Y} \right) (\sigma - \alpha) - \sqrt{\frac{a}{\alpha_*}} \alpha_* \right]^{-p}$$

$$a = B + R - Y$$
(2.49)

Şekil 2.16'da görülen sınır yüzeyinin boyut ve konum değişimi aşağıdaki şekilde tanımlanabilir.

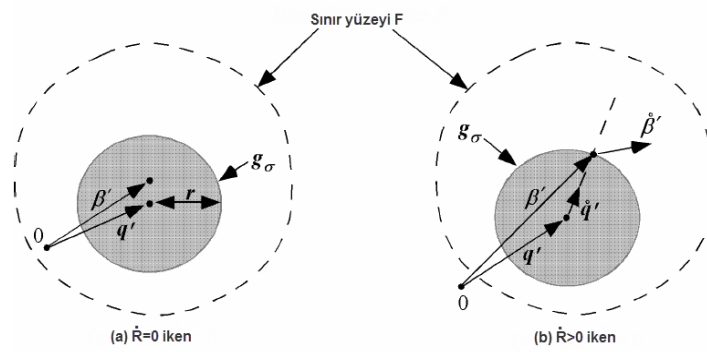
$$\dot{R} = k(R_{\text{sat}} - R) \dot{\varepsilon}^p$$

$$\dot{\beta}' = k \left(\frac{2}{3} bD - \beta' \dot{\varepsilon}^p \right)$$

$$\sigma_{\text{sını}} = B + R + \beta$$
(2.50)

Yoshida'nın modelinde yük boşaltma sırasında deformasyon pekleşmesi durgunluğu söz konusudur ve aşağıdaki şekilde tanımlanabilir.

$$\begin{aligned} g_{\sigma}(\sigma', q', r') &= \frac{3}{2}(\sigma' - q') : (\sigma' - q') - r'^2 \\ \dot{q}' &= \mu(\dot{\beta}' - q') \\ r &= h\Gamma, \Gamma = \frac{3(\beta' - q') : \beta'}{2r} \end{aligned} \quad (2.51)$$

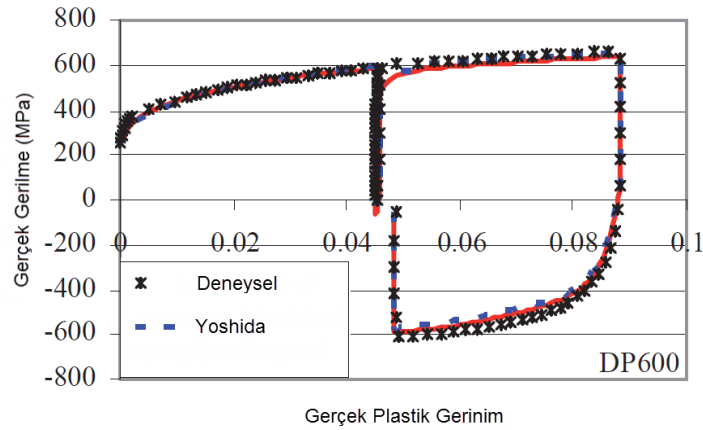


Şekil 2.16. Sınır yüzeyi [47]

Bauschinger etkisi ile elastisite modülü de değişim göstermektedir ve bu değişim Yoshida modeli ile tanımlanabilmektedir. Elastisite modülü, efektif gerininin bir fonksiyonu olarak tanımlanmıştır [47].

$$E = E_0 - (E_0 - E_A)(1 - \exp(-\zeta \bar{\epsilon})) \quad (2.52)$$

Yoshida nonlineer pekleşme modeli Bauschinger etkisini ve sac metal formlama işlemlerindeki malzeme davranışını tanımlamakta başarılı bir modeldir. Yeni nesil yüksek mukavemetli çelikler için de başarılı sonuçlar verebilmektedir. Şekil 2.17'de Yoshida kinematik pekleşme modeli ile tahmin edilen bir malzeme davranışı gerilme-gerinim eğrisi üzerinde gösterilmiştir.

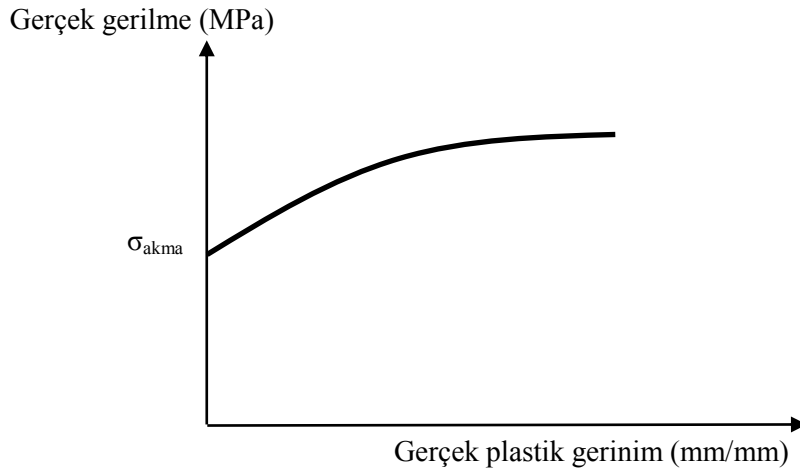


Şekil 2.17. Yoshida nonlineer kinematik pekleşme modeli ile malzeme davranışının tahmini [60]

2.3.8. Plastisite model parametrelerinin belirlenmesi

Sac metal formlama proseslerinde malzeme davranışının tanımlanabilmesi için kullanılan plastisite modellerinde malzemeye ait mekanik özelliklere ihtiyaç duyulmaktadır. Mekanik özelliklerin tespit edilebilmesi için çekme deneyi, yorulma deneyi ve kayma deneyi en sık kullanılan deneylerdir. Bu deneyler arasından çekme deneyi makine mühendisliği uygulamalarının birçoğuna rehberlik eden ve sıkça kullanılan bir test yöntemidir. Deney iki çene arasına yerleştirilen değişken standartlardaki numunenin tek eksende çekilmesi ile gerçekleştirilmektedir. Deneyin ardından zamana bağlı kuvvet ve uzama verileri deney cihazından alınmaktadır. Alınan bu veriler çekme deneyinin ham verileridir. Elde edilen bu veriler kullanılarak malzemeye ait mekanik özellikler tespit edilmektedir. Çekme deney numuneleri belirli standart ölçülerde kullanılmaktadır, sac metal formlama işlemleri için yapılan çekme deneylerinde genellikle ASTM E-8 [61] standartlarına göre üretilen deney numuneleri kullanılmaktadır.

Akma gerilmesi ve elastisite modülü dışında tasarım aşamasında malzeme davranışının tanımlanmasında kullanılan en önemli parametreler akma eğrisi ile elde edilmektedir. Akma eğrisinin belirlenebilmesi için ise malzemenin gerçek gerilme ve gerçek gerinim değerlerinin elde edilmesi gerekmektedir. Akma eğrisi tek eksenli çekme deneyi için plastik davranışı modellemektedir. Çekme deneyinden elde edilen örnek bir akma eğrisi Şekil 2.18’de verilmiştir.



Şekil 2.18. Çekme deneyinden elde edilen bir akma eğrisi

Malzemenin akma eğrisini ve plastik davranışını tanımlayan modeller bulunmaktadır. İlk olarak 1909 yılında Ludwik [62] üstel bir fonksiyon olarak pekleşme davranışını aşağıdaki şekilde tanımlamıştır.

$$\bar{\sigma} = \sigma_{akma} + K\bar{\epsilon}^{-n} \quad (2.53)$$

1945 yılında ise Holloman [63] bu ifadeyi Denklem 2.54'teki haliyle basitleştirmiştir.

$$\sigma = K\epsilon^n \quad (2.54)$$

Burada K malzemenin mukavemet katsayısını ve n ise pekleşme üstelini temsil etmektedir. K ve n değerlerinin hesaplanmasında genellikle Holloman ifadesi lineerleştirilmektedir. Holloman bağıntısının logaritması alındığında,

$$\log \sigma_g = \log K + n \log \epsilon_g \quad (2.55)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifade lineer bir doğru denklemdir. Çekme eğrisinin akma ve çekme gerilmeleri arasındaki kısmı logaritmik olarak çizildiğinde K ve n değerleri tespit edilebilmektedir.

Ludwik ve Holloman modelleri dışında Krupkowski [64] ve sonrasında Swift [65] Holloman denkleminde başlangıç gerinim değeri de ekleyerek aşağıdaki forma getirmişlerdir.

$$\sigma = K(\varepsilon + \varepsilon_0)^n \quad (2.56)$$

1948 yılında ise Voce [66] üstel bir fonksiyona dayalı bir pekleşme kuralı önermiştir.

$$\sigma = A - B \exp(-C\varepsilon) \quad (2.57)$$

Bauschinger etkisi sonucunda akma gerilmeleri ve elastisite modüllerinde meydana gelen değişimi elde etmek için ise yükleme-boşaltma deneyleri yapılmaktadır. Deneyler sonrasında elde edilen gerilme-gerinim eğrilerinde çekme deneyine benzer şekilde elastisite modülleri hesaplanabilmekte ve elastisite modülünün değişimi tespit edilebilmektedir. Bu konu hakkında daha detaylı bilgi tez çalışmasının 6. Bölümünde yer almaktadır.

2.4. Değerlendirme

Tez çalışmasının bu bölümünde anlatılanlar ışığında sac metal formlama proseslerinde şekil bozukluğu kavramının ve bu kavramın modellenmesinin önemi açıkça görülmektedir. Bu nedenle endüstride prosesi tasarlayan metot mühendisleri hem sonlu elemanlar modellemesine hem de malzeme davranışının tanımlanmasına hakim olmalıdır.

Sonlu elemanlar modelleme adımında ağ yapısının oluşturulması ve sonlu elemanlar parametrelerinin seçimi kritik rol oynamaktadır. Sac metal formlama işlemlerinin sonlu elemanlar modellemesinde genellikle kabuk elemanlar kullanılmakta ve sac açılımının ağ yapısı kalıp elemanlarına göre daha hassas şekilde oluşturulmaktadır. Kabuk eleman formülasyonu çeşitlilik göstermekte ve ilgili proses için en uygun formülasyonun belirlenmesi gerekmektedir. Benzer durum integrasyon nokta sayısı seçimi için de geçerlidir. Sonlu elemanlar parametrelerinin seçimi simülasyon sonuçlarını doğrudan etkileyecektir. Tez çalışması kapsamında parametrelerin

belirlenmesi aşamasında deneysel tasarım yöntemi kullanılmış ve deneme-yanılma sürecinde yaşanan zaman kayıpları en aza indirilmiştir. Bu konu hakkında daha geniş bilgi tez çalışmasının 5. Bölümünde yer almaktadır. Aynı zamanda sınır koşulları verilirken kalıp takım geometrisi dikkate alınarak simetri koşulları tanımlanmalıdır. Şekil bozukluğunun elde edilmesi adımı ise geri esneme davranışının tahmininde parça üzerinde uzayda tutulacak noktalar dikkatle seçilmelidir.

Malzeme davranışının tanımlanması sonlu elemanlar analizlerinde önemli rol oynayan bir diğer adımdır. Bu kapsamda malzemenin plastisite modellemesinin hassas bir şekilde gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Tez çalışmasının bu bölümünde anlatılanlar ışığında farklı kabullere sahip birçok malzeme modelinin bulunduğu görülmektedir. Bu nedenle, ilgili proses koşulları ve kullanılan malzeme dikkate alınarak en hassas sonuçların elde edileceği malzeme modelinin tercih edilmesi gerekmektedir. Malzeme modeli seçimi sonrasında malzemeye ait modelleme işleminde ihtiyaç duyulan parametrelerin elde edilmesi gerekmektedir. Özellikle şekil bozukluğu üzerinde oldukça etkili olan elastisite modülü ve akma gerilmesi kavramları doğru bir şekilde hesaplanmalıdır. Tez çalışması kapsamında bu hassasiyeti elde edebilmek amacıyla malzeme parametreleri eğri uydurma yöntemi ile hesaplanmıştır. Bu konu hakkında detaylı bilgi tez çalışmasının 6. Bölümünde yer almaktadır. Kinematik pekleşme malzeme modellerinde elastisite modüllerinin değişimi de dikkate alınabildiğinden bu değişimi tanımlayabilmek adına yükleme-boşaltma deneyleri yapılmakta ve çekme deneyine benzer şekilde elastisite modülleri hesaplanabilmektedir.

Sonuç olarak gerek sonlu elemanlar modellemesi gerekse de malzemelerin plastisite modellemesi şekil bozukluğunun tahmini açısından büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle bu adımlara ait parametre seçimlerinde metod mühendisleri hassas bir yaklaşım sergilerse, telafili kalıp yüzey tasarımları daha düşük maliyetlerle gerçekleştirilebilir ve geriye dönük iyileştirmelere ihtiyaç en aza indirildiğinden işlem zamanından da tasarruf edilebilmektedir.

BÖLÜM 3. FORM KALIPLARININ TASARIMINDA GERİ ESNEME TELAFİSİ

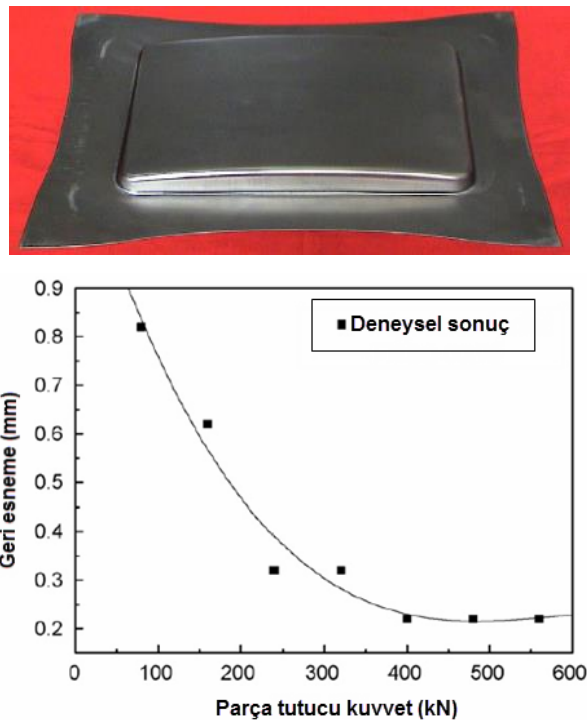
Tez çalışmasının bu bölümünde, geri esnemenin sac metal formlama işlemlerinde tasarım aşamasında telafi edilmesi için kullanılan yöntemler anlatılmıştır. Bu kapsamda öncelikle proses parametrelerinin geri esneme davranışı üzerine etkisi incelenmiştir. Proses parametrelerinden geri esnemeye etki ağırlığı olarak diğer parametrelerden daha üstün olan parça tutucu kuvveti ve sürtünme katsayısı üzerinde durulmuştur. Sonrasında telafi prosesinin kalıp yüzeylerinin geri esneme dağılımına göre tasarlanarak gerçekleştirildiği İleri Esnetme ve Deplasman Ayar yöntemlerinin teorileri anlatılmıştır. Son bölümde ise bu iki yöntemin literatürde farklı uygulamalar üzerinde kullanıldığı durumlarla birlikte karşılaştırılması yapılmıştır.

3.1. Proses Parametrelerinin Geri Esneme Davranışı Üzerine Etkisi

Sac metal formlama proseslerinde malzemenin mekanik ve fiziksel özelliklerinin dışında geri esneme davranışı üzerinde proses koşullarının da önemli etkisi bulunmaktadır. Proses parametreleri olarak literatürde genellikle kalıp yarıçapının, kalıp açıklığının, kalıp takımının sac malzeme üzerinde bekleme süresinin geri esneme üzerine etkileri incelenmektedir [67-69]. Fakat bu parametreler genellikle benzetim kalıpları ve basit geometrili işlemler için uygulanabilir olmaktadır. Endüstriyel proseslerde parça geometrileri benzetim testlerine göre oldukça komplekstir, dolayısı ile karmaşık bir proseste yalnızca kalıp yarıçapı ile geri esneme davranışının incelenmesi yeterli olmamaktadır. Parça tutucu kuvvet ve sürtünme koşulları endüstriyel uygulamalar açısından kalıp geometrisine göre daha kolay ve daha düşük maliyetlerle değiştirilebilmektedir. Bu nedenle geri esneme telafisi için öncelikle proses parametreleri incelenmektedir [70-84]. Proses parametrelerinin etkileri de tasarım aşamasında ve bilgisayar ortamında gerçekleştirilmektedir. Fakat parametrelerin etkilerini belirlemek adına benzetim testlerinde deneme-yanılma

yöntemiyle proses parametrelerinin geri esneme davranışı üzerindeki etkisi deneysel olarak tespit edilebilmektedir.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde parça tutucu kuvvetin artması ile geri esnemenin azaldığı görülmektedir [85]. Şekil 3.1’de bir panel çekme işleminde, geri esnemenin parça tutucu kuvvetle değişimi görülmektedir.. Bu durum artan gerilmeler nedeniyle formlama sırasındaki bükme momentinin azalması ve sac metal malzemede daha fazla plastik deformasyon gerçekleşmesinden kaynaklanmaktadır [86-88]. Yine literatürde sürtünme katsayısının geri esneme üzerine etkisi de incelenmiştir [86]. Genellikle artan sürtünme ile geri esnemenin azaldığı tespit edilmiştir [85]. Bu durumun nedeni artan sürtünmenin malzemede gerdirme etkisi yapması ve dolayısı ile de plastik deformasyon miktarını artırması olarak söylenebilir. Sürtünme katsayısının belirlenmesi oldukça zor olmakla birlikte çeşitli deneylerle elde edilebilmektedir [89]. Sonlu elemanlar analizleri açısından da sürtünme katsayısının hassas olarak elde edilmesi zor bir prostestir. Tüm kalıp takımları ve sac malzeme arasında temas bulunduğu ve temas sırasında her noktadaki sürtünmenin eşit olmadığı düşünüldüğünde problemin karmaşıklığı göz önüne çıkmaktadır.



Şekil 3.1. Bir panel çekme prosesi için sürtünme katsayısının formlama sonrası geri esneme üzerine etkisi [85].

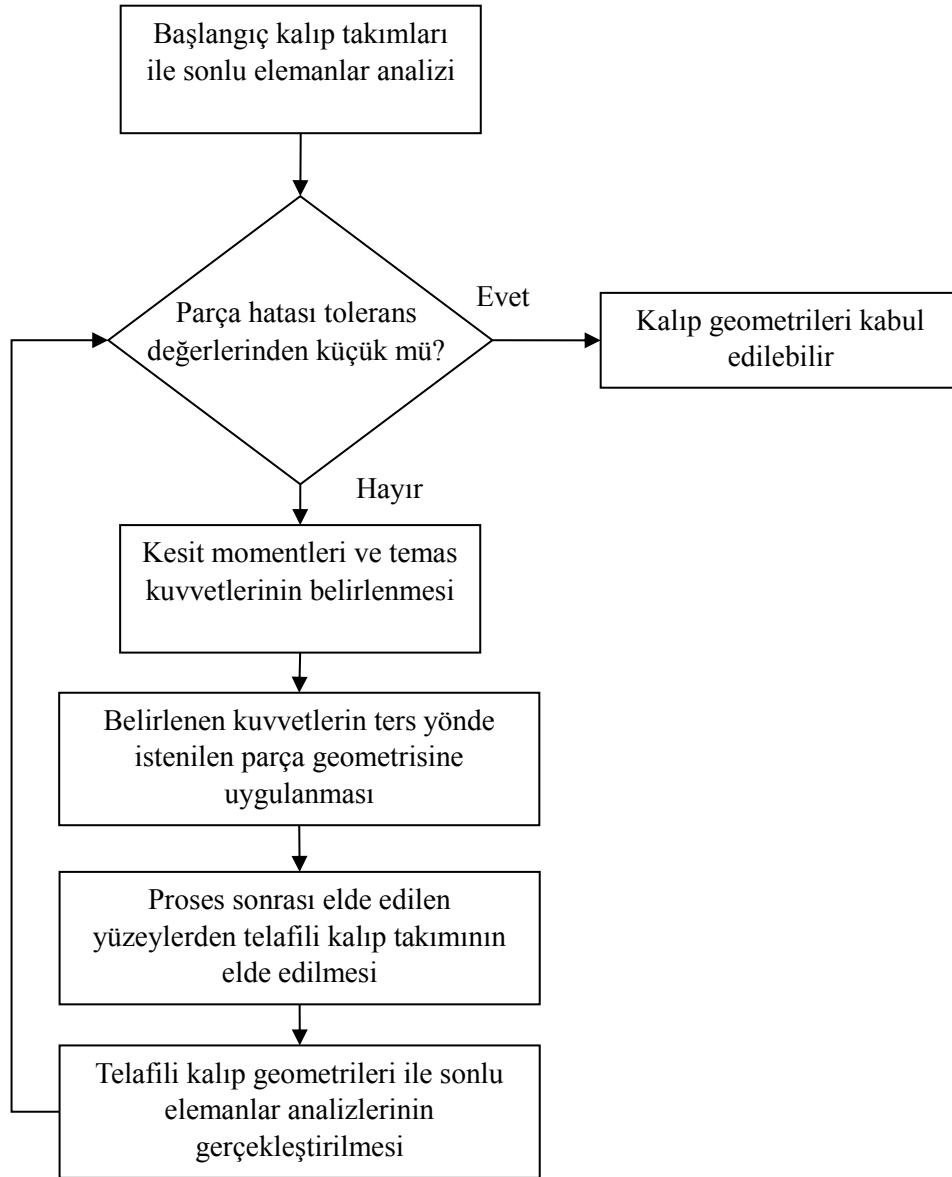
Literatürde proses parametreleri ile ilgili çalışmalar çoğunlukla deneysel olsa da proses tasarımı açısından optimum proses parametrelerinin belirlenmesi bilgisayar ortamında gerçekleştirilmektedir [90]. Bu kapsamda optimizasyon yöntemleri ve sonlu elemanlar analizleri en sık kullanılan yöntemlerdir. Fakat parça karmaşıklığı ve kullanılan malzeme özellikleri nedeniyle endüstriyel uygulamalarda yalnızca proses parametreleri ile geri esneme telafisi istenilen toleranslarda gerçekleştirilememektedir. Geri esneme azalmasına rağmen presten çıkan parça geometrileri belirlenen tolerans değerlerinin dışında olmaktadır [91]. Bu nedenle geri esneme telafisi için daha etkin bir yöntem olarak kalıp yüzeylerinin geri esneme dağılımına göre geliştirilmesi gerekmektedir.

3.2. Kalıp Yüzeylerinin Geri Esneme Dağılımına Göre Geliştirilmesi

Sac metal formlama proseslerinde metot ve tasarım mühendisleri, kalıp yüzeylerini geliştirirken formlama sırasında ve sonrasında yaşanabilecek problemleri ve ölçü toleranslarını dikkate almak durumundadırlar. Bu kapsamda geri esneme dağılımı sonlu elemanlar analizleri ile tahmin edilerek kalıp yüzeyleri istenilen toleransları sağlayan parça geometrilerini verebilecek şekilde tasarlanmaktadır. Geometri ve proses karmaşıklıkça telafi prosesleri de zorlaşmaktadır. Örneğin, karmaşık geometri alüminyum panellerin formlama proseslerindeki geri esneme telafileri yalnızca kalıp alıştırmalarıyla yapıldığında yaklaşık 6 ay sürmektedir [92]. Bu nedenle geri esneme telafisi için bir tasarım yöntemine ihtiyaç vardır. Bu kapsamda ileri esnetme ve deplasman ayar yöntemleri en sık kullanılan yöntemlerdir.

3.2.1. İleri esnetme yöntemi

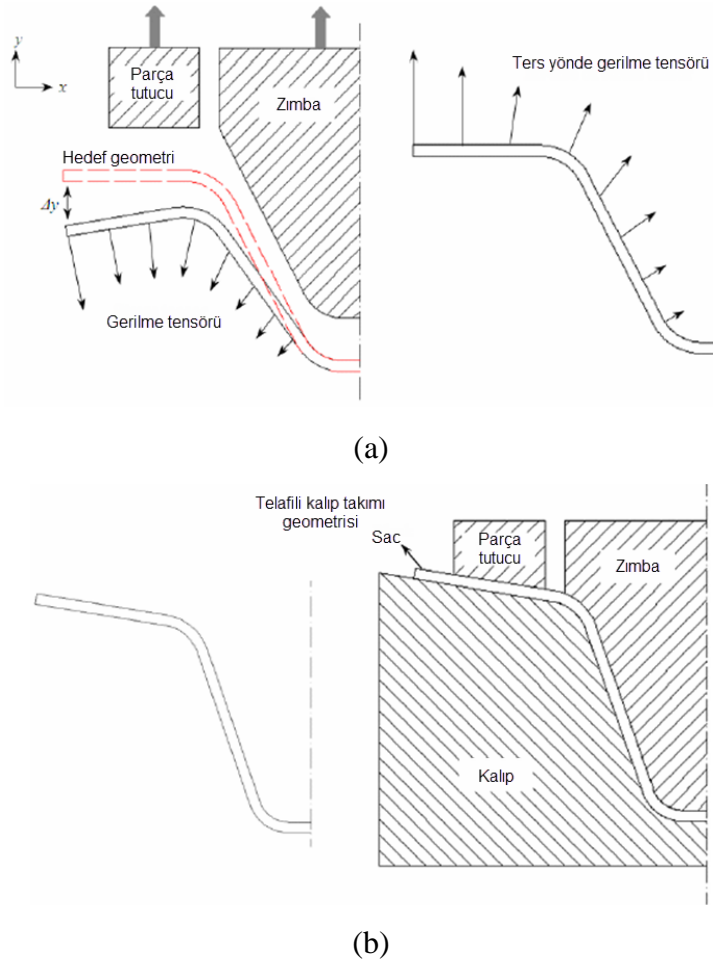
İleri esnetme yöntemi kalıp geometrisini malzemenin geri esneme davranışına göre telafi etmeyi amaçlamaktadır. Bu yöntemde formlama durumunda henüz kalıp takımı parça üzerinde iken temas kuvvetleri ve kesit momentleri elde edilmektedir. Sonrasında istenilen parça geometrisi üzerine bu momentler ters yönde uygulanmaktadır ve bu momentlerin etkisi sonucunda elde edilen yeni geometri telafi edilmiş kalıp geometrisi olarak kullanılmaktadır [93]. İleri esnetme yönteminin iş akış şeması Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. İleri esnetme yöntemi iş akış şeması

Literatürde, Karafillis ve Boyce [94], ileri esnetme yöntemini ilk olarak iki farklı aksenal simetrik parça geometrisine uygulamışlardır ve formlama sonrasındaki şekil bozukluklarını %15 seviyesine indirmişlerdir. Çalışmalarında, geri esneme miktarları parça tutucular kaldırılmadan ölçülmüştür dolayısı ile deformasyonlar gerdirme yükü altındadır ve geri esneme davranışı da oldukça sınırlı oluşmuştur. Sonrasında Karafillis ve Boyce, bir başka çalışmalarında [93], yöntemi 3-D geometriler için geliştirmişlerdir. Burada geri esneme artık parça tutucular da kaldırıldıktan sonra tespit edilmiştir. Birkaç iterasyon sonrasında elde edilen kalıp yüzeyleri ile istenilen parça geometrisine ulaşılmış ve sonuçlar deneysel çalışmalarla doğrulanmıştır.

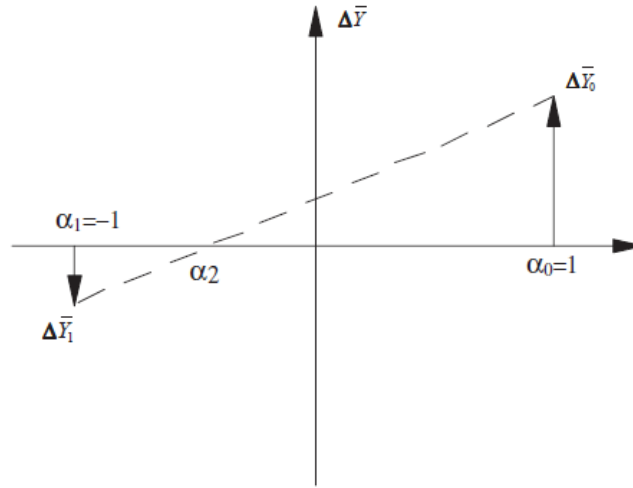
İleri esnetme yöntemi, iteratif bir yöntemdir. Telafi edilmiş kalıp geometrisi ile elde edilen geri esneme miktarı için yeniden temas kuvvetleri hesaplanır ve yine ters yönde uygulanarak ikinci telafili kalıp yüzeyi elde edilir. Şekil bozukluğu tolerans boyutlarına gelene kadar bu süreç devam etmektedir. Yöntemin şematik gösterimi Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3. İleri esnetme yönteminin şematik gösterimi (a) Gerilme tensörünün ters yönde uygulanması (b) Elde edilen telafili kalıp takımı geometrisi [95]

Karafillis ve Boyce ileri esnetme prosesinde telafi sırasında temas kuvvetlerini kullanırken, literatürde bu durumun farklı varyasyonları da sunulmuştur [93, 96-98]. Bu varyasyonlarda, formlama sonrası iç kuvvetler, istenilen parça geometrisine ters yönde uygulanmıştır. Bu yöntem, dış temas kuvvetlerinin uygulanmasıyla elde edilen kalıp geometrisine benzer bir geometri vermektedir ancak potansiyel burkulma riski elimine edilmektedir. İç kuvvetlerin bu şekilde kullanımı, mevcut sonlu elemanlar yazılımlarının birçoğunun kodlarına müdahale etme imkânı bulunmadığından,

yöntemi pratik uygulamalarda kullanılabilir olmaktan çıkarmıştır. Dolayısı ile iç kuvvetlerin bilgisayar ortamında istenilen hassasiyette tespiti mümkün olmamaktadır. Bir diğer varyasyon, kuvvetlerin skaler bir katsayı olan α ile kullanımudur. Bu yöntemde, eğer $\alpha=1$ olursa, geri esneme davranışı temsil edilir, $\alpha=-1$ olursa ileri esnetme yöntemi uygulanmış olunur. α değeri, iterasyonlar süresince basit bir interpolasyonla optimize edilebilmektedir. Bu durum Şekil 3.4'te verilmiştir. Burada, $\Delta\bar{Y}_0$ geri esneme sonrası başlangıç hatasıdır ve $\Delta\bar{Y}_1$ ise ileri esnetme yönteminde bir iterasyon sonrası elde edilen kalıp geometrisinin hatasıdır. Sonraki iterasyon için kullanılacak α değeri yine Şekil 3.4'te gösterilen interpolasyonla elde edilebilmektedir [99].

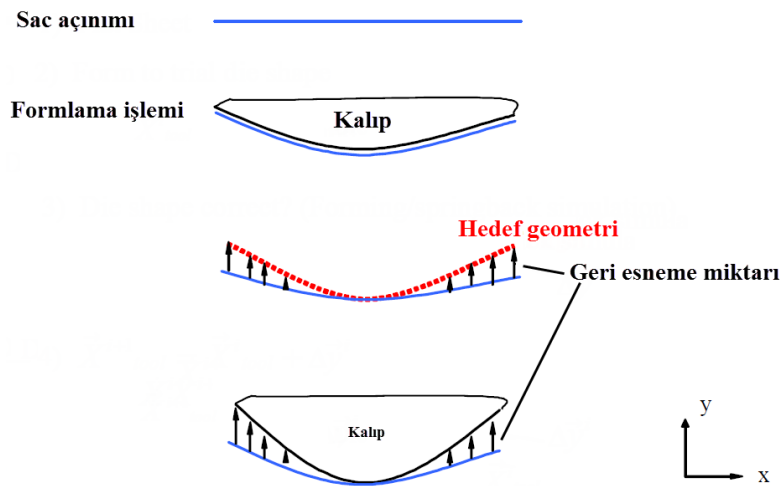


Şekil 3.4. İleri esnetme yönteminde alfa seçimi için interpolasyon [99].

İleri esnetme yönteminin kompleks üç boyutlu geometrilerde sıkıntılar yaşadığı literatürdeki çalışmalardan [100-101] bilinmektedir. Genellikle geri esneme, yüksek çekme gerilmeleri altında oluşmaktadır, ileri esnetme yöntemi hesaplamalarında, bu gerilmeler ters yönde uygulanacağı için basma gerilmesi olarak parçaya yansımaktadır. Bu durum, telafili geometrinin küçük değişimlere bile hassas olmasına ve bazı durumlarda burkulma yaşanmasına neden olmaktadır [101].

3.2.2. Deplasman ayar yöntemi

Deplasman ayar (DA) yöntemi, kalıp yüzeyini tanımlayan düğüm noktalarının geri esnemeye ters yönde taşınması sonucunda kalıp yüzeylerinin yeniden oluşturulması prensibine dayanmaktadır. DA yöntemi nümerik bir yöntem olduğundan, kullanılabilirliği geri esneme tahmin hassasiyetiyle doğru orantılıdır. DA yöntemi ileri esnetme yönteminden farklı olarak geri esneme sonrası deplasman dağılımına dayalı olarak çalışmaktadır ve prostedeki kuvvetlerle ilgilenmez. Geri esneme miktarı kadar kalıp yüzeyleri geri esnemeye ters yönde yeniden oluşturulurlar. Bu yöntemin şematik gösterimi Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.5. DA yönteminin şematik gösterimi [99]

DA yönteminde, parçanın istenilen geometrisi (formlama yüzeyi) bilinmekle birlikte istenilen geometrinin elde edilebilmesi için gerekli kalıp yüzeyi bilinmemektedir. Telafi adımı için hedef, bu kalıp yüzeyinin tespit edilmesidir. Deplasman ayar yöntemi aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

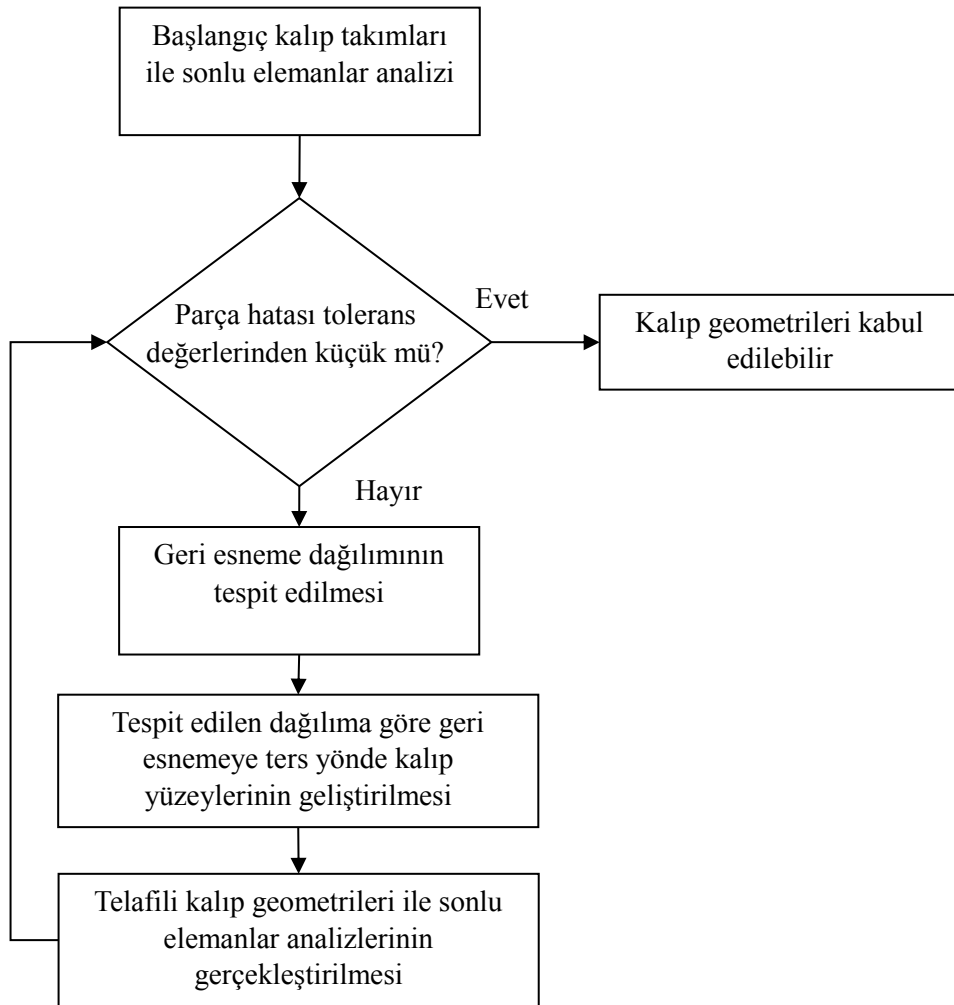
$$C = D - \alpha(S - D) \quad (3.1)$$

Burada C, telafi geometrisini, S, geri esneme geometrisini, D, istenilen parça geometrisini ve α telafi faktörünü temsil etmektedir. Burada telafi faktörü geri esneme telafi miktarını belirleyen parametredir ve genellikle -2.5 – -1.0 aralığında değişmektedir [101]. DA yöntemi de ileri esnetme yöntemine benzer şekilde iteratif

olarak kullanılabilir. Eğer yöntem iteratif olarak kullanılacaksa telafi faktörü tek bir değer yerine dağılım olarak kullanılır [101]. Deplasman ayar yönteminin iteratif kullanımı Denklem 3.2'deki gibi yazılabilir.

$$C^{j+1} = C^j - (S^j - D) \quad (3.2)$$

DA yönteminin iş akış şeması Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6. Deplasman ayar yöntemi iş akış şeması

DA yönteminde telafi faktörü üç farklı şekilde uygulanabilmektedir. Bunlardan birincisi telafi faktörünün (-1) olarak kullanılmasıdır. Bu yöntemde mevcut geri esneme miktarı kadar fakat geri esnemeye ters yönde kalıp yüzeyleri oluşturulmuştur. Burada “1” rakamı telafi ölçөгünü temsil ederken “-“ işareti ise telafi

yönünü temsil etmektedir. İkinci yöntem ise telafi faktörünün ortalama olarak kullanılmasıdır. Burada proses için bir ortalama telafi faktörü hesaplanmaktadır. Ortalama telafi faktörü ($\bar{\alpha}$), parça üzerindeki formlama yönünde meydana gelen şekil bozukluğunun ortalaması olarak hesaplanmaktadır. O halde şekillendirme yönü z, geri esneme miktarı Δz ve düğüm noktası sayısı n alınırsa ortalama telafi faktörü aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta z_i}{n} \quad (3.3)$$

Bir diğer yöntem ise telafi faktörünün dağılım olarak kullanılmasıdır. Böylelikle tek bir katsayısı ile telafi yerine her bir düğüm noktası için farklı telafi faktörleri kullanılmıştır. Telafi faktörü dağılım şeklinde kullanıldığında parçadaki her bir nokta için farklı bir telafi miktarı uygulanır, daha çok geri esneyen noktalar daha fazla, daha az geri esneyen noktalar daha düşük miktarlarda telafi edilirler. Telafi faktörü dağılımı her bir düğüm noktasındaki geri esneme miktarının, parça üzerindeki ortalama geri esneme miktarına oranı ile elde edilmektedir. Telafi faktörünün dağılım olarak kullanılması Şekil 3.7’de gösterilmiştir.

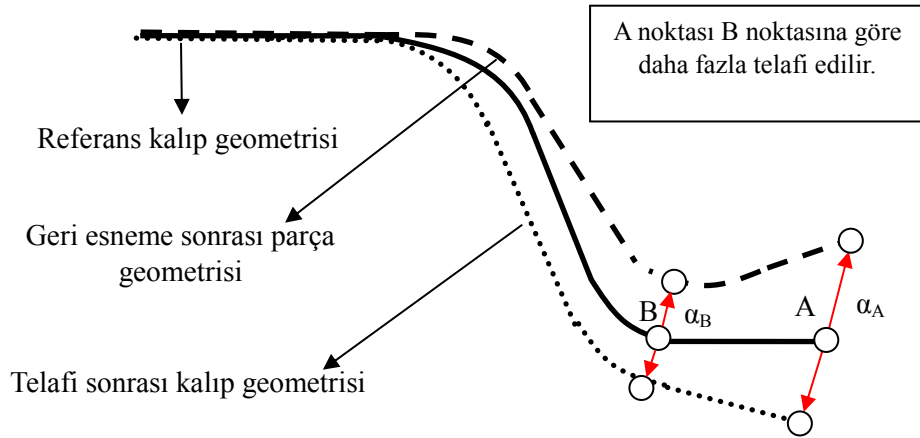
Dağılım telafi faktörü Denklem 3.4’teki gibi yazılabilir.

$$\alpha_d = \frac{\Delta z_i}{\Delta z_{\text{mean}}}, \quad i: 1 \dots n \quad (3.4)$$

Burada Δz_i : İlgili düğüm noktasındaki geri esneme miktarı

Δz_{mean} : Parça üzerindeki ortalama geri esneme miktarı

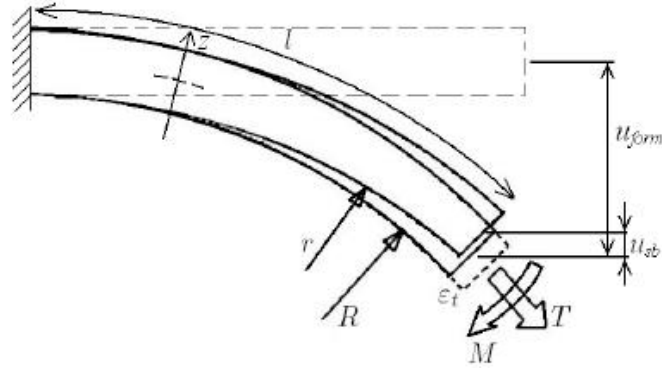
n : Parça üzerindeki düğüm noktası sayısını temsil etmektedir.



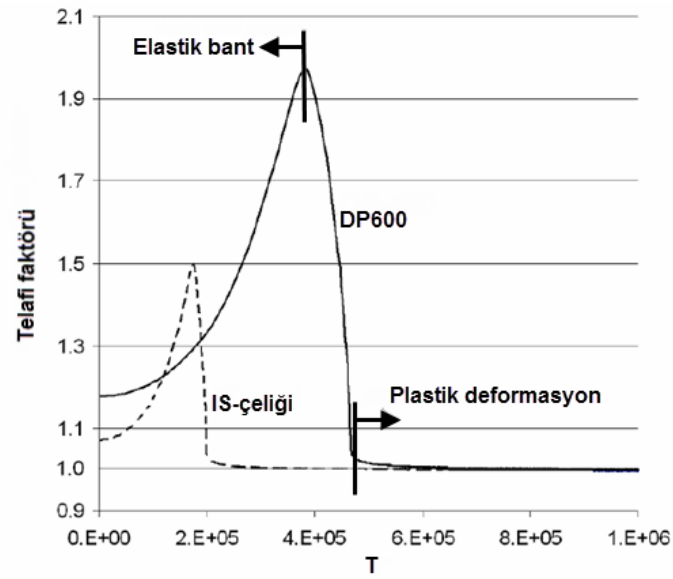
Şekil 3.7. Telafi faktörünün dağılım şeklinde kullanılması.

Literatürde de telafi faktörünün farklı kullanımlarına örnekler bulunmaktadır. Bu kapsamda Linbeek ve diğerleri [102], çalışmalarında bir eğme problemi için DA yöntemi ile telafi prosesini incelemiştir. Çalışmada bir iterasyon için farklı telafi faktörü değerlerinin eğme yarıçapına etkisi tespit edilmiştir. Kullanılan eğme işlemi Şekil 3.8’de gösterilmiştir. Malzeme olarak IS ve DP600 çelikleri kullanılmış ve telafi faktörünün çekme gerilmesine göre değişimi elde edilmiştir, bu değişim Şekil 3.9’da verilmiştir. Telafi faktörü elastik deformasyon sınırına kadar sürekli artış göstermiş, sonrasında düşüş meydana gelmiş ve tam plastik deformasyon oluştuğunda “1” değerine yakınsamıştır. Bu durum malzemenin plastik deformasyon miktarının artması ile geri esnemenin azalmasının yanında, telafinin de kolaylaştığını göstermektedir. Aynı zamanda yüksek mukavemetli malzemeler için telafi faktörü değerlerinin de yüksek olduğu görülmektedir.

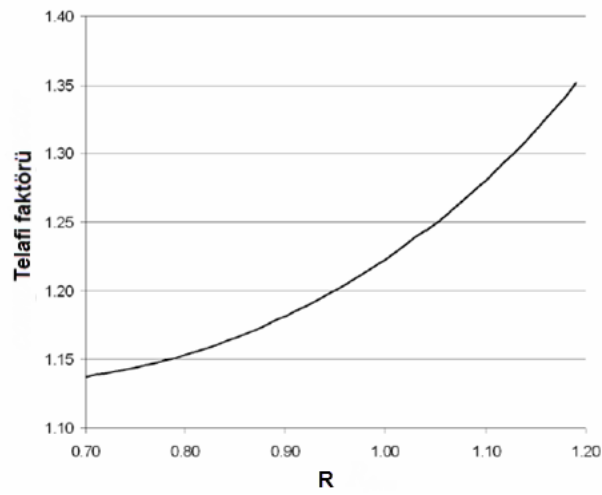
Şekil 3.10’da ise yine eğme işlemi için telafi faktörü ile formlama yarıçapının değişimi gösterilmiştir. Burada eğme yarıçapı miktarındaki azalma, eğme miktarının artmasına neden olmaktadır. Sonuç olarak artan eğme miktarı ile telafi faktörünün azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 3.8. Eğme prosesi [102]

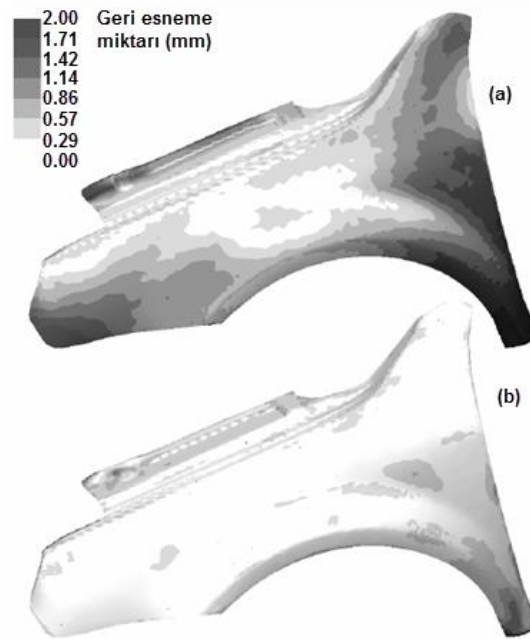


Şekil 3.9. IS ve DP600 çelikleri için telafi faktörünün çekme kuvvetine göre değişimi [102]

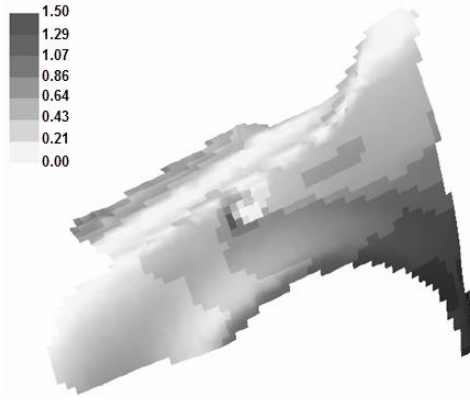


Şekil 3.10. Telafi faktörü ile eğme yarıçapının değişimi [102]

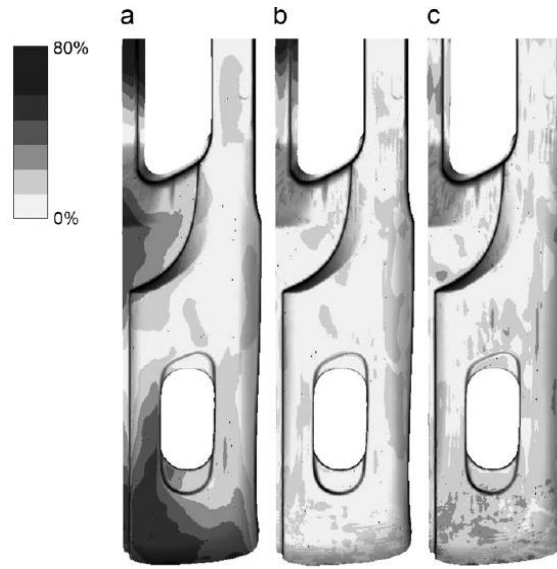
Yine aynı çalışmada [102], endüstriyel bir uygulama üzerinden telafi faktörünün kullanımı incelenmiştir. Endüstriyel uygulama olarak bir ön çamurluk formlama işlemi kullanılmıştır. Telafi faktörü ortalama ve dağılım şeklinde uygulanmıştır. Ortalama telafi faktörü ile tek adımda, telafi faktörünün dağılım şeklinde kullanımı ise iteratif olarak uygulanması ile telafi gerçekleştirilmiştir. İteratif uygulama ile geri esneme telafisinin oldukça başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği tespit edilmiştir. Şekil 3.11’de tek adımlı ve iteratif yöntemler ile telafi sonrasında elde edilen geri esneme yüzeyleri verilmiştir. İteratif yöntemde toleranslara 5 iterasyon sonrası ulaşılmış, başlangıçta 22 mm olan maksimum geri esneme miktarı 2.1 mm seviyesine düşürülmüştür. Parça genelinde geri esneme dağılımı ortalama 0.25 mm seviyelerindedir. Ortalama telafi faktörü 0.78 olarak hesaplanmış ve tek adımlı telafide kullanılmıştır. Telafi faktörünün parça üzerindeki dağılımı ise Şekil 3.12’de verilmiştir. İteratif uygulama, tek adımlı telafiye göre daha başarılı olmuştur.



Şekil 3.11. (a) Tek adımlı ve (b) İteratif telafiler sonrası geri esneme yüzeyleri [102]



Şekil 3.12. Telif faktörünün parça üzerindeki dağılımı [102]

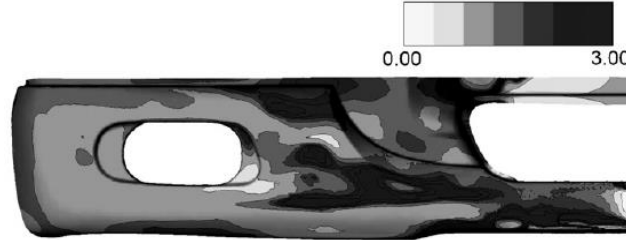


Şekil 3.13. (a) Başlangıç FEA sonrası (b) İlk iterasyon sonrası (c) 5. iterasyon sonrası yüzey uyumluluk analizleri [100]

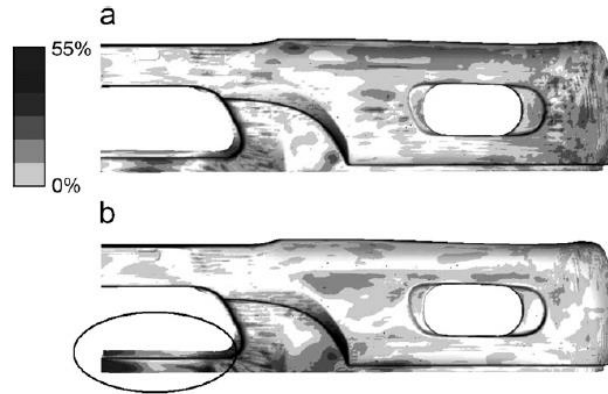
Bir diğer çalışmada Meinders ve diğerleri [100] endüstriyel bir uygulama üzerinden tek adımlı ve iteratif DA yöntemlerini karşılaştırmışlardır. Çalışmada tolerans faktörünü ortalama ve dağılım şeklinde uygulamışlardır. Malzeme olarak 2mm kalınlığında düşük karbonlu çelik kullanılmıştır. Şekil 3.13'te iteratif DA yöntemi sonucunda elde edilen yüzey uyumluluk analizi sonuçları verilmiştir. Parça toleransları 5 iterasyon sonrasında yakalanmıştır.

Yöntem iteratif olarak kullanıldığında tolerans faktörü dağılım şeklinde uygulanmıştır. Tolerans faktörünün parça üzerindeki dağılımı Şekil 3.14'te gösterilmiştir. Bu dağılım sonrasında ortalama tolerans faktörü 1,2 olarak hesaplanmıştır. Ortalama tolerans faktörü

kullanılarak yöntem tek adımda çözülmüş ve sonuçlar iteratif sonuçlarla karşılaştırılmıştır, karşılaştırma sonuçları Şekil 3.15'te verilmiştir. Tek adımlı çözüm sonrası sonuçların toleranslardan uzak olduğu fakat iteratif çözümde 5 iterasyon sonunda parça toleranslarına ulaşıldığı tespit edilmiştir.



Şekil 3.14. Telif faktörü dağılımı [100]



Şekil 3.15. (a) İteratif (b) Tek adımlı telif sonrası yüzey karşılaştırmaları [100]

DA yöntemi günümüzde hem akademik çalışmalarda hem de endüstriyel uygulamalarda efektif bir şekilde kullanılmaktadır. Literatürde de DA yöntemi ile yapılmış çalışmalar mevcuttur fakat yöntemin uygulanması zor bir süreç olduğu için çalışma sayısı geri esnemenin deneysel ve tahmin çalışmalarına göre oldukça azdır. Lan ve arkadaşlarının çalışmalarında [103], bir panel çekme prosesi için DA yöntemi kullanılmıştır. Yapılan çalışmada, DA yöntemi NURBS eğrileri ile daha hassas hale getirilmeye çalışılmıştır. Parametrik eğri kullanılan yöntem ile klasik DA yöntemine göre daha düzgün kalıp yüzeylerinin elde edildiğini gözlemlemişlerdir. Cheng ve diğerleri, çalışmalarında [104], kanal çekme prosesi için geri esneme telifisi gerçekleştirmişlerdir. İleri esnetme yöntemini referans alarak, kesit momentlerini bir Matlab arayüzü ile hesaplamışlardır. Sonuçta ileri esnetme yöntemini daha hızlı çalışabilir bir hale getirmişlerdir. Yang ve Ruan çalışmalarında [105], U kanal çekme

prosesi üzerinden DA yöntemi ile telafi gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada DA yöntemini telafi yönünü doğru seçebilecek şekilde geliştirmişlerdir. Sonuçta kendi yöntemlerinin, klasik DA yöntemine göre daha doğru çalıştığını belirtmişlerdir. Cafuta ve diğerleri yaptıkları çalışmada [106], kanal çekme ve silindirik çekme proseslerinde geri esneme telafisi gerçekleştirmişlerdir. DA yöntemini geliştirerek E-DA yöntemini önermişlerdir. E-DA yönteminde telafi sırasında geri esneme miktarı ve parça kalınlığındaki değişim aynı anda dikkate alınmakta ve kalıp yüzeyleri buna göre yeniden elde edilmektedir. Sonuç olarak hem 2 boyutlu hem de 3 boyutlu geometrilere efektif sonuçlar elde edildiğini belirtmişlerdir. Shen ve arkadaşlarının çalışmalarında [107], DA yöntemini modifiye ederek geri esneme telafisi gerçekleştirmişlerdir. Yöntemlerinde öncelikle geri esneme elde edildikten sonra düğüm noktası koordinatları tespit edilmiş sonrasında bu noktalara eğri oturtulmuştur. Elde edilen eğriye ise düzgünleştirme prosesi uygulanmıştır. Sonrasında elde edilen son eğriye göre klasik DA yöntemi prensibi ile telafi gerçekleştirilmiştir. Yöntemi bir panel çekme prosesi üzerine uygulamış ve efektif sonuçlar elde ettiklerini belirtmişlerdir. Mole ve diğerleri yaptıkları çalışmada [108], E-DA yöntemini 3 boyutlu olarak uygulamış ve kalıp yüzeylerini optimize etmeyi amaçlamışlardır. Yöntemlerini bir kanal çekme prosesi üzerinde uygulayarak efektif sonuçlar aldıklarını belirtmişlerdir.

3.2.3. Literatürdeki yöntemlerin karşılaştırılması

Deplasman ayar ve ileri esnetme yöntemlerinin karşılaştırılması literatürde en geniş kapsamda Gan ve Wagoner [99] tarafından gerçekleştirilmiştir. İlk olarak basit yay şeklinde bir geometri için formlama işlemi ile karşılaştırma gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırmalar her iki yöntemin geri esneme telafisinde Ortalama Karesel Hata (OKT) ile yapılmıştır. OKT değeri,

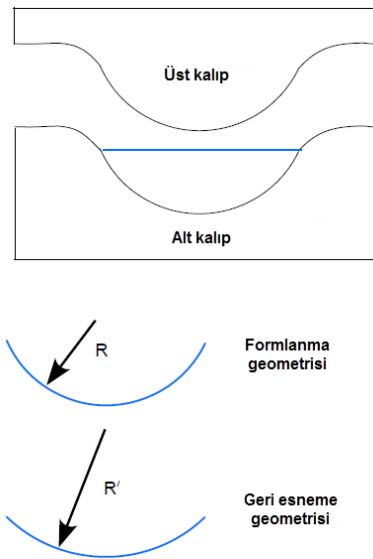
$$OKT = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N \Delta y_k^2}{N}} \quad (3.5)$$

şeklinde hesaplanabilir. Burada y_k , k. düğüm noktası için formlama yönündeki şekil bozukluğu miktarı ve N toplam düğüm noktası sayısıdır.

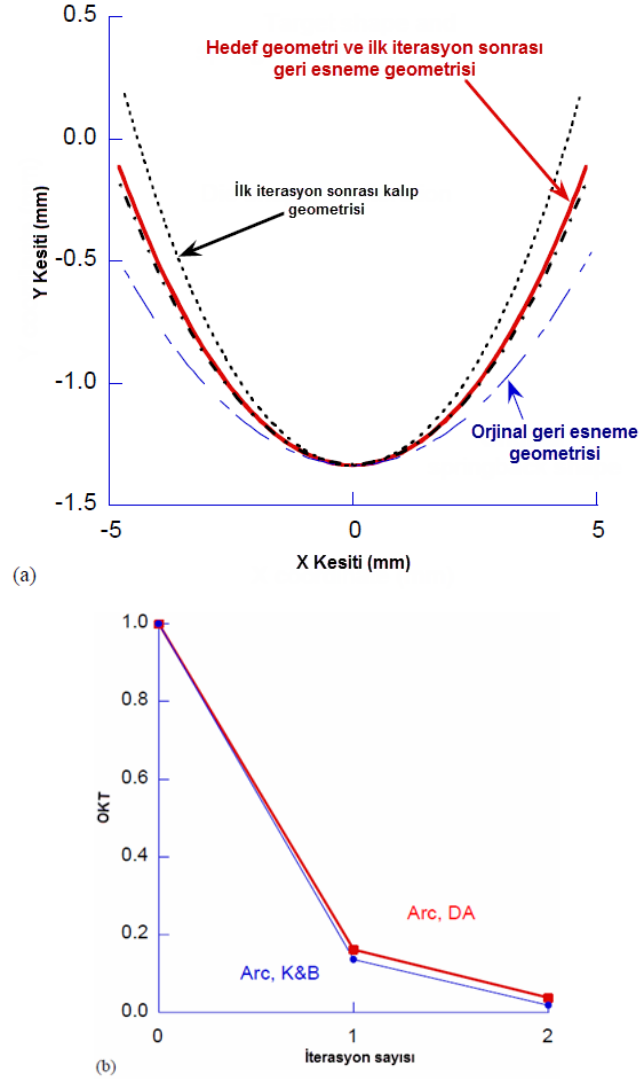
Sonlu elemanlar analizlerinde kiriş elemanlar kullanılmıştır. 51 integrasyon noktası ile simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Malzeme olarak FeAl alaşımı kullanılmış ve malzemeye ait mekanik özellikler Tablo 3.1’de verilmiştir. Formlama işleminde sürtünme katsayısı 0,2 olarak alınmıştır. Bu proses için her iki yöntem de benzer oranlarda iki iterasyon sonrasında başarılı bir şekilde telafiyi gerçekleştirmişlerdir. Kalıp geometrisi Şekil 3.16’da ve yöntemlerin karşılaştırılması Şekil 3.17’de verilmiştir.

Tablo 3.1. FeAl alaşımı mekanik özellikleri [99]

Elastisite modülü (GPa)	207
Poisson oranı	0,3
Holloman pekleşme kuralı	$\sigma = 307 + 4460\varepsilon^{0,76}$

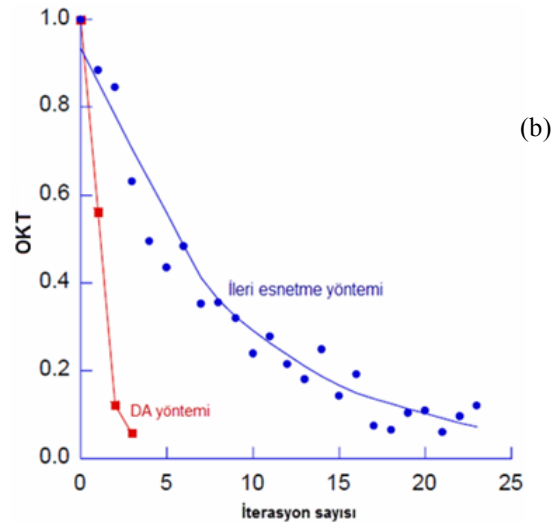
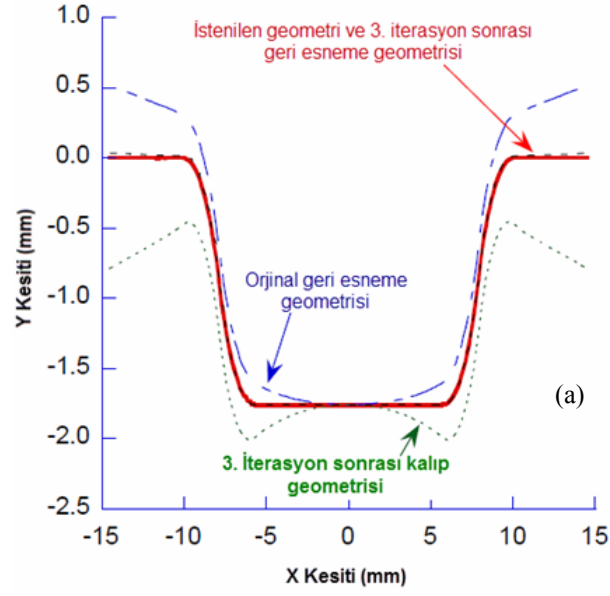


Şekil 3.16. Formlama prosesi şematığı [99]

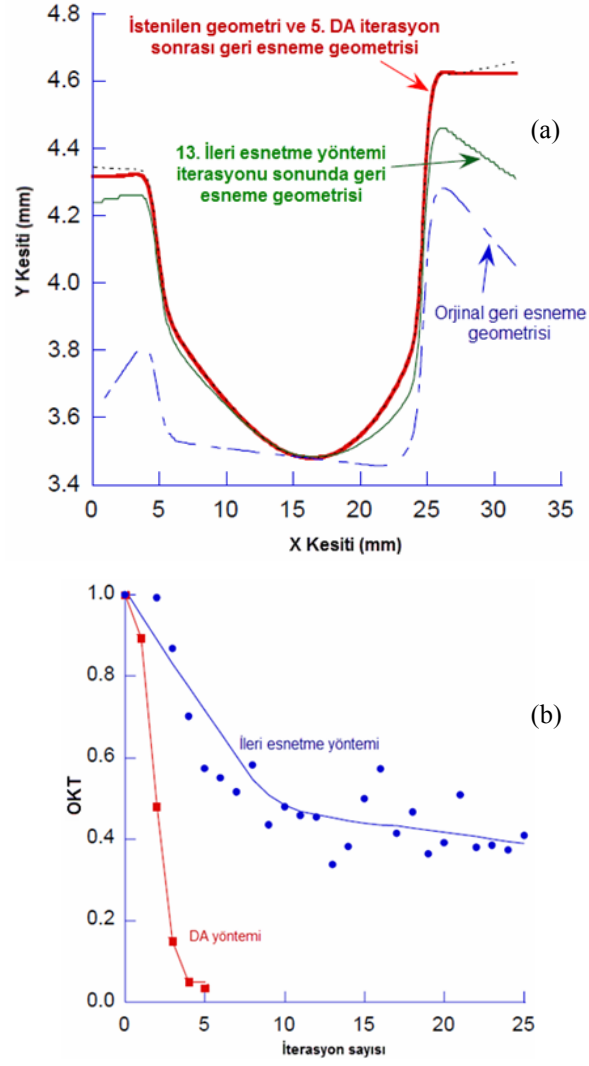


Şekil 3.17. (a) Telifli kalıp yüzeyleri (b) Kullanılan yöntemlerin telafi performansı [99]

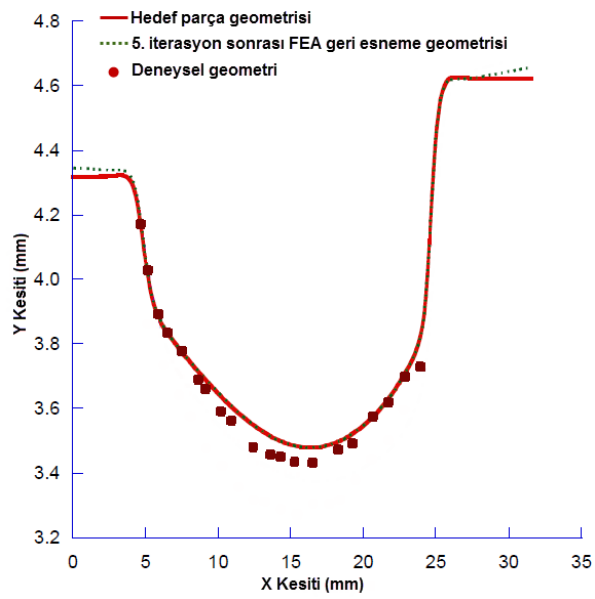
Bir diğer proses olarak U-kanal çekme işlemi kullanılmıştır. U-kanal çekme sırasında parça tutucu kullanılmamış, yöntem serbest formlama olarak gerçekleştirilmiştir. Malzeme olarak önceki proses için kullanılan malzeme kullanılmıştır. Telafi sonrasında istenilen tolerans aralıklarına DA yöntemi 3 iterasyon sonrasında ulaşırken, ileri esnetme yöntemi benzer tolerans aralığına 20 iterasyon sonrasında ulaşabilmiştir. İleri esnetme yönteminde 20 iterasyon sonrasında hata oranları dalgalanma göstermeye başlamış ve daha düşük seviyelere inememiştir. Şekil 3.18’de yöntemin uygulandığı kalıp geometrisi ve hata oranlarındaki yakınsama miktarları verilmiştir.



Şekil 3.18. (a) U-kanal çekme prosesi için kullanılan kalıp geometrileri (b) Her iki yöntem için iterasyonlara göre hata oranları [99]



Şekil 3.19. (a) Simetrik olmayan çekme prosesi geometrisi (b) Yöntemlerin telafi performansları [99]



Şekil 3.20. Simetrik olmayan çekme prosesi geometrisi ve yöntemlerin telafi performansları [99]

Bir diğer formlama prosesi olarak, geometrisinde simetri barındırmayan ve basit analitik denklemlerle ifade edilemeyen bir çekme prosesi seçmişlerdir. Bu proses için, DA yöntemi 5 iterasyon sonrasında istenilen geometriye yaklaşırken, ileri esnetme yöntemi 25 iterasyon sonrasında bile herhangi bir yakınsama gösterememiştir. Karşılaştırma sonuçları Şekil 3.19'da verilmiştir. İleri esnetme yöntemi ile en iyi sonuç 13. iterasyon sonrasında elde edilmiştir fakat geometri hala istenilenden uzaktır. Simetrik olmayan bu geometri için DA yöntemi ile elde edilen yüzeyler deneysel olarak da doğrulanmıştır. Bu kapsamda DA yöntemi ile 5. iterasyon sonrası elde edilen kalıp geometrisi üretilmiş ve FeAl alaşımı malzemeler bu kalıplarda formlanmıştır. Formlama işlemi sonrasında parçalar optik lazer sistemlerle bilgisayar ortamına aktarılmış ve sonlu elemanlar sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları Şekil 3.20'de verilmiştir.

Genel bir karşılaştırma yapıldığında ileri esnetme yönteminin DA yöntemine göre daha yavaş yakınsadığı görülmektedir ancak yakınsama sırasında DA yöntemi dalgalı bir seyir izlerken ileri esnetme yönteminde sürekli bir azalma gözlemlenmektedir. Ayrıca parça geometrileri simetrik olsa da olmasa da DA yöntemi başarılı bir şekilde çalışmasına rağmen simetrik olmayan parçalarda ileri esnetme yöntemi başarılı olamamaktadır. İleri esnetme yönteminde kuvvetlerin tespit edilmesi gerektiğinden bu süreç geri esneme miktarını tespit etmekten daha zordur. Ayrıca oluşan kuvvetler sonlu elemanlar analizlerindeki sınır koşullarına bağlıdır. Bu nedenle DA yönteminin uygulanması ileri esnetme yöntemine göre daha hızlıdır. Tüm bu karşılaştırmalar göz önüne alındığında endüstriyel uygulamalar açısından DA yönteminin kullanılması oldukça avantaj sağlamaktadır. Bu nedenle tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen geri esneme telafi proseslerinde DA yönteminin kullanılması tercih edilmiştir.

3.3. Değerlendirme

Tez çalışmasının bu bölümünde anlatılanlar ışığında şekil bozukluğunun kalıp yüzey tasarımı sırasında göz önünde bulundurularak geliştirilmesi gerektiği görülmektedir. Proses parametreleri ile telafi özellikle endüstriyel uygulamalarda parça toleranslarını yakalamak adına özellikle yeni nesil gelişmiş yüksek mukavemetli

Çelikler için başarılı olamadığı görülmektedir. Bu nedenle kalıp yüzeylerinin İleri Esnetme ya da Deplasman Ayar yöntemleri ile geri esneme davranışına göre geliştirilmesi gerekmektedir.

İleri Esnetme ve Deplasman Ayar yöntemlerinin karşılaştırması göz önüne alındığında ileri esnetme yönteminin parça yüzeyleri karmaşıklaştıkça iterasyonlar sonrası başarı oranı azalmaktadır. İleri Esnetme yönteminde kuvvetlerle çalışıldığından uygulama zorluğu bulunmaktadır. Deplasman ayar yöntemi ise literatürde genellikle basit geometrili formlama işlemlerine uygulanmış ve başarılı olmuştur. Endüstriyel prosesler açısından uygulamaları bulunsa da sonuçların detaylı incelendiği bir çalışmaya rastlanmamıştır. Tez çalışmasının bu yönden literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Aynı zamanda tez çalışması kapsamında deplasman ayar yöntemi 3 boyutlu telafi faktörü dağılımı şeklinde geliştirilmiş ve endüstriyel uygulamalarda başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bu konularda detaylı anlatım Tez çalışmasının 5. ve 6. bölümlerinde yer almaktadır.

BÖLÜM 4. KARMAŞIK FORMLAMA YÜZEYLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Tez çalışmasının bu bölümünde, karmaşık yüzeylerin sac metal formlama işlemlerinde kullanımı örneklerle gösterilmiş ve formlanan karmaşık geometrilerin sonlu elemanlar analizleri sonucunda elde edilen yüzeylerle karşılaştırılması amacıyla bilgisayar ortamına aktarılma yöntemleri anlatılmıştır. Sonrasında, sonlu elemanlar analizi sonuçları ile hassas karşılaştırma yapabilmek adına karmaşık yüzeylerin çalışma uzayında konumlandırılmasına ve son olarak karşılaştırmalarda kullanılan endüstriyel tolerans bantları ve yüzey uyumluluk analizlerine yer verilmiştir.

4.1. Sac Metal Formlama İşlemlerinde Karmaşık Yüzeyler

Otomotiv endüstrisinde özellikle binek araçların ergonomik ve aerodinamik özellikler barındırması gerekmektedir. Artan yakıt fiyatları göz önüne alındığında araç ağırlığının yanı sıra aerodinamik özelliklerin de önemi artmaktadır. Bu kapsamda otomotiv sektöründe aerodinamik özelliklerin iyileştirilmesi adına araç gövde tasarımlarında geçmişten günümüze çeşitli iyileştirmeler yapılmıştır [109]. Hava direncinin en aza indirilmesi adına tasarlanan yeni yüzeyler 1950'lerdeki klasik araç yüzeylerine göre daha karmaşık yüzeylerdir [110]. Aynı zamanda araç gövdesi dışında yapısal sac metal elemanların yüzeyleri de üretim yöntemlerinin gelişmesine paralel olarak karmaşıklaşmaktadır. Karmaşık yüzeyler klasik bir geometriyi (çember, çokgen v.b.) temsil etmeyen yüzeylerdir. Günümüzde bilgisayar teknolojisinin de gelişmesi ile birlikte bilgisayar destekli tasarım yazılımlarında karmaşık yüzeylerin tasarımı da kolaylaşmıştır. Bu nedenle karmaşık yüzeylerin kullanım alanı da artmaktadır [111].

Tasarım aşamasında yüzey karmaşıklığı arttıkça yüzeyi kontrol etmek de zorlaşmaktadır. Aynı zamanda ürün geometrisindeki karmaşık formlar kalıp yüzeylerinin tasarımında dikkat edilmesi gereken parametrelerdir. Formlama işlemi sonrasında parça toleranslarının yakalanabilmesi adına kalıp yüzeyleri parçada meydana gelen şekil bozuklukları dikkate alınarak tasarlanmalıdır. Şekil 4.1’de örnek bir karmaşık yüzeyli bir sac metal parça geometrisi ve parçaya ait kalıp takımları görülmektedir.

Sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen sonuçların doğruluğunun tespit edilebilmesi için bir referans geometriye ihtiyaç duyulmaktadır. Referans geometri, bu prosesler için formlama sonucu kalıptan çıkan sac parça geometrisidir. Bu geometrinin sonlu elemanlar analizi ile karşılaştırılabilmesi için kontrol edilmesi ve bilgisayar ortamına aktarılması gerekmektedir. Parça geometrilerinin bilgisayar ortamına aktarılabilmesi için çeşitli kontrol ve ölçümlerin yapılması gerekmektedir. Karşılaştırılacak geometriler basit geometriler olsa idi yalnızca gerekli bölgelerden ölçümlerin alınması ile simülasyon sonuçları ve ürün geometrisi karşılaştırılabilirdi fakat serbest formlu yüzeylerde karşılaştırma prosesi için böyle bir ölçümle karşılaştırma yapılması istenilen hassasiyette olmamaktadır. Serbest formlu yüzeyler için karşılaştırılacak yüzeylerin referans bir pozisyonda konumlandırılması gerekmektedir. Bu referans pozisyon çalışma uzayında her iki yüzey için aynı anlamı ifade eden bir parametre olmalıdır. Örneğin karşılaştırılacak iki yüzeyin belirlenen noktaları karşılıklı olarak ya da koordinat sistemleri çakıştırılabilir.



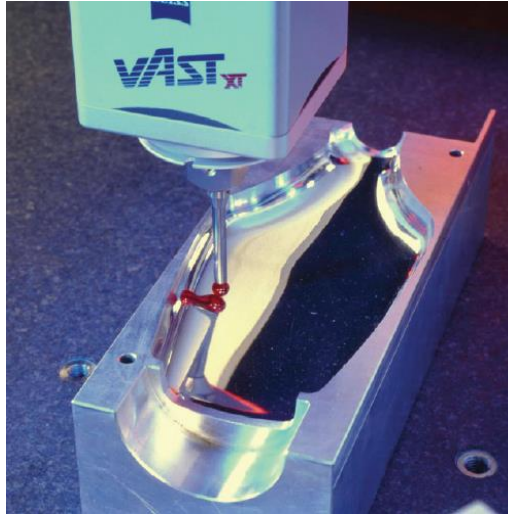
Motor süspansiyon destek parçası



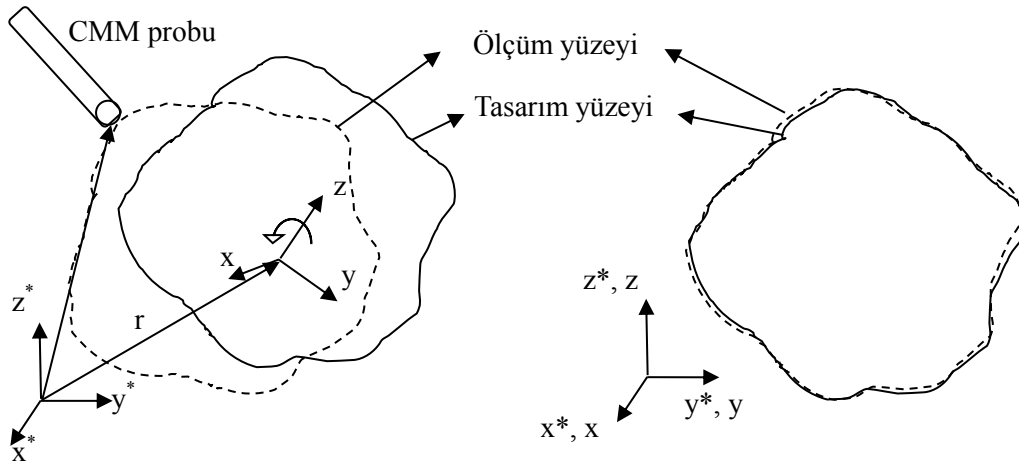
Şekil 4.1. Karmaşık yüzeyli bir sac metal malzeme ve formlama kalıpları [112]

4.2. Karmaşık Yüzeylerin Bilgisayar Ortamına Aktarılması

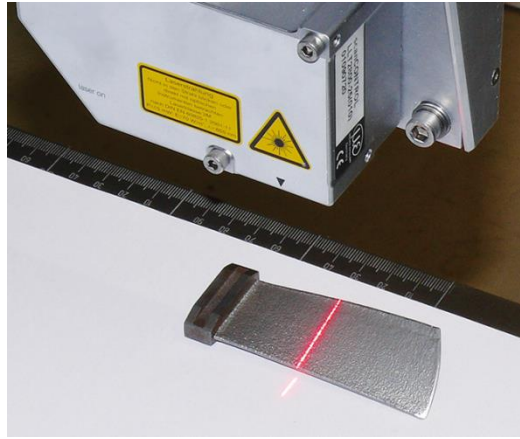
Karmaşık yüzeylerin karşılaştırma için gereken kontrol işlemi temaslı ya da temassız olmak üzere iki farklı şekilde yapılabilmektedir. Temaslı ölçümler koordinat ölçüm makinelerinde (CMM) yapılmaktadır. Şekil 4.2’de temaslı ölçümü gerçekleştirilen karmaşık yüzeyli bir kalıp geometrisi verilmiştir. CMM cihazları vasıtası ile yapılacak ölçümlerde cihaza ait bir koordinat sistemi ve karşılaştırma yapılacak tasarım geometrisinde ise bilgisayar destekli tasarım yazılımının çalışma uzayına ait bir koordinat sistemi bulunmaktadır. Karşılaştırma için bu iki koordinat sisteminin çakıştırılması gerekmektedir. Şekil 4.3’te örnek bir geometri üzerinden koordinat sistemleri görülmektedir. İki koordinat sisteminin çakıştırılması ile parçalardan birisi “r” vektörü kadar ötelenmiş ve bir miktar da döndürülmüş olmaktadır. Böylelikle iki geometrinin karşılaştırması mümkün olmaktadır. Fakat bu yöntem karşılaştırılacak yüzeyler aynı geometriye sahipse geçerlidir.



Şekil 4.2. CMM ve tasarıma ait parça koordinat sistemlerinin şematik gösterimi [111]



Şekil 4.3. Temaslı ölçümlerde karşılaştırma prosesinin şematik gösterimi [113]



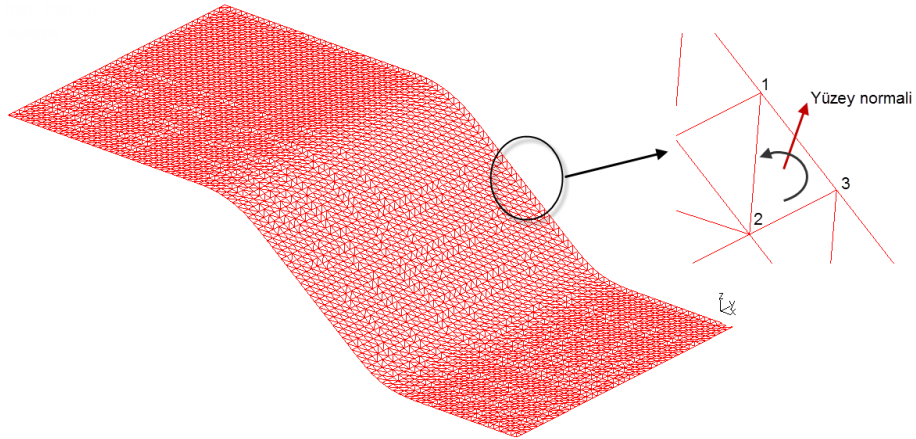
Şekil 4.4. Lazer tarama sistemi [114]

Temaslı ölçüm yöntemleri ne kadar kullanışlı olsalar da yüzey üzerinde yalnızca belirli noktaların koordinat bilgisini verebilmektedirler. Yüzeyin tamamı hakkında bilgi edinilmek istenirse temassız ölçüm yöntemleri kullanılarak yüzeyin taranması gerekmektedir. Temassız ölçüm yöntemlerinin birçok çeşidi bulunmakla birlikte en sık kullanılan çeşitleri lazer ve optik tarama yöntemleridir [115]. Temassız tarama sistemlerinden lazer taramalı sistemlerde, parça yüzeyinin üzerine bir lazer kesiti yansıtılır ve bu kesit yüzey üzerinde hareket ettirilir. Ölçüm, lazer kesitinin yüzey üzerinde deformasyona uğraması ve bu deformasyon bilgisinin CCD dijital kamera vasıtası ile alınması şeklinde gerçekleştirilir [115]. Örnek bir lazer tarama sistemi Şekil 4.4'te gösterilmektedir. Optik tarama sistemlerinde ise yüzey ölçümleri yine CCD kameralar vasıtası ile gerçekleştirilir. Yüzey üzerine yansıtılan ışıkların

yüzeyin şeklini alması ile yüzey bilgisi elde edilir. Örnek bir lazer tarama sistemi Şekil 4.5’te görülmektedir.



Şekil 4.5. Optik tarama sistemi [116]



Şekil 4.6. Stl formatında örnek bir yüzey

Yüzey bilgileri tarama sistemlerinden nokta bulutları şeklinde ya da üçgenleme yöntemi (triangulation) ile elde edilir. Bu veriler taranan yüzeyi temsil etmektedir. Taranan yüzeyin üçgen elemanlar ve düğüm noktaları ile elde edilmesi sonlu elemanlar sonuçları ile karşılaştırma yapılmasını kolaylaştırmaktadır. Tarama sistemlerinden elde edilen yüzeyler “.stl” formatında bilgisayar ortamına aktarılabilir. Stl (Stereolithography) formatı hemen hemen tüm bilgisayar destekli mühendislik yazımları tarafından okunabilen bir dosya uzantısıdır. Bu formatta kaydedilen geometride yalnızca yüzey bilgisi bulunmaktadır. Bir stl dosyasında geometri, yüzey normali ve sağ el kuralı ile belirlenen, üç boyutlu

kartezyen koordinat sistemi kullanan köşelerden oluşan üçgen elemanlarla temsil edilir. Stl formatında örnek bir yüzey Şekil 4.6’da gösterilmiştir.

Stl dosyaları ASCII (American Standard Code for Information Interchange) [117] ve binary olmak üzere iki farklı çeşitte kullanılabilir. ASCII dosyalar metin editörleri ile düzenlenebilen, İngiliz alfabesine göre yazılmış metin dosyalarıdır. Binary dosyalar ise metin dosyası olmayıp herhangi bir türde veri barındırabilen (resim, video v.b.), ikili sisteme göre yazılmış olan dosyalardır. ASCII dosya boyutları, binary dosyalara göre daha büyüktür fakat düzenlenebilir ve anlaşılabilir olması açısından önem arz etmektedirler [118]. ASCII formatında bir stl dosya da bir metin düzenleyicisi vasıtası ile açılabilir. Şekil 4.7’de metin düzenleyicisinde açılmış bir ASCII stl dosya görülmektedir. Burada “facet normal” kodunun yanında bulunan 3 sütundaki veriler yüzey normalinin koordinatlarını göstermektedir. “vertex” ifadesinin yanındaki sütunlar ise ilgili köşe noktasına ait koordinatları belirtmektedir. “Outer loop” ve “endloop” ifadelerinin arasında bulunan “vertex”ler o üçgeni oluşturan köşe noktalarıdır ve her bir çevrim bir üçgen elemanı temsil etmektedir. ASCII-stl dosyası kaç adet üçgenden oluşuyorsa, dosyada da o kadar çevrim bulunmaktadır.

```

solid ASCII_STL_FILE
facet normal 0.0000 -0.0000 -1.0000
  outer loop
    vertex 8.890623e+001 -6.999322e+000 -1.499803e+001
    vertex 8.790623e+001 -6.999490e+000 -1.499803e+001
    vertex 8.890607e+001 -5.999324e+000 -1.499803e+001
  endloop
endfacet
facet normal -0.0000 -0.0000 -1.0000
  outer loop
    vertex 8.790623e+001 -6.999490e+000 -1.499803e+001
    vertex 8.790607e+001 -5.999483e+000 -1.499803e+001
    vertex 8.890607e+001 -5.999324e+000 -1.499803e+001
  endloop
.
.
.
facet normal -0.1929 0.0104 -0.9812
  outer loop
    vertex 3.701287e+001 -5.007286e+000 4.803759e+000
    vertex 3.799581e+001 -5.007318e+000 4.610459e+000
    vertex 3.799371e+001 -6.006598e+000 4.600245e+000
  endloop
endfacet
endsolid

```

Şekil 4.7. Metin düzenleyicisinde açılmış bir ASCII-stl dosyası

4.3. Karmaşık Yüzeylerin Konumlandırılması

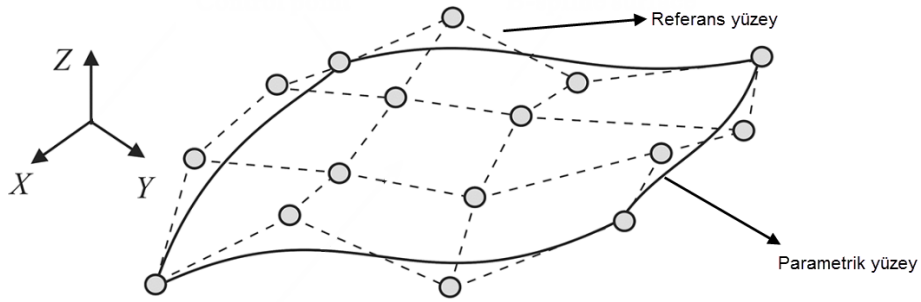
Günümüzde bilgisayar teknolojilerinin gelişmesi ile birlikte bilgisayar destekli tasarım yazılımları da geometri karşılaştırmaları için uzayda konumlandırma yapabilmektedir. Genellikle yazılımlar karşılaştırılacak her bir geometriyi çalışma uzayında kendi yerel koordinat sistemine göre konumlandırır ve kullanıcı bu koordinat sistemlerini karşılaştırarak karşılaştırma yapabilmektedir [119].

Literatürde karşılaştırılacak iki geometrinin uzaydaki ortak konumlandırılmasına pozisyonlama denilmektedir. Eğer karşılaştırılacak iki yüzey farklı geometrilere sahipse karşılaştırma prosesi daha da karmaşık bir hale gelmektedir. Şu ana kadar anlatılan yöntemlerde ölçüm noktaları tasarım yüzeyinden alınmakta idi. Bu yöntemlerle geometriler arasında noktadan noktaya şeklinde bir ilişki kurulabilmekte ve bu tarz bir ilişki hesaplamaları basitleştirmektedir. Bu yöntemler, genellikle prop tipli koordinat ölçüm makinelerinde (CMM) kullanılmaktadır. Bununla beraber, bir yüzeyi her zaman orijinal modeline göre ölçmek mümkün olmayabilir. Örneğin, bir geometriyi bilgisayar ortamına aktarmak için lazer tarama yöntemi kullanılırsa veri yoğunluğu oldukça fazla olmakta ve ölçüm noktaları orijinal yüzey modeli yerine belirlenen mesafelerden alınmaktadır. Bu durumda, ölçüm yüzeyi ile orijinal yüzey arasında açık bir ilişki bulunmamaktadır.

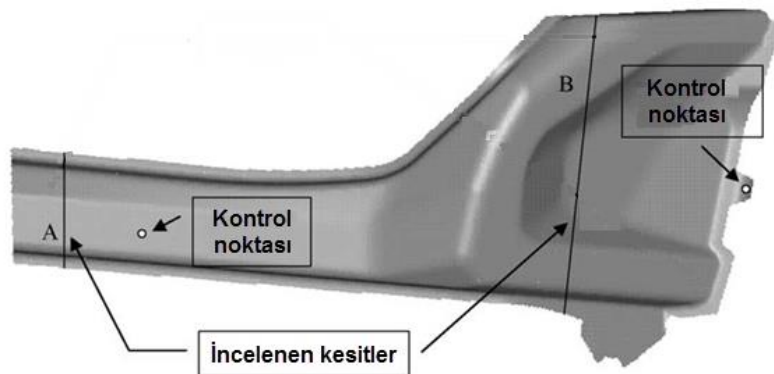
Bir diğer yüzey işlemi olarak elde edilen verilerden bir parametrik yüzey (B-spline eğriler, nurbsler v.b. ile) oluşturulabilmektedir fakat bu parametrik model orijinal yüzeyden farklılık gösterebilir. Şekil 4.8'de örnek bir parametrik yüzey gösterilmiştir. Karmaşık bir yüzey modelinin kontrolü kontrol noktalarına bağlıdır. Eğer kontrol noktası olarak farklı noktalar seçilirse, bu noktalar aynı yüzeyde olsa bile parametrik yüzeyler farklılık gösterecektir. Parametrik anlamda, referans yüzey ve ölçülen yüzey ne kadar benzer olsa da aralarında direk bir ilişki kurulamamaktadır. Karmaşık yüzeyler için, yapılacak tahminler, geometrilerdeki karşılıklı noktaları bulmak adına başarısız olacaktır. Böyle durumda şu ana kadar anlatılan yöntemler geçerliliklerini yitireceklerdir. Böyle bir problemde, ölçüm yüzeyindeki noktalara referans yüzeydeki en yakın noktalar bulunmaya çalışılır. Sonrasında bu noktalar arasındaki mesafe tespit edilir ve konumlandırma için bu

mesafe minimize edilir. Aynı zamanda çeşitli bilgisayar destekli tasarım yazılımları vasıtası ile geometrilerin en az üç noktası çakıştırılarak karşılaştırılmalar yapılabilir [119].

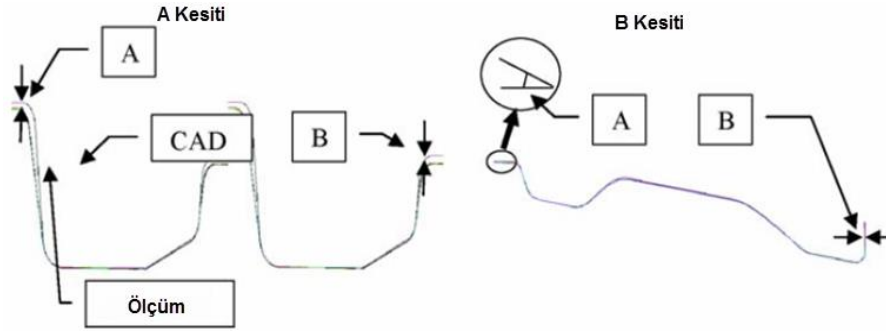
Literatürde karmaşık yüzeylerin uzayda konumlandırılması adına yapılan çalışmalar incelendiğinde genellikle karşılaştırılacak yüzeylerin belirlenen referans noktalarda çakıştırıldığı görülmektedir [120-121]. Andersson yaptığı çalışmada [122], Trip 700 malzemesine sahip bir araç gövde parçasının formlama işleminde meydana gelen geri esneme davranışını nümerik ve deneysel olarak incelemiştir. Bu kapsamda sonlu elemanlar analizi sonuçlarını karşılaştırmak adına deneysel yüzeyler bilgisayar ortamına aktarılmış belirlenen kontrol noktalarından yüzeyler çakıştırılarak seçilen kesitlerde geri esneme incelenmiştir. Şekil 4.9'da geri esnemenin kesitler ve kontrol noktaları ve Şekil 4.10'da ise karşılaştırma sonuçları verilmiştir.



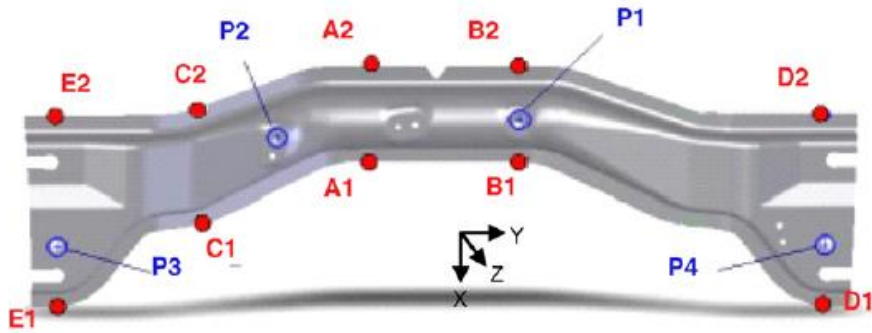
Şekil 4.8. Referans bir yüzeyden kontrol noktaları kullanılarak oluşturulan bir parametrik yüzey [123]



Şekil 4.9. Geri esnemenin karşılaştırıldığı kontrol noktaları [122]



Şekil 4.10. Karşılaştırma sonuçları [122]



Şekil 4.11. Karmaşık geometrili çekme prosesi ve çalıştırma (P1-P4) ve geri esneme ölçüm (A1-E2) noktaları [124]

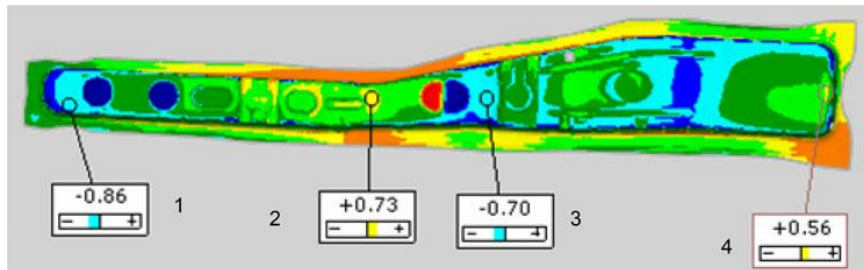


Şekil 4.12. Parça üzerindeki kontrol noktaları ve formlama kalıpları [125]

Bir diğer çalışmada Asgari ve diğerleri çalışmalarında [124], Trip malzemesinden oluşan karmaşık geometrili bir çekme prosesini incelemişlerdir. Sonlu elemanlar analizi sonuçlarını deneysel yüzeylerle karşılaştırmak adına yüzeyleri seçilen dört noktadan çakıştırmış ve belirlenen 10 noktadan geri esneme ölçümleri yaparak karşılaştırma işlemini gerçekleştirmişlerdir. Seçilen noktalar ve parça geometrisi Şekil 4.11'de verilmiştir.

Tang ve diğeri çalışmaları [125] AHSS malzemesine sahip bir formlama işleminde geri esneme davranışını incelemiştir. Bu kapsamda preste formlanan parçalar bilgisayar ortamına aktararak sonlu elemanlar sonuçları belirlenen kontrol noktalarında karşılaştırılarak karşılaştırılmıştır. Şekil 4.12’de parça geometrisi üzerinde kontrol noktaları ve kalıp yüzeyleri görülmektedir.

Bir diğeri çalışmada Peng ve arkadaşları [126], DP600 malzemesine sahip bir endüstriyel formlama işleminde geri esneme davranışını incelemiştir. Presto formalanan parçalar optik tarama ile bilgisayar ortamına aktararak sonlu elemanlar analizi sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4.13’te konumlandırma sonrası karşılaştırma işlemi görülmektedir.



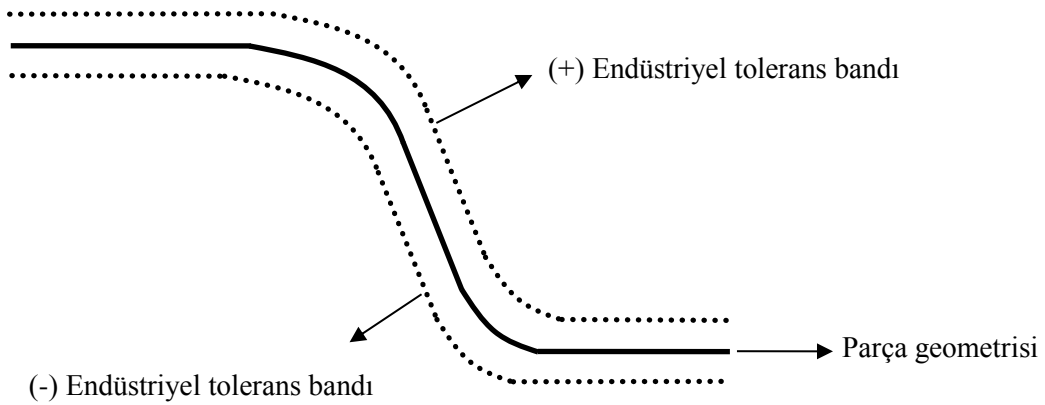
Şekil 4.13. Parça tarama ve sonlu elemanlar analizi sonuçları ile karşılaştırma işlemleri [126]

Karşılaştırılacak yüzeylerin uzayda konumlandırılması sonrasında belirli noktalardan ölçümlerle karşılaştırma yapılabildiği gibi her iki yüzeyin birbiri ile ne kadar uyumluluk gösterdikleri de tespit edilebilmektedir. Bu karşılaştırma, yüzey uyumluluk analizleri ile gerçekleştirilmektedir.

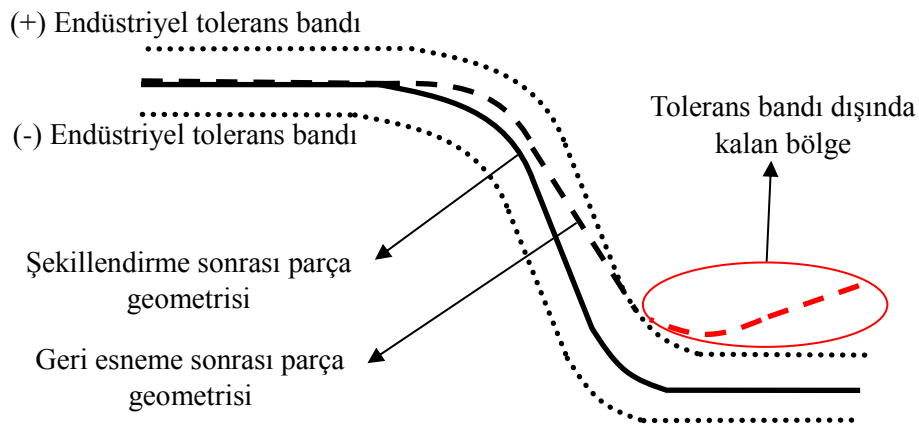
4.4. Yüzey Uyumluluk Kavramı ve Değerlendirilmesi

Sac metal formlama işlemlerinde meydana gelen şekil bozukluğunun ana sebebi geri esnemedir fakat bunun yanı sıra pres rijitliği, kalıp esnemesi, montaj durumu ya da boyut faktörleri de etki etmektedir. Fakat bu parametrelerden hem etki ağırlığı olarak üstün olması hem de çalışma kolaylığı açısından geri esnemenin etkisi incelenmektedir. Diğer parametreler pres ya da kalıp imalatçısına, presin montaj durumuna ve rijitliğine bağlıdır ve bu parametrelerin tespit edilmesi oldukça zordur, bu nedenle tez çalışması kapsamında bu parametreler ihmal edilerek yalnızca geri esnemenin etkisi incelenmiştir.

Yüzey karşılaştırmaları yapılırken ihmal edilen parametrelerden dolayı bir tolerans aralığı belirlenmesi gerekmektedir. Yüzey karşılaştırmalarında bu tolerans endüstriyel tolerans bantları vasıtası ile sağlanmaktadır. Endüstriyel tolerans bantlarının şematik gösterimi Şekil 4.14'te verilmiştir. Presten çıkan parçalar yüksek oranlarda bu bantın içerisinde yer aldığı sürece parça boyutları kabul edilebilir olarak tespit edilmektedir. Bu bant, sac metal formlama işlemlerinde \pm sac kalınlığı (mm) olarak kullanılmaktadır.

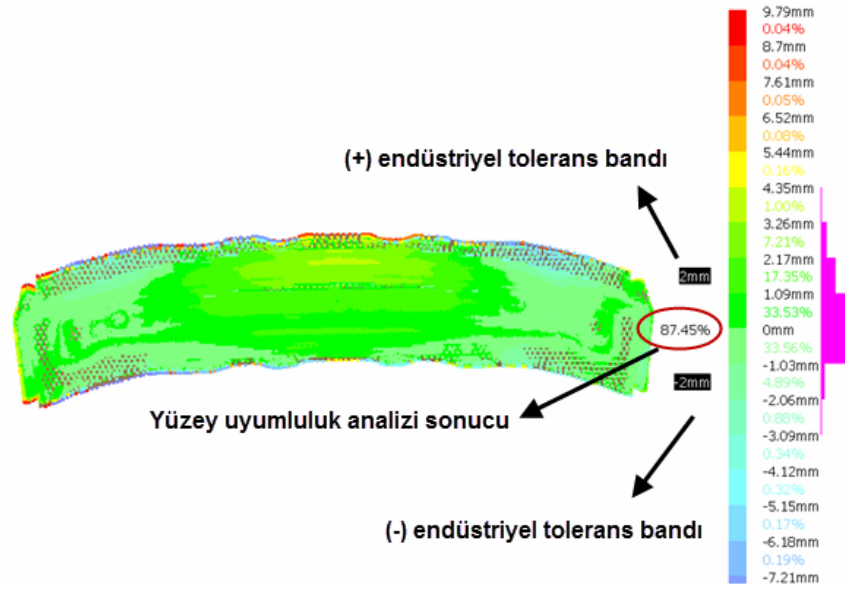


Şekil 4.14. Endüstriyel bant şematik gösterimi



Şekil 4.15. Yüzey uyumluluk analizi şematik gösterimi

Endüstriyel tolerans bantları yüzey uyumluluk analizlerinde karar verme kriteri olarak kullanılmaktadır. Yüzey uyumluluk analizleri karşılaştırılan iki parçanın endüstriyel tolerans bantları içerisinde ne kadar uyumlu olduklarını tespit etmek amacıyla kullanılırlar. Karşılaştırılan parçalar sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen formlama sonrası parça yüzeyi ve geri esneme sonrası parça yüzeyi olabileceği gibi, yine sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen geri esneme yüzeyleri ile tarama sonrası elde edilen preste formlanmış deneysel parça yüzeyleri olabilmektedir. Sonlu elemanlar analizleri ve optik tarama sonrası elde edilen yüzeyler düğüm noktaları ve elemanlardan oluşmaktadır, İki yüzey endüstriyel tolerans bantları vasıtası ile karşılaştırıldıklarında geometrileri meydana getiren noktaların ne kadarının bantlar içerisinde kaldığı tespit edilir ve elde edilen sonuca göre yüzey uyumluluk analizi sonucu elde edilir. Örneğin 1000'er düğüm noktasından oluşan iki parçanın 600 ortak noktası tolerans bantları içerisinde, 400 nokta ise dışında kaldığında bu iki yüzeyin uyumluluğu %60 olarak belirlenir. Yüzey uyumluluk analizinin şematik gösterimi Şekil 4.15'te verilmiştir. Sac metal formlama işlemlerinde kalıp tasarımının üretim aşamasına aktarılabilmesi için sonlu elemanlar analizi sonrasında elde edilen yüzeyin, istenilen parça yüzeyi ile uyumluluğunun endüstride yaklaşık %80 ve üzerinde olması istenmektedir. Örnek bir yüzey uyumluluk analizi sonucu Şekil 4.16'da verilmiştir.



Şekil 4.16. Örnek bir yüzey uyumluluk analizi

4.5. Değerlendirme

Tez çalışmasının bu bölümünde anlatılanlar ışığında karmaşık yüzeylerin çalışma uzayında karşılaştırılması prosesinin sac metal formlama işlemleri açısından büyük önem arz ettiği görülmektedir. Günümüzde sac metal parçaların birçoğu karmaşık yüzeylere sahip olduğundan tasarım aşamasında elde edilen modelleme yüzeylerinin deneysel yüzeylerle karşılaştırılması metot mühendisliği açısından karar verme mekanizmalarında kritik rol oynamaktadır. Yapılacak karşılaştırmaların hassas bir şekilde gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Sac metal formlama endüstrisinde karmaşık yüzeylerde şekil bozukluğu yalnızca belirli bölgelerden oluşmamakta, bir dağılım davranışı sergilemektedir. Bu nedenle karşılaştırmalar iki yüzeyin tamamı ele alınarak gerçekleştirilmektedir. Bu kapsamda parça toleransları dikkate alınarak endüstriyel tolerans bantları kullanılmaktadır. Sac metal formlama endüstrisinde karşılaştırmalar, yüzey uyumluluk analizleri ile yapılmaktadır. Bu karşılaştırmaları etkileyen en kritik parametre ise yüzeylerin konumlandırılmasıdır. Literatür çalışmalarından görüldüğü üzere bu konumlandırma yüzeylere ait belirli noktalardan yapılabildiği gibi yüzeylerin yerel koordinat sistemleri çakıştırılarak da yapılabilmektedir.

BÖLÜM 5. TELAFİLİ KALIP YÜZEY TASARIMI YÖNTEMİ

Tez çalışmasının bu bölümünde, sac metal formlama işlemlerinde karşılaşılan şekilsel ve boyutsal hataların tasarım aşamasında telafi edilmesi için geliştirilen tasarım yöntemi anlatılmıştır. Bu kapsamda öncelikle tasarım yöntemi, metot ve tasarım mühendisliği perspektifinden ele alınmıştır. Tasarım aşamasında şekilsel ve boyutsal hataların tahmini ve telafisi için önerilen yöntemde kullanılan ve geliştirilen metotlar açıklanmıştır. Sonlu elemanlar analizi sonuçlarının tahmin doğruluğunu geliştirmek adına hassasiyet analizleri ve bu kapsamda deneysel tasarım analizlerine yine bu bölümde yer verilmiştir. Ayrıca telafi aşamasında tez çalışması kapsamında önerilen telafi faktörünün üç boyutlu dağılımı ile form kalıp yüzeylerinin geliştirilmesi anlatılmış ve getirdiği avantajlara yer verilmiştir. Son olarak, tez çalışması kapsamında tasarlanan, karmaşık yüzeylerin uzayda konumlandırılmasını gerçekleştiren ara yüz ve çalışma prensibi açıklanmıştır.

5.1. Tasarım Prosedürü

Metot ve tasarım mühendisleri sac metal formlama işlemlerinde hedef geometrisine belirlenen tolerans aralıkları ile ulaşan kalıp yüzeylerini elde etmek durumundadırlar. Bu kapsamda formlama işlemleri için bir tasarım prosedürü oluşturulmaktadır. Endüstride her firmanın bünyesinde kullandığı proses tasarım yöntemleri bulunmaktadır. Tez çalışması kapsamında endüstride kullanılan tasarım prosedürlerine yeni bir yaklaşım getirilmiştir. Bu kapsamda sac metal formlama işlemleri için tahmin ve telafi yöntemleri belirli bir sistematik içerisinde kullanılmıştır. Geliştirilen tasarım prosedüründe sonlu elemanlar tahminlerinin yüksek doğrulukta olması ve telafi prosedürlerinin başarılı ve zaman kayıpları minimuma indirilmiş olması amaçlanmıştır. Bu kapsamda ilk olarak sonlu elemanlar tahminlerinin doğruluğu üzerine çalışılmıştır. Sac metal formlama işlemleri sonrası sac malzemede meydana gelen şekilsel ve boyutsal hataların öncelikle bilgisayar

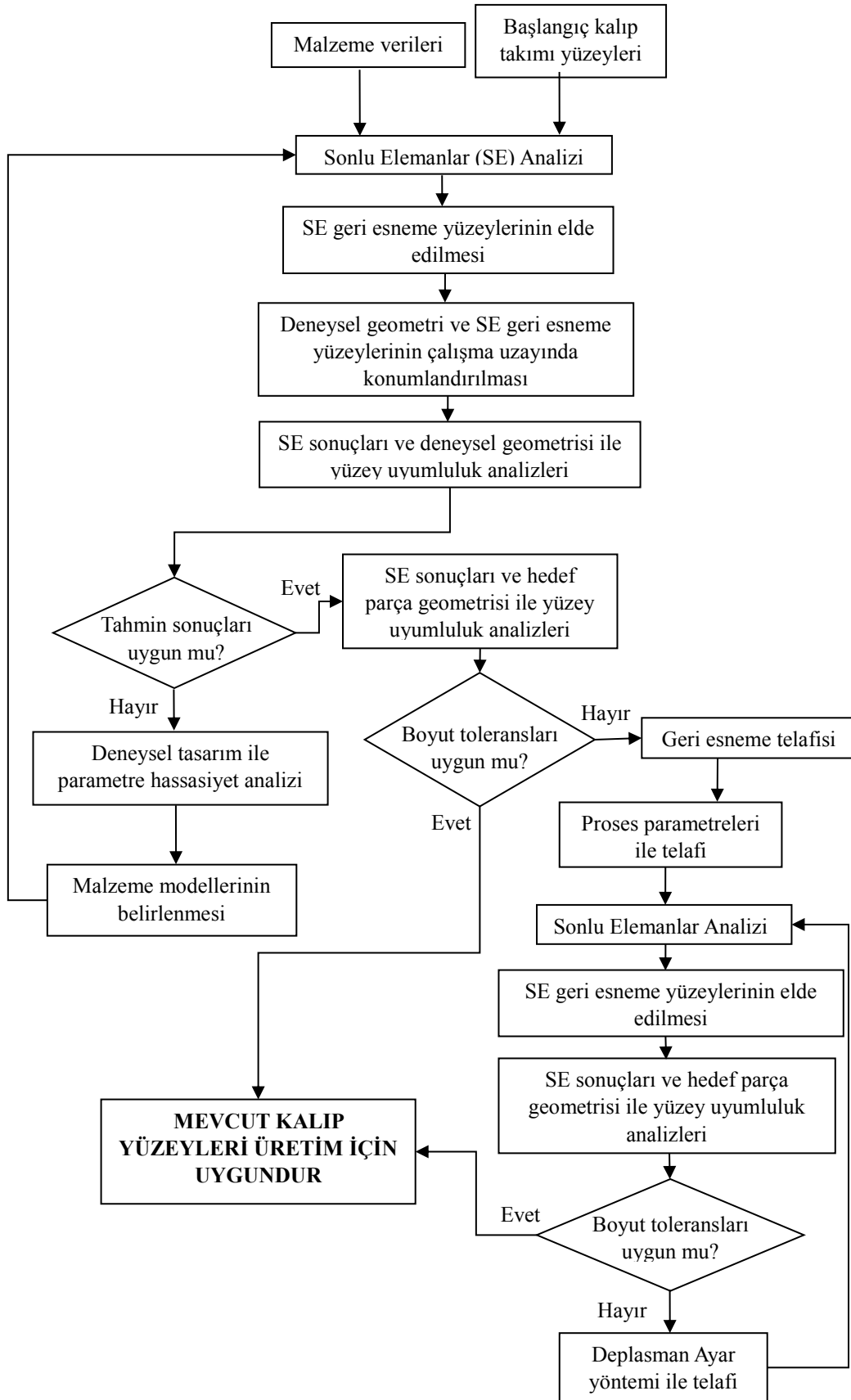
ortamında tahmin edilmesi gerekmektedir. Yapılan tahminlerin doğruluğu telafi prosesinin başarısını doğrudan etkilediğinden tahminler yüksek doğrulukta olmalıdır. Tasarım prosedürünün ilk adımı olarak sonlu elemanlar analizlerinin doğruluk oranlarını arttırmak adına hassasiyet analizleri gerçekleştirilmiştir.

Tasarım yönteminde bir sonraki adım ise geri esneme telafisidir. Geri esneme telafisi özellikle endüstrinin yoğun olarak ihtiyaç duyduğu bir konudur. Şekil bozukluğu ile formlama sonrasında her parçada karşılaşılmaktadır. Geri esneme telafisinin proses parametrelerinin değiştirilmesi ile yapılması yeterli olmamaktadır. Her presin bir maksimum formlama hızı ve tonaj kapasitesi bulunmaktadır. Dolayısı ile bu kapasiteler proses parametreleri için bir limiti temsil etmektedir. Bir proses için tasarım aşamasında belirlenen parça tutucu kuvvet değerini verebilecek mekanik ya da gazlı yayların üretilebilir olması gerekmektedir. Bir diğer önemli proses parametresi olan sürtünme katsayısının belirlenmesi oldukça zordur ve yine tasarım aşamasında tespit edilen uygun sürtünme katsayısının pratik uygulamalarda elde edilmesi sorun olabilmektedir. Dolayısı ile endüstri genellikle Deplasman Ayar (DA) yöntemi ile geri esneme telafisi gerçekleştirmektedir. Yöntem, efektif bir yöntem olmakla birlikte bazı dezavantajlara sahiptir. Geri esneme; parça kalınlığı, parça geometrisi, proses parametreleri ve malzeme gibi etmenlere bağlı olduğundan yapılan telafi yalnızca mevcut durum için geçerli olacaktır. Bu nedenle bu yöntem genellikle seri üretim için uygun bir yöntemdir çünkü kalıp yüzeylerinin yeniden oluşturulması hem zaman alıcı hem de maliyetli bir yöntemdir. DA yöntemi malzemedен bağımsız olarak çalışan, yalnızca geri esneme miktarını dikkate alan bir yöntemdir.

Tez çalışması kapsamında geliştirilen tasarım prosedürü literatürdeki çalışmalara göre birçok yönü ile üstünlük taşımaktadır. Şekil bozukluğu problemi formlama aşamasından başlayarak, tasarım aşamasında tahmin ve telafi prosesleri ile ele alınmıştır. Tahmin aşamasında hassasiyet analizleri gerçekleştirilerek, tahmin doğruluğu en üst seviyeye getirilmiş ve sonrasında telafi prosesine geçilmiştir. Ayrıca karşılaştırma yüzeylerini uzayda konumlandıran bir arayüz tasarlanmıştır. Tasarlanan arayüz, DA yöntemi için gerekli geri esneme miktarlarını her bir düğüm noktası için hesaplamakta ve bir fark dosyası oluşturarak dışarı yazabilmektedir. Bu

özellikleri ile telafi sırasındaki zaman kayıplarını efektif bir şekilde azaltmaktadır. Endüstriyel uygulamalarda DA yönteminin bir diğer dezavantajı ise iterasyonlar sonrasında kalıp yüzeylerinde meydana gelen bozulmalardır. Bu nedenle tez çalışması kapsamında 3 boyutlu telafi faktörü dağılımı yöntemi önerilmiştir. Bu yöntem vasıtası ile iterasyonlar sonrası kalıp yüzeylerinde meydana gelen bozulma efektif bir şekilde giderilmiştir. Böylece iterasyonlarda geriye dönük iyileştirmeler yapılmasını engellenerek yine zaman kayıplarının önüne geçilmiştir. Sonuç olarak geri esnemenin tahmini ve telafisi için bir tasarım prosedürü oluşturulmuştur. Oluşturulan tasarım prosedürünün iş akış şeması Şekil 5.1'de verilmiştir. Tasarım prosedürünün hem akademik hem de endüstriyel proseslerdeki kullanımı tez çalışmasının 6. Bölümünde yer almaktadır.

Bu bölümün devamında, önerilen tasarım yöntemi kapsamında kullanılan ve geliştirilen yöntemlerin detaylı açıklamaları yer almaktadır.



Şekil 5.1. Tez çalışması kapsamında sunulan tasarım prosedürü iş akış şeması

5.2. Hassasiyet Analizi

Sonlu elemanlar analizlerinde tahmin hassasiyetinin artırılması genellikle doğru parametrelerin kullanılması ile ilgilidir. Sonlu elemanlar analizlerinde hassasiyeti etkileyen en önemli parametreler malzeme davranışının tanımlanması ve sonlu elemanlar hesaplama parametreleridir. Malzeme davranışının tanımlanması ile ilgili detaylı bilgi tez çalışmasının 2. bölümünde yer almaktadır. Malzeme davranışını doğru tanımlayan kriterlerin seçilmesi ve malzeme özelliklerinin hassas olarak elde edilmesi tahmin sonuçları açısından büyük önem arz etmektedir. Literatürde malzeme davranışının hassas olarak modellenmesinin önemi açıkça görülmektedir. Gau ve Kinzel çalışmalarında [127], geri esneme tahmin hassasiyetini arttırmak adına Buschinger etkisini dikkate alan bir kinematik pekleşme modeli kullanmışlardır. Kinematik modelin geri esneme tahmininde oldukça başarılı olduğunu gözlemlemişlerdir. Taherizadeh ve arkadaşlarının çalışmalarında [128], Numisheet 95 Benchmark-3 geometrisi için geri esneme tahmini gerçekleştirmişlerdir. Malzeme olarak AA6022, DP600, HSLA, AKDQ kullanmışlardır. Tahminlerini farklı malzeme modelleri ile gerçekleştirmişlerdir. Voce, Holloman ve Armstrong–Frederick kinematik pekleşme modelleri kullanmışlardır. Sonuç olarak izotrop modellerin geri esneme miktarını deneysel sonuçlara göre daha yüksek derecelerde tahmin ettiği, kinematik modelin ise geri esnemeyi daha hassas tahmin ettiğini gözlemlemişlerdir. Peng ve diğerleri yaptıkları çalışmada [129], bir araç paneli formlama prosesi üzerinden geri esneme tahmini gerçekleştirmişlerdir. Tahminlerinde farklı malzeme modelleri kullanmışlardır. Malzeme modeli olarak, Yoshida, Barlat ve düzlemsel anizotropi-izotrop pekleşme modeli seçilmiştir. Malzeme olarak DP600 çeliği kullanmışlardır. Sonuç olarak en iyi tahmini Yoshida kinematik malzeme modelinin gerçekleştirdiğini tespit etmişlerdir. Chongthairungruang ve arkadaşlarının çalışmalarında [130], çift fazlı çeliklerin U-kanal çekme prosesinde farklı malzeme modelleri ile geri esneme davranışını incelemişlerdir. Malzeme modeli olarak Hill–48, Barlat ve Yoshida modellerini kullanmışlardır. Sonuç olarak belirlenen malzeme modellerinin geri esneme tahmininde başarılı olduğu fakat Yoshida kinematik pekleşme malzeme modelinin diğerlerine göre daha hassas sonuçlar verdiğini gözlemlemişlerdir.

Sonlu elemanlar analizlerinde malzeme davranışı doğru bir şekilde tanımlandıktan sonra hassasiyeti arttırmak amacı ile sonlu elemanlar hesaplama parametreleri incelenmektedir. Bu kapsamda optimizasyon, yapay sinir ağları ya da deneme-yanılma yöntemleri ile çalışmalar gerçekleştirilmektedir [131-145]. Li ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [146], U kanal çekme prosesi üzerinden geri esneme tahmini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında tahmin prosesi için regresyon analizi ve açık adımlı sonlu elemanlar yöntemini kullanmışlardır. Ayrıca tahmin hassasiyetini arttırmak adına, temas algoritmaları incelenmiş ve Lagrangian yöntemi ile temas kuvvetini belirlemişlerdir. Yükleme ve yük boşaltma prosedürlerini tek bir kodla gerçekleştirmiş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak tahmin sonuçlarının tatminkâr olduğunu gözlemlemişlerdir. Inamdar ve diğerleri çalışmalarında [147], tahmin yöntemi olarak yapay sinir ağlarını kullanmışlardır. Yapay sinir ağları ile v kalıpta serbest bükme prosesi için geri esneme tahmini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında geri beslemeli yapay sinir ağları kullanmışlardır, sinir ağlarında 5 giriş, 10 gizli ve 2 çıkış katmanı bulunmaktadır. Çıkış olarak geri esneme miktarı ve zımba mesafesi, giriş olarak ise bükme açısı, zımba yarıçapı/malzeme kalınlığı oranı, kalıp boşluğu, kalıp yarıçapı ve akma gerilmesi/elastisite modülü oranı alınmıştır. Yapay sinir ağı 400 deney sonucu ile eğitilmiş ve sonrasında simüle edilmiştir. Elde edilen tahminlerin başarılı olduğu ve eğitim verisinin artışı ile tahmin hassasiyetinin artacağı belirtilmiştir. Papaleux ve Ponthot yaptıkları çalışmada [148] U kanal çekme prosesi üzerinden geri esneme tahmini gerçekleştirmişlerdir. Geri esneme hassasiyetini arttırmak adına farklı parça tutucu kuvvet, sürtünme katsayısı, zaman integrasyonu ve malzeme modelleri kullanmışlardır. Sonuç olarak doğru parametre seçimi ile geri esneme tahmin hassasiyetinin arttığını tespit etmişlerdir. Xu ve diğerleri yaptıkları çalışmada [149], U kanal çekme prosesi üzerinden geri esneme tahmin hassasiyeti üzerine çalışmışlardır. Çalışmada parametre olarak, integrasyon noktaları, zımba hızı ve eleman boyutu kullanılmıştır. Sonuçta çok az ve çok fazla integrasyon noktası kullanımının geri esneme tahmininde başarısız olduğunu, ideal olarak 7 adet integrasyon noktasının kullanılması gerektiğini, eleman boyutunun tahmin hassasiyeti üzerinde etkisinin olduğunu ve U-kanal çekme prosesi için kalıp yarıçapı kısmında 5 eleman kullanımının iyi sonuçlar verdiğini, zımba hızının 1 m/s'yi aşmaması gerektiğini tespit etmişlerdir.

Tez çalışması kapsamında geliştirilen tasarım yönteminin sonlu elemanlar tahmini adımı hem malzeme davranışının modellenmesi hem de sonlu elemanlar analizleri için parametre hassasiyet analizi yer almaktadır. Parametre hassasiyeti sonlu elemanlar sonuçlarını hedeflenen yüzeyle yaklaştıran parametrelerin belirlenmesidir. Bu yöntem genellikle deneme-yanılma ile yapılmaktadır fakat bu süreç büyük zaman kayıplarına neden olmaktadır. Özellikle otomotiv endüstrisi gibi seri üretim yapılan firmalarda bu tarz kayıplar istenilmediğinden genellikle parametre hassasiyet analizi yapılmamaktadır. Tez çalışması kapsamında deneme-yanılma sürecinde yaşanan zaman kayıplarının önüne geçebilmek adına deneysel tasarım yöntemi ile hassasiyet analizi tercih edilmiştir.

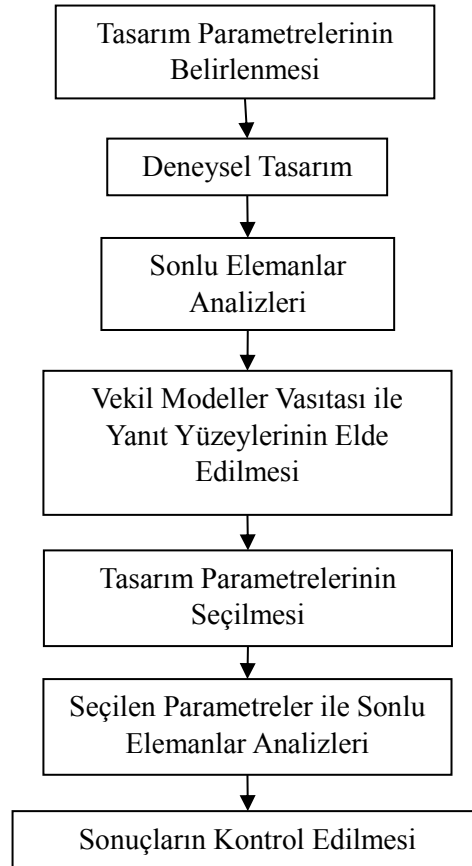
Bir araştırmacı için ne kadar deneye ihtiyaç olduğu, limitli olanaklar ile mümkün olduğunca nasıl çok bilgi alınacağı, yürütülen deneyin ana amacının ne olduğu, deney sonucunda hangi sonuçların beklendiği gibi sorular oldukça önemlidir. Deneyler, ölçülen sonuçlardaki değişiminin temel sebepleri belirlemek, maksimum ve minimum sonuçlar doğuran koşulları bulma, farklı değişkenler ile elde edilen sonuçları karşılaştırma ve ileriki sonuçların tahmini için matematiksel model elde etmek için yapılır [150]. Deneyler, sistemin veya prosesin nasıl çalıştığı hakkında bilgi veren bilimsel proseslerin bir parçası olarak görülebilir. Mühendislikte pek çok yaklaşım, problemin nasıl meydana geldiği ve nedenleri hakkında bilgi vermesinden dolayı deneysel çalışmalar içermesi gerekmektedir. Planlama ve deneyin yürütülmesi aşamasına yaklaşım deneysel strateji ile belirlenir. Deneylerde strateji, en iyi tahmin yaklaşımına dayanır. Yapılan deneylerde karar verme aşaması teknik ve teorik bilgi ile uyum sağlayan deneyimler ile elde edilir [151]. Deneysel tasarım yöntemleri farklı pek çok disiplin için geniş uygulama alanlarına sahiptir ve mühendislikte kritik önem arz eden araçlardır. Deneysel tasarım uygulamaları; gelişmiş proses getirisi, sapmada azalma ile nominal veya hedeflenen gereksinimlere daha yakın uyum sağlama, geliştirme süresinin ve maliyetin azalmasını sağlamak amacı ile yapılır.

Deneysel tasarımı içeren bazı uygulamalar şunlardır [151]:

- Temel tasarım konifürasyonları değerlendirilmesi ve karşılaştırılması
- Malzeme alternatiflerinin değerlendirilmesi
- Tasarım parametrelerinin seçimi.

- Ürün performansını belirleyen kilit parametrenin belirlenmesi

Bu bakış açısı ile deneysel tasarım yöntemi tez çalışması kapsamında tasarım parametrelerinin belirlenmesi adımı kullanılmıştır. Deneysel tasarım yönteminde belirlenen parametreler grubu içerisinde istenilen sonuca en uygun parametrenin seçimi yapılabilmektedir. Bu yöntem ile sonlu elemanlar parametrelerinden kümeler oluşturularak istenilen çıktılara göre belirlenen parametrelerin verdiği sonuçlar yanıt yüzeyleri ile tanımlanmaktadır. Sonrasında yanıt yüzey grafikleri kullanılarak bir karar mekanizmasının oluşturulması gerekmektedir. Karar mekanizması sonucunda mevcut prosese en uygun sonlu elemanlar parametrelerinin seçimi gerçekleştirilmektedir. Deneysel tasarım süreci Şekil 5.1’de verilmiştir.

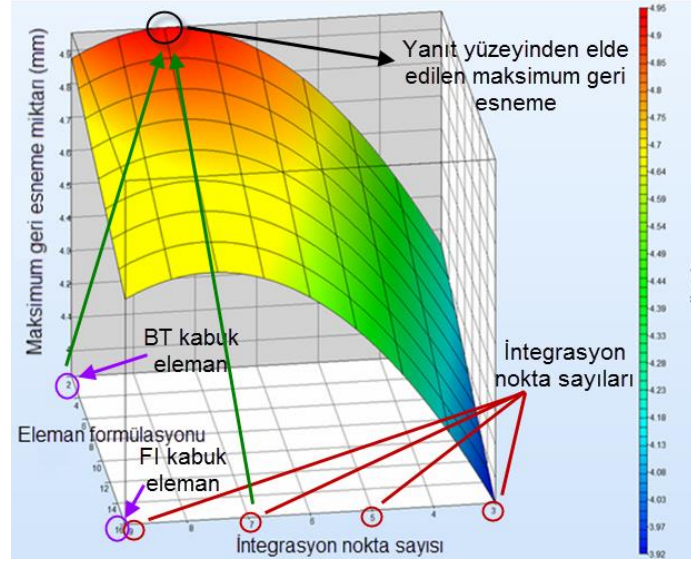


Şekil 5.2. Deneysel tasarım süreci iş akış şeması

Parametrelerin doğru seçimi her şeyden önce sonlu elemanlar yöntemi hakkında teorik bilgiye sahip olunmasını gerektirmektedir. Ağ yapısı, eleman tipi, eleman formülasyonu ve integrasyon nokta sayısı sonlu elemanlar parametreleri olarak

kullanılmaktadır. Sac metal formlama proseslerinde eleman tipi olarak kabuk elemanların kullanıldığı ve ağ yapısının oluşturulması tez çalışmasının 2. bölümünde belirtilmiştir. Bu kapsamda tasarım sürecinde eleman formülasyonu ve integrasyon nokta sayısı sonlu elemanlar hesaplama parametreleri olarak belirlenmiştir. Sonlu elemanlar hesaplama parametreleri her proses için değişkenlik göstermektedir, bu nedenle yapılan seçimler yalnızca ilgili proses için doğru parametreleri temsil etmektedir.

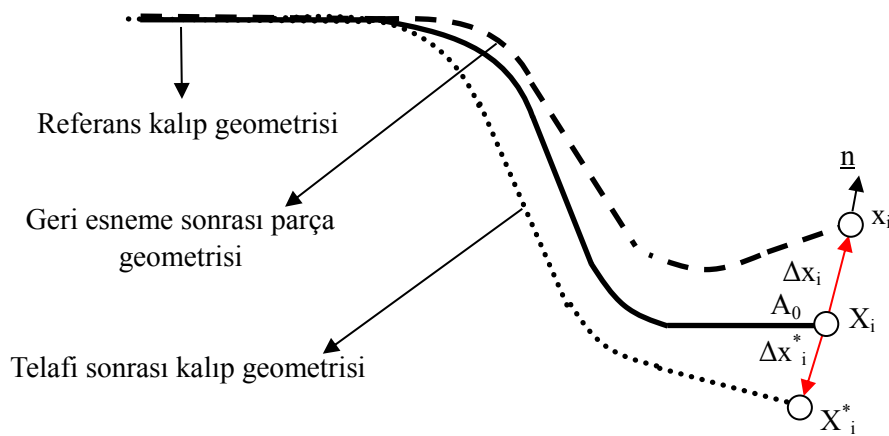
Deneysel tasarım kapsamında belirlenen sonlu elemanlar hesaplama parametreleri ile vekil modeller vasıtası ile analizler gerçekleştirilmektedir. Vekil modeller bir probleme ait girdiler ve çıktılar arasında bir bağıntı oluşturmaktadırlar. Vekil modeller vasıtası ile belirlenen parametrelerle tahminler gerçekleştirilir ve her tahmin sonucu yanıt yüzeyi üzerinde bir nokta oluşturur. Yanıt yüzeyleri ise deneysel tasarım sonucunda parametrelerin istenilen çıktıyı hangi koşullarda verdiğini gösteren ve deneysel tasarım sonucunda yapılacak olan karar verme mekanizmasının temelini oluştururlar. Literatürde en sık kullanılan yanıt yüzeyi 2. dereceden polinom yanıt yüzeyleridir [152]. Deneysel tasarım analizleri sonucunda 2 ya da 3 boyutlu yanıt yüzeyleri elde edilebilmektedir. Yanıt yüzeyleri elde edildikten sonra hedeflenen çıktıya göre bir karar verme süreci gerçekleştirilmelidir. Şekil 5.2'de belirlenen parametrelerle maksimum geri esneme miktarının elde edilmesini amaçlayan örnek bir deneysel tasarım sonucu elde edilen bir 3 boyutlu yanıt yüzeyi ve yanıt yüzeyi üzerinden karar verme mekanizması gösterilmiştir.



Şekil 5.3. 3-boyutlu yanıt yüzeyi üzerinden karar verme mekanizması

5.3. Üç Boyutlu Telafi Faktörü Dağılımı ile Geri Esneme Telifisi

Tez çalışmasının bu bölümünde tasarım yönteminin geri esneme telifisi adımı anlatılmıştır. Bu kapsamda Deplaman Ayar (DA) yöntemi kullanılmıştır. DA yöntemi formlama sonrası parça üzerinde meydana gelen geri esneme dağılımını dikkate almaktadır. DA yöntemi ile ilgili kapsamlı bilgi tez çalışmasının 3. bölümünde verilmiştir. Şekil 5.4’de DA yönteminin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 5.4. DA yönteminin şematik gösterimi

DA yönteminde, parçanın istenilen geometrisi (formlama yüzeyi) bilinmektedir fakat istenilen geometrinin elde edilebilmesi için gerekli kalıp yüzeyi bilinmemektedir.

Telafi adımı için hedef, bu kalıp yüzeyinin tespit edilmesidir. Şekil 5.4'de gösterilen form verilmiş bir parça üzerinden bir A_0 noktası alınırsa,

Burada n : yönü

X_i : A_0 noktasının ilk konum vektörünü (Referans geometri)

X_i^* : A_0 noktasının telafi sonrası konum vektörünü (Telafi yüzeyi)

x_i : Şekil bozulması sonrası A_0 noktasının konum vektörünü (Geri esneme yüzeyi)

Δx_i^* : Telafi vektörünü

Δx_i : Geri esneme vektörünü temsil etmektedir.

Bu durumda ya telafi sonrası konum vektörünün ya da telafi vektörünün bilinmesi telafi yüzeyinin oluşturulması için gerekli tüm parametrelerin bulunması adına yeterli olur.

$$X_i^A = X_i^{*A} - \Delta x_i^* \quad (5.1)$$

Burada bir malzeme noktası için, 2 vektörel yani 6 adet skaler bilinmeyen vardır fakat 3 adet denklem bulunmaktadır. Bilinmeyen sayısını azaltmak adına temel kabuller yapılmaktadır.

$$\Delta x_i^* \approx \alpha \Delta x_i \quad (5.2)$$

Denklem (5.2)'de geri esneme miktarı, telafi miktarı ile büyüklüğü temsil eden bir α katsayısı vasıtasıyla ilişkilendirilmiştir. α katsayısına telafi faktörü denilmektedir ve bu faktör parça üzerindeki her bir nokta ve her bir yön için farklı değerlerdedir. Ayrıca telafi ile geri esneme yönlerinin de aynı oldukları kabul edilirse,

$$\underline{n} = \underline{n}^* \quad (5.3)$$

yazılabilir. Böylelikle problem bir α dağılım problemine dönüşmüştür. Artık 3 skaler bilinmeyen mevcuttur.

$$\underline{\Delta x_1^*} + \underline{\Delta x_2^*} + \underline{\Delta x_3^*} = \alpha_1^A \underline{\Delta x_1} + \alpha_2^A \underline{\Delta x_2} + \alpha_3^A \underline{\Delta x_3} \quad (5.4)$$

n birim vektör olarak alınırsa,

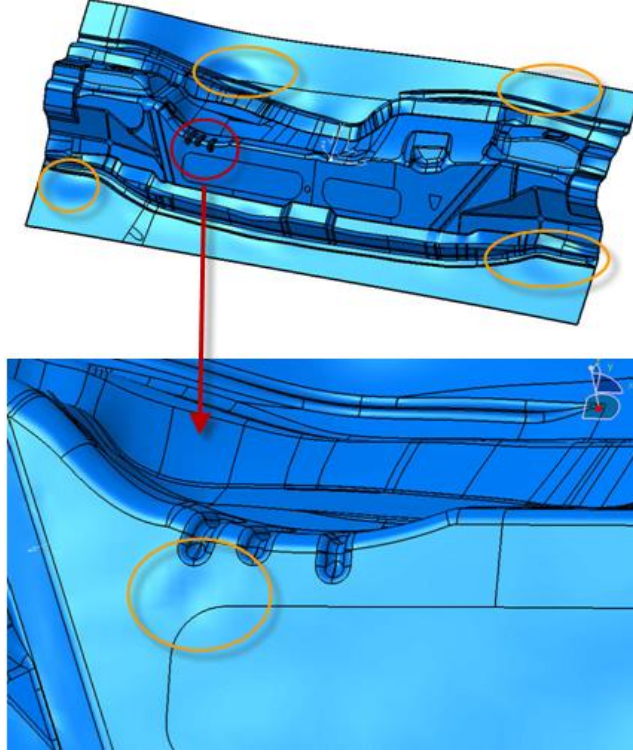
$$\Delta x_i^* = \alpha_i \Delta x_i = \alpha^* n \quad (5.5)$$

olur ve

$$\alpha^* = \frac{\alpha}{|\Delta x|} \quad (5.6)$$

yazılabilir. DA yöntemi ile geri esneme telafisinin hem akademik hem de endüstriyel kalıp örnekleri ile yapılan uygulamalarda başarılı olduğu görülmüştür [100-101]. Fakat yöntem iteratif olarak uygulandığında belirli bir iterasyona kadar başarı sağlanırken belirli bir noktadan sonra kalıp yüzeyi bozulmaktadır. DA yönteminde telafi formlama yönünde yapılmaktadır fakat şekilsel ve boyutsal bozukluklar üç boyutludur, yani parça sadece formlama yönünde değil diğer yönlerde de bozulmaktadır. Bu nedenle telafi de üç boyutlu yapılmalıdır. DA yönteminin iteratif olarak kullanıldığında yaşanan kalıp bozulması problemleri de bu nedenden kaynaklanmaktadır. Çünkü belirli bir iterasyondan sonra formlama yönünde telafi yapılırken diğer yönlerde parça telafi edilmemektedir. Şekil bozukluğu en çok formlama yönünde oluşmaktadır fakat diğer yönlerde de belirli miktarlarda bozulma mevcuttur. DA yöntemi ile telafi gerçekleştirilirken belirli bir iterasyon sayısına kadar formlama yönündeki bozulma, diğer yönlere göre baskın olduğundan diğer yönlerdeki bozulmalar ihmal edilebilir boyutlardadır fakat iterasyonlar süresince formlama yönündeki bozulmalar sürekli azalırken diğer yönlerdeki bozulma seviyesi değişmemektedir. Dolayısı ile belirli bir iterasyon sayısından sonra diğer yönlerdeki şekil bozuklukları ihmal edilemeyecek duruma geldiğinden bu problem telafi sırasında kalıp geometrisine yansımaktadır ve kalıp geometrisi bozulma ve çarpılmalar başlamaktadır. Şekil 5.5'te DA yöntemi ile telafi sonrasında kalıp bozulmalarına bir örnek görülmektedir. Bu kalıp yüzeyi, Coşkunöz A.Ş. firmasında çalışılan, DC04 malzemesine sahip bir ön gövde parçasının form yüzeyidir. Şekilden

de görüldüğü üzere DA yöntemi ile telafi sonrasında gösterilen bölgelerde bozulmalar meydana gelmiştir.



Şekil 5.5. DA yöntemi ile telafi sonucu kalıp yüzeylerinde meydana gelen bozulmalar

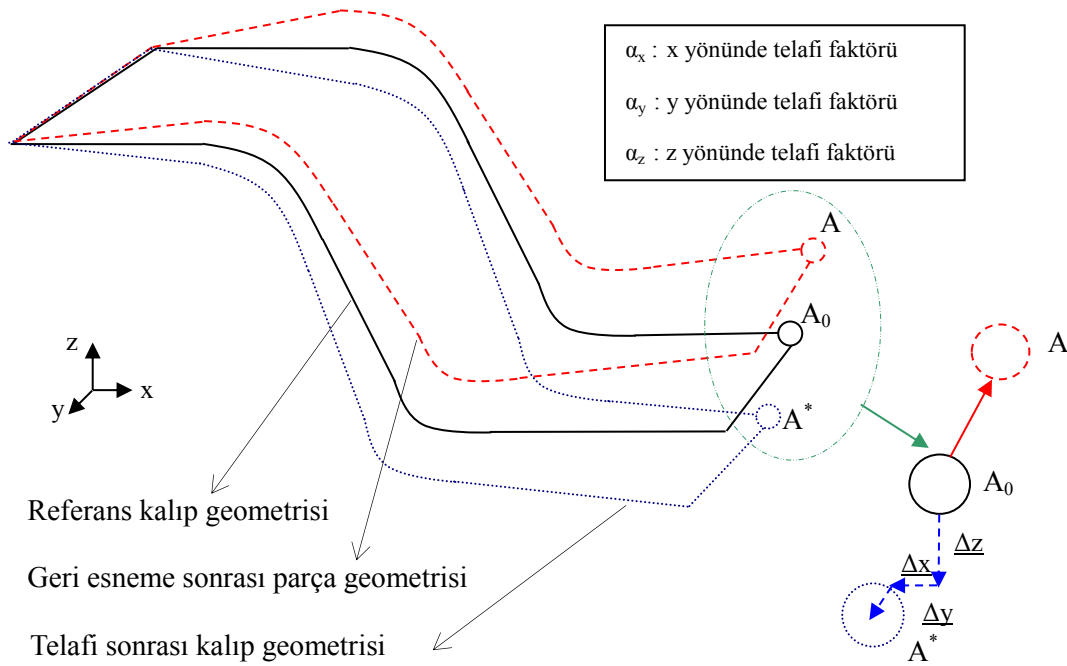
Kalıp bozulmalarını engellemek adına tez çalışması kapsamında üç boyutlu telafi faktörü dağılımı ile telafi gerçekleştirilmiştir. Telafi faktörünün kullanımı ile ilgili detaylı bilgi tez çalışmasının 3. Bölümünde verilmiştir.

Telafi faktörünün dağılım olarak uygulanması ile telafi her düğüm noktası için farklı miktarlarda gerçekleştirilmektedir. Telafi faktörünün üç boyutlu dağılım şeklinde uygulanmasında parça üzerindeki her nokta, dikdörtgen kartezyen uzayındaki her yönde telafi edilmektedir. Her bir nokta için üç yönde de telafi faktörü (α_x , α_y , α_z) uygulanmaktadır (Şekil 5.6). Üç boyutlu telafi faktörü dağılımı herhangi bir geometri üzerinden alınan bir A noktası için Denklem 5.7'deki ifade yazılabilir.

$$A^* = -(\alpha_x^A \Delta x + \alpha_y^A \Delta y + \alpha_z^A \Delta z) \quad (5.7)$$

Burada α_x^A , α_y^A, α_z^A kartezyen koordinat eksen yönlerindeki telafi faktörleri, Δx , Δy , Δz ise aynı yönlerdeki şekil bozukluğu miktarlarıdır. A^* ise A noktasının telafi sonrası konumudur. Denklem (5.7)'deki (-) ifadesi telafinin geri esnemeye ters yönde gerçekleştirildiğini temsil etmektedir.

Telafi faktörünün üç boyutlu dağılım şeklinde uygulanması ile kalıp yüzeylerindeki bozulmaların önüne geçilerek daha kontrollü telafiler gerçekleştirilebilmektedir. Bu sayede, telafi sürecinde geriye dönük iyileştirmeler yapılmasının önüne geçilerek telafi sırasında yaşanan zaman kayıpları engellenmektedir. Üç boyutlu telafi faktörünün uygulanması tez çalışmasının 6. Bölümünde endüstriyel bir örnek üzerinden anlatılmıştır.



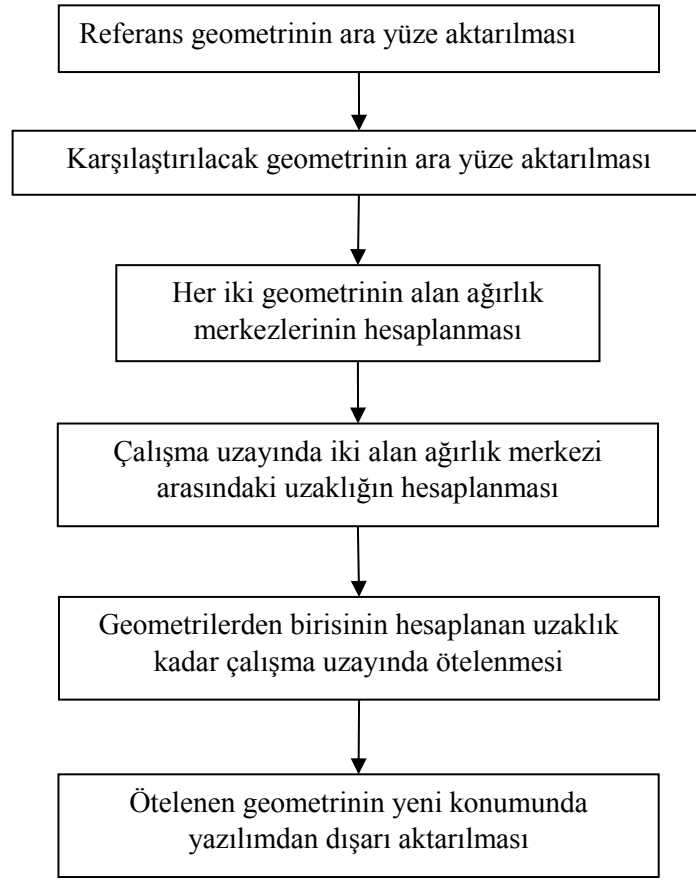
Şekil 5.6. Telafi faktörünün üç boyutlu dağılım şeklinde kullanılması

5.4. Tez Çalışması Kapsamında Geliştirilen Arayüz

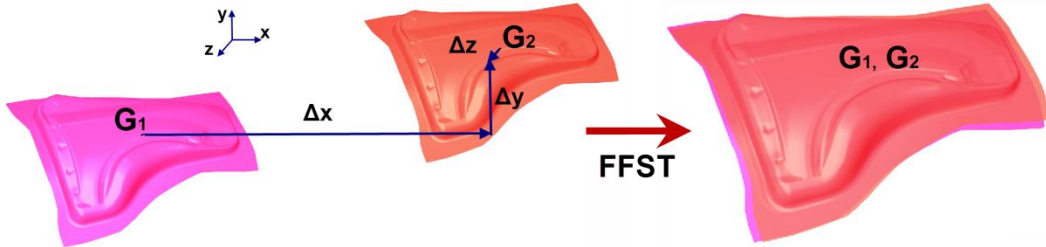
Sac metal formlama işlemleri için presten çıkan parçalar, sonlu elemanlar sonuçları ya da kalıp yüzeyleri ile karşılaştırmak amacıyla bilgisayar ortamına aktarılarak referans yüzeyler elde edilmektedir. Bu konu hakkında detaylı bilgi, tez çalışmasının 4. Bölümünde verilmiştir. Sac metal formlama işlemleri için karşılaştırmalar,

referans yüzeyler ile sonlu elemanlar analizi sonuçları ile yapılabildiği gibi geri esneme dağılımını elde etmek adına sonlu elemanlar analizlerinin formlama ve geri esneme yüzeyleri ile de yapılabilmektedir. Bu kapsamda karşılaştırılacak yüzeylerin çalışma uzayında konumlandırılması gerekmektedir. Genellikle yazılımlar karşılaştırılacak yüzeyleri, çalışma uzayında her bir geometriyi kendi yerel koordinat sistemine göre konumlandırır ve kullanıcı bu koordinat sistemlerini ya da yüzeyler üzerinde belirlenen düğüm noktalarını karşılaştırarak karşılaştırma yapabilmektedir. Bu yöntemler sıklıkla kullanılsa da aslında hassas sonuçlar vermemektedirler çünkü yüzey uyumluluk analizleri sonuçları, endüstriyel tolerans bantları içerisine yüzeylere ait ne kadar ortak noktanın girdiğine bağlıdır. Aynı yüzeylerin yanlış konumlandırmaları sonrasında uyumluluk analizi sonuçları düşük çıkabilmektedir. Bu nedenle hassas konumlandırma işlemi oldukça kritiktir. Aynı zamanda koordinat sistemlerinin ya da düğüm noktalarının karşılaştırılması, kullanıcı tarafından gerçekleştirildiği için yüzeylerin konumlandırılması zaman kayıplarına neden olmaktadır.

Efektif bir karşılaştırma yapabilmek adına tez çalışması kapsamında serbest formlu yüzeyleri uzayda konumlandıran bir ara yüz geliştirilmiştir. Geliştirilen ara yüz vasıtası ile karşılaştırılacak yüzeyler uzayda geometrik ağırlık merkezlerine göre konumlandırılmaktadır. Böylelikle her iki yüzey de koordinat sistemlerinin karşılaştırılması sonucu yapılan konumlandırmaya göre daha hassas konumlandırılmış olmaktadır. Karşılaştırılacak yüzeylerin orijinleri aynı olmayabilir ve böyle bir durumda geleneksel yöntemlerde koordinat sistemlerinin karşılaştırılması iki yüzeyin de uzayda yanlış konumlandırılmasına neden olur. Bu durumun düzeltilmesi için yapılacak her işlem ekstra zaman kayıplarını beraberinde getirmektedir. Geliştirilen ara yüz hem bu işlemleri otomatik olarak yapmakta hem de referans olarak yüzeyler alındığı için koordinat sistemleri farklı olsa dahi konumlandırma doğru bir şekilde gerçekleşmektedir. Geliştirilen ara yüz FFST (Free Form Surface Translation Toolbox) olarak adlandırılmıştır. Şekil 5.7’de geliştirilen ara yüzün çalışma prensibi verilmiştir.



Şekil 5.7. FFST çalışma prensibi

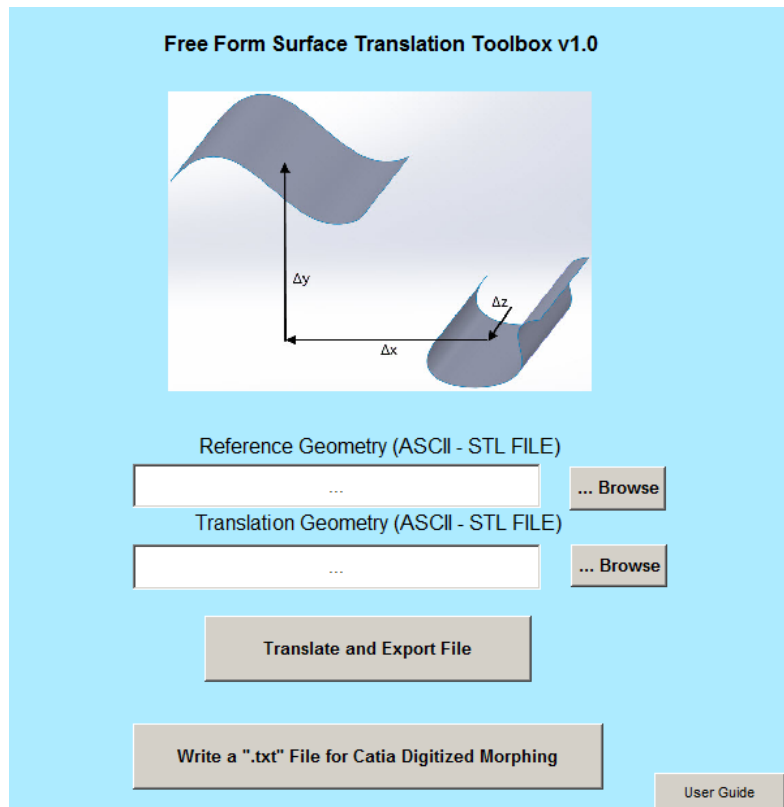


Şekil 5.8. FFST ara yüzü konumlandırma örneği

FFST ara yüzü ASCII-stl dosyalar ile çalışabilmektedir. Geometrilerin alan ağırlık merkezleri yüzeylerin ağ yapıları kullanılarak hesaplanmaktadır. FFST ile elemanların üçgen ya da dörtgen eleman olması ve karşılaştırılacak yüzey geometrilerinin ya da ağ yapılarının farklı olması durumunda da konumlandırma işlemi yapılabilmektedir. Bu önemli bir özelliktir çünkü farklı ağ yapılarına sahip geometrilerin konumlandırılması oldukça zor bir süreçtir [153]. FFST ile uzayda konumlandırılan iki örnek yüzey Şekil 5.8'de verilmiştir.

FFST, yüzey karşılaştırmalarının sıklıkla yapıldığı özellikle otomotiv ve havacılık sektöründe efektif bir şekilde kullanılabilir. Pozisyonlama için kullanıcının ihtiyaç duyduğu konumlandırma prosesi otomatik olarak FFST vasıtası ile yapılabilir. Böylelikle endüstrinin en büyük ihtiyaçlarından olan zaman kazancı da sağlanmış olmaktadır. Farklı geometrilerle ve farklı ağ yapıları ile de çalışılabilir yine ara yüzün önemli özelliklerindedir. Sac metal formlama işlemlerinde sonlu elemanlar analizleri sonrasında elde edilen yüzeylerin referans geometrilerle karşılaştırılarak tahmin doğruluğunun hesaplanması için ya da formlama sonrası meydana gelen şekil bozukluğunun hesaplanabilmesi için yüzey pozisyonlama işleminin doğru olarak yapılması gerekmektedir. Pozisyonlama doğru yapılmadığında yüzey uyumluluk analizi sonuçları da doğru olmayacaktır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda pozisyonlama yanlışlığından dolayı düşük yüzey uyumluluğu elde edilmesi sonucunda kullanıcı tarafından sonlu elemanlar analizleri üzerinde çeşitli düzenlemeler yapılarak yüzey uyumluluk oranı yükseltilmeye çalışılmaktadır. Fakat doğru pozisyonlama ile yüzey uyumluluğu sonuçları daha hassas elde edileceğinden tahmin doğruluğunun artırılması için gereken iş yükü daha az olacaktır. Ayrıca FFST, kullanıcının ihtiyaçlarını kolay bir şekilde karşılayabilmesi için bir kullanıcı dostu bir ara yüze sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. FFST ara yüzü Şekil 5.9’da verilmiştir. Tasarlanan ara yüz vasıtası ile kullanıcı referans ve karşılaştırma geometrilerini kolaylıkla yazılıma aktarabilmektedir ve tek bir buton vasıtası ile hesaplamalar yapılmakta ve referans yüzeye göre konumlandırılan geometri yazılım tarafından yine ASCII-stl dosya olarak yazılabilmektedir.

Geliştirilen ara yüz ile sonlu elemanlar analizi sonuçları, bilgisayar ortamına aktarılan tarama yüzeyleri ile de karşılaştırma yapılabilir. Tarama işlemi sonucunda yüzeyler üçgenleme metodu ile “stl” olarak oluşturulduğundan, sonlu elemanlar ağ yapısı ile aralarında geliştirilen ara yüz kullanılarak ilişki kurulabilmektedir. Ara yüz aynı zamanda Deplasman Adaptasyon (DA) yönteminde kullanılmak üzere sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen formlama ve geri esneme yüzeylerine ait düğüm noktaları arasında fark matrisi hesaplanarak ara yüzden dışarı yazılabilmektedir. Bu dosya vasıtası ile DA yöntemi kullanılarak telafili kalıp yüzeyleri kolaylıkla geliştirilebilmektedir.



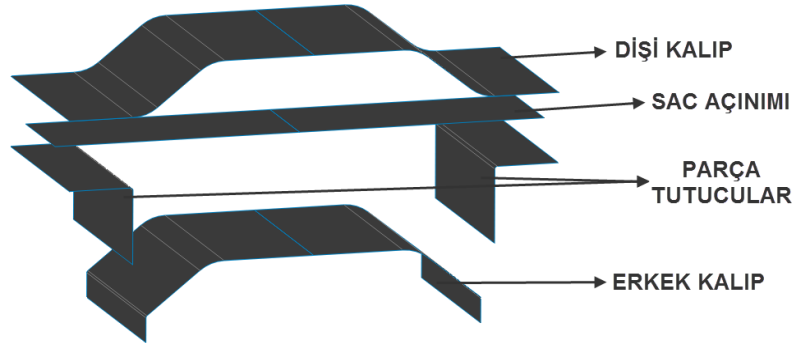
Şekil 5.9. FFST ara yüzü

BÖLÜM 6. UYGULAMA ÖRNEKLERİ

Tez çalışması kapsamında önerilen tasarım yöntemi, ilk olarak literatürde sıklıkla kullanılmış olan ve birçok araştırmacı tarafından geri esneme telafisi konusunda çalışılmış, açılı kanal çekme işleminin incelenmesi ve geri esneme telafili kalıp form yüzey tasarımının gerçekleştirilmesinde kullanılmıştır. Literatürden seçilen bu örnek çalışmadan sonra geliştirilen yöntem, endüstriyel bir formlama işleminde uygulanmış ve gerek sayısal gerekse deneysel sonuçlarla değerlendirilmesi yapılmıştır. Seçilen endüstriyel parça yüksek geri esneme özelliği bilinen ve Coşkunöz A.Ş. firması tarafından ilk kalıp tasarımının ve telafi çalışmasının eş yürütüldüğü, imalatı yapılan bir tavan destek sacıdır. Önerilen geri esneme telafi yönteminin gerek literatürden alınan açılı kanal çekme gerekse endüstriyel uygulamada tatminkâr sonuçlar verdiği ve nihai telafili kalıp yüzeyine iterasyon sayısından bağımsız yakınsadığı tespit edilmiştir.

6.1. Literatür Uygulaması: Açılı Kanal Çekme İşlemi

Önerilen geri esneme telafi yöntemi ilk olarak literatürde daha önce üzerinde çalışılmış ve Karafillis'in doktora çalışmasında [154] da kullanılan açılı kanal çekme işlemine uygulanmıştır.

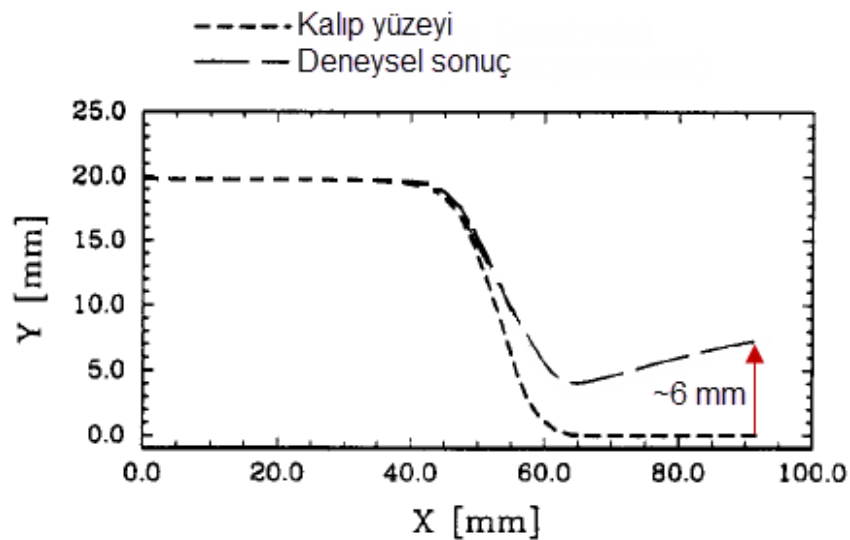


Şekil 6.1. Çalışma kapsamında kullanılan kalıp takımı

Çekme miktarının düşük olmasından dolayı geri esnemenin yüksek olduğu bir işlem olmasından ve aynı zamanda Karafillis ve Boyce [93] tarafından ileri esnetme yönteminin önerildiği ve uygulandığı kalıp yüzeyleri olduğundan tez çalışması kapsamında literatür uygulaması olarak açılı kanal çekme işlemi seçilmiştir. Tez çalışması kapsamında önerilen telafi yöntemi, literatürde sunulan ileri esnetme yöntemi ile karşılaştırılacağından kalıp geometrisi ve sac malzemesi Karafillis ve Boyce [93] çalışmasına uyumlu olarak kullanılmıştır. Kalıp yüzeyleri, ilgili çalışmaya ait boyutlar kullanılarak elde edilmiş ve sonlu elemanlar modellemesi için kullanılmak üzere kalıp takımı, çalışma uzayında konumlandırılmıştır. Kullanılan kalıp takımı Şekil 6.1’de görülmektedir. Malzeme olarak ise 1 mm kalınlığında 2008-T4 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Malzemeye ait mekanik özellikler literatürden [155] alınmış olup Tablo 6.1’de verilmiştir. Uygulanan telafi prosesi literatürdeki deneysel çalışma ile karşılaştırılacağından literatürde elde edilen deneysel geri esneme geometrisi referans geometri olarak kullanılmıştır. Deneysel geri esneme geometrisi Şekil 6.2’de verilmiştir.

Tablo 6.1. Alüminyum 2008-T4 alaşımı mekanik özellikleri [155]

σ_{akma} (MPa)	K (MPa)	n	R_0	R_{45}	R_{90}
150	535	0.27	0.58	0.48	0.78



Şekil 6.2. Kanal çekme prosesi deneysel maksimum geri esneme miktarı [93]

6.1.1. Açılı kanal çekme işlemi sonlu elemanlar modellemesi

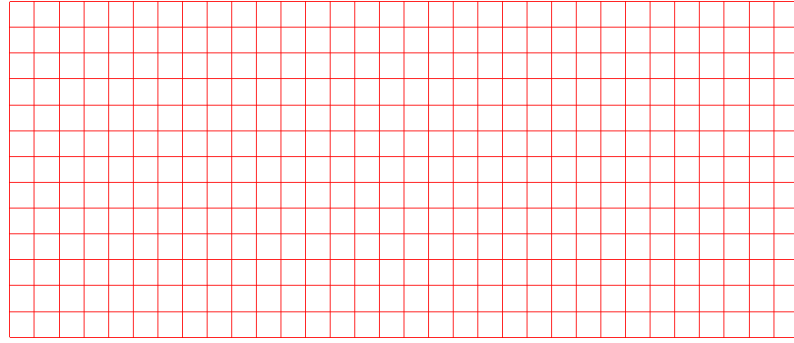
Açılı kanal çekme işlemi için ilk olarak sonlu elemanlar modellemesi gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda telafi adımıında zaman kayıplarını azaltmak ve telafi hassasiyetini arttırmak adına sonlu elemanlar analizleri için hassasiyet analizleri yapılmıştır. Sonlu elemanlar modellemesinde, kalıp geometrisinde simetri bulunduğundan, çözüm süresini kısaltmak adına $\frac{1}{2}$ model kullanılmıştır. Çalışma kapsamında, literatür sonuçları ile karşılaştırma yapılacağından, proses parametreleri olarak yine literatürle uyumlu olması adına Karafillis ve Boyce'un deneysel çalışmalarında belirlenen değerler kullanılmıştır. Bu kapsamda, sürtünme katsayısı 0.08 ve parça tutucu kuvvet yarı model için 5 kN olarak alınmıştır.

6.1.1.1. Ağ yapısının oluşturulması ve ağ hassasiyetinin incelenmesi

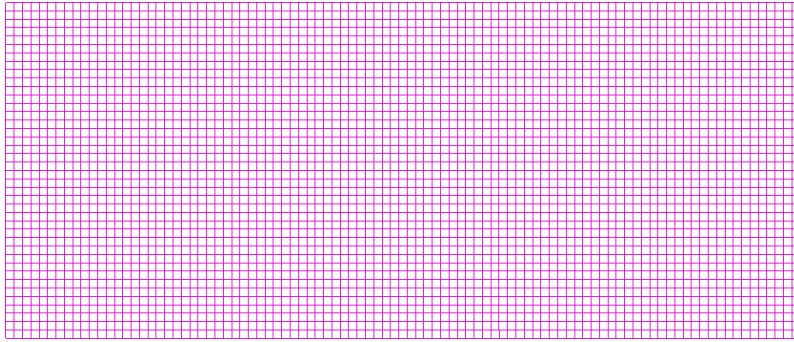
Sonlu elemanlar analizleri ile geri esneme davranışını modellemek adına ilk olarak kalıp takımının ve sac açınımının ağ yapısı oluşturulmuştur. Tüm kalıp elemanları ve sac açınımı için kabuk elemanlar kullanılmıştır. Ağ yapısının geri esneme tahminine etkisinin incelenmesi adına sac açınımı, iki farklı eleman boyutu ile çalışılmıştır. Birinci uygulamada sac açınımı 3x3 mm, ikinci uygulamada ise 1x1 mm boyutundaki dörtgen kabuk elemanlarla örülmüş ve ilk sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Her iki model için sac açınımında kullanılan ağ yapıları Şekil 6.3'te verilmiştir.

Elde edilen ağ yapıları ile ilk sonlu elemanlar analizleri yapılmış ve elde edilen geri esneme yüzeyleri literatürdeki deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları Şekil 6.4'te görülmektedir. Literatürde açılı kanal çekme işlemi için deneysel geri esneme miktarı yaklaşık 6 mm olarak elde edilmiştir [93]. Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizleri sonucunda, maksimum geri esneme miktarı, 3x3 mm'lik ağ yapısı ile 4.27 mm, 1x1 mm'lik ağ yapısı ile ise 5.9 mm olarak hesaplanmıştır. Sonuçlardan da görüldüğü üzere 1x1 mm eleman boyutuna sahip ağ yapısı ile gerçekleştirilen simülasyon sonuçları deneysel yüzeyle daha uyumludur. Çalışma kapsamında bu adımdan sonra gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizlerinde 1x1 mm'lik elemanlarla oluşturulan ağ yapısı

kullanılmıştır. Kullanılan ağ yapısı Şekil 6.5'te gösterilmiştir. Bu ağ yapısında, kalıp takımında yarı model için, dişi kalıpta 120, erkek kalıpta 88, parça tutucuda 64 ve sac malzemede 3800 eleman bulunmaktadır.

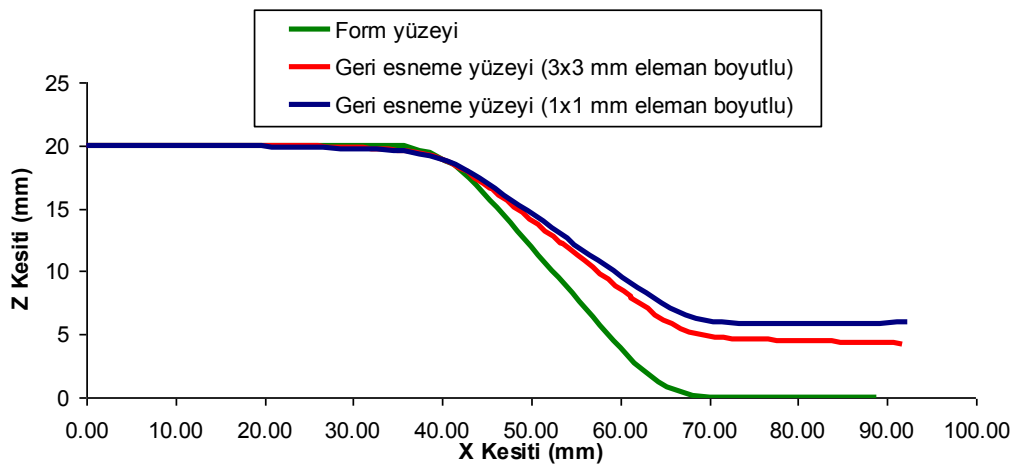


(a)

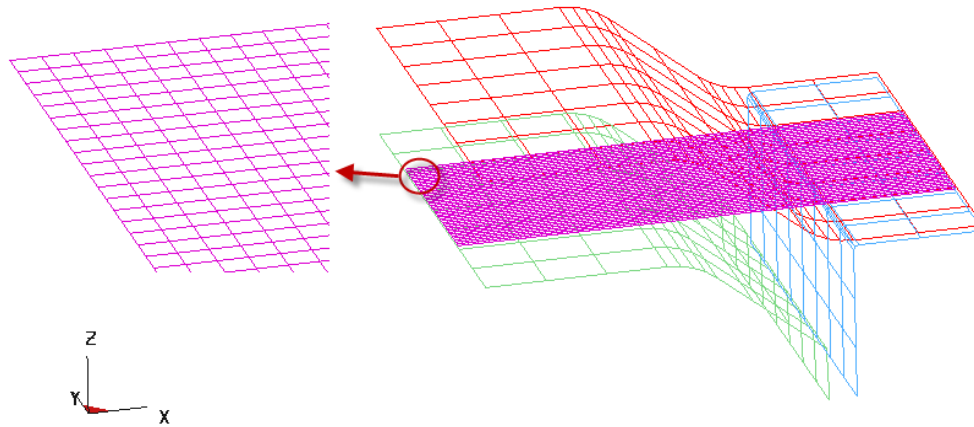


(b)

Şekil 6.3. Sac açımına ait (a) 3x3 mm ağ yapısı (b) 1x1 mm ağ yapısı



Şekil 6.4. Ağ yapılarına göre sonlu elemanlar analizi sonucu elde edilen geri esneme yüzeylerinin karşılaştırılması



Şekil 6.5. Açılı kanal çekme prosesi kalıp takımı ağ yapısı

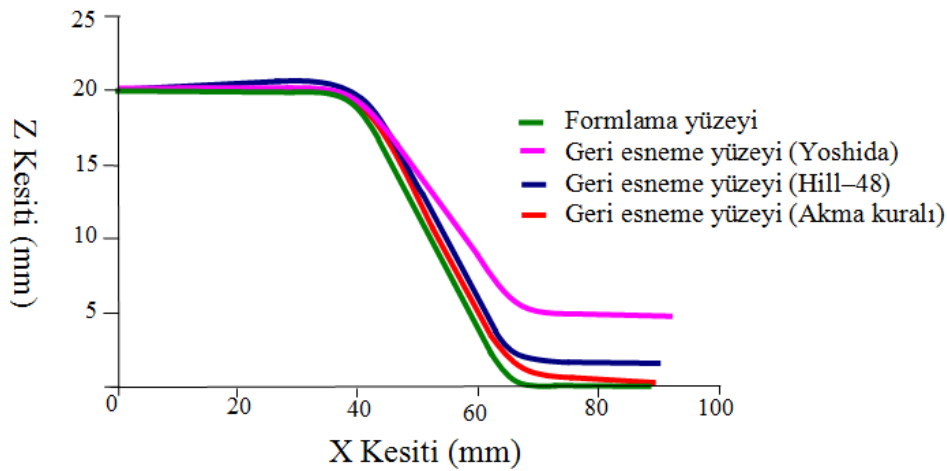
6.1.1.2. Malzeme davranışının modellenmesi

Sonlu elemanlar ağ yapısının elde edilmesinin ardından sonlu elemanlar analizleri için malzeme davranışının modellenmesi gerekmektedir. Bu kapsamda sonlu elemanlar analizlerinde malzeme kartları kullanılmaktadır. Tez çalışması kapsamında sonlu elemanlar analizleri, Ls-Dyna yazılımında gerçekleştirilmiştir. Ls-Dyna yazılımının diğer ticari yazılımlara göre daha fazla sonlu elemanlar hesaplama parametresi ve malzeme modeli barındırması tercih sebebi olmuştur. Ls-Dyna kütüphanesinde yaklaşık 200 adet malzeme kartı yer almaktadır [47].

Karafillis [154] doktora çalışması kapsamında yaptığı sonlu elemanlar analizlerinde yalnızca izotrop malzeme modeli kullanmıştır. Tez çalışması kapsamında ise açılı kanal çekme işlemi için izotrop malzeme ve izotrop pekleşme kabulü yapan akma kuralı malzeme modeli, anizotropik malzeme ve izotrop pekleşme kabulü yapan Hill-48 modeli ve anizotropik malzeme-kinematik pekleşme kabulü yapan Yoshida malzeme modeli kullanılmıştır. Karşılaştırma kriteri olarak yalnızca malzeme modelleri incelendiğinden proses ve sonlu elemanlar hesaplamam parametreleri tüm modeller için aynı değerlerde kullanılmıştır. AA2008-T4 malzemesi için seçilen malzeme modellerinde kullanılan parametreler Tablo 6.2’de verilmiştir.

Tablo 6.2. AA2008-T4 malzemesi için malzeme modellerinde kullanılan parametreler

İzotrop malzeme-izotrop pekleşme kabulü yapan akma kuralı (Power Law) malzeme modeli							
E (GPa)	ν	K	n	σ_{ak} (MPa)			
70	0.33	600	0.27	101			
Anizotropik malzeme-izotrop pekleşme kabulü yapan Hill-48 malzeme modeli							
E (GPa)	ν	K	n	σ_{ak} (MPa)	R		
70	0.33	600	0.27	101	0.58		
Anizotropik malzeme-kinematik pekleşme kabulü yapan Yoshida malzeme modeli							
E (GPa)	ν	R	σ_{ak} (MPa)	C	K (MPa)	H	b
70	0.33	0.58	101	539.4	600	0.5	200



Şekil 6.6. Farklı malzeme modelleri ile elde edilen geri esneme sonuçları

Her bir malzeme modeli ile sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiş ve bu kapsamda yine her bir malzeme modeli için geri esneme yüzeyleri elde edilmiştir. Elde edilen geri esneme yüzeylerine ait karşılaştırma sonuçları Şekil 6.6'da verilmiştir. Farklı malzeme modelleri ile elde edilen geri esneme sonuçları incelendiğinde deneysel sonuçlara en yakın sonuç anizotropik malzeme-kinematik pekleşme kabulü yapan Yoshida malzeme modeli ile elde edilmiştir. Diğer malzeme modelleri geri esneme tahmininde başarılı olamamıştır. Kinematik malzeme modellerinin geri esneme davranışını izotrop malzeme modellerine göre daha doğru tahmin ettiği sonucu literatürdeki diğer çalışmalarla da desteklenmektedir [129-130]. Bu nedenle, tez çalışması kapsamında sonraki aşamalar için gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizlerinde Yoshida kinematik pekleşme malzeme modeli kullanılmıştır.

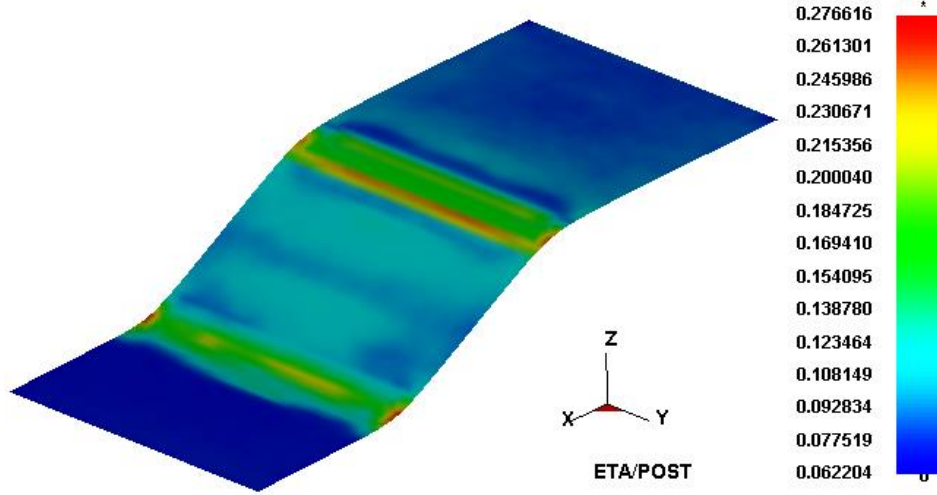
6.1.1.3. Parametre hassasiyet analizi

Sonlu elemanlar modeli hassasiyet çalışmasının ikinci adımı olarak açılı kanal çekme işlemi için parametre hassasiyet analizi gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, parametrelerin belirlenmesinde deneysel tasarım yöntemi kullanılmıştır. Deneysel tasarım prosesi, tahmin sonuçlarını iyileştirmeye yönelik bir yöntem olarak kullanıldığından, tahmin sonuçlarını doğrulamak adına Karafillis ve Boyce [93] çalışmasındaki deneysel maksimum geri esneme miktarı referans alınmıştır. Sonlu elemanlar hesaplama parametrelerinden eleman formülasyonu ve integrasyon nokta sayısı deneysel parametreler olarak belirlenmiştir. Tez çalışması kapsamındaki sonlu elemanlar analizleri Ls-Dyna yazılımında gerçekleştirildiğinden uyumlu çalışabilmek adına deneysel tasarım prosesi için Ls-Opt yazılımı kullanılmıştır. Sonlu elemanlar parametreleri için seçilen değerler Tablo 6.3'te gösterilmiştir.

Sac metal formlama işlemlerinde kritik unsurlardan birisi de incelme miktarıdır fakat açılı kanal çekme işlemi için incelme miktarı oldukça düşük seviyelerde olduğundan incelme, deneysel tasarım sonuçlarının değerlendirilmesinde bir kriter olarak kullanılmamıştır. İncelme dağılımı (%), Şekil 6.7'de görülmektedir. Bu nedenle, deneysel tasarım için karar verme kriteri olarak yalnızca maksimum geri esneme miktarı dikkate alınmıştır. Bu proses için deneysel tasarım sonrasında deneysel maksimum geri esneme miktarına en yakın sonucu veren sonlu elemanlar hesaplama parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır.

Tablo 6.3. Deneysel tasarım için belirlenen parametreler ve değerleri

Sonlu elemanlar parametresi	Değeri
Eleman Formülasyonu	BT ve FI kabuk elemanlar
İntegrasyon Nokta Sayısı	3 / 5 / 7 / 9



Şekil 6.7. Kanal çekme prosesi sonlu elemanlar analizi sonrası % incelme dağılımı

Deneysel tasarım kapsamında belirlenen sonlu elemanlar hesaplama parametreleri ile vekil modeller vasıtası ile analizler gerçekleştirilmiştir. Vekil modeller bir probleme ait girdiler ve çıktılar arasında bir bağıntı oluşturmaktadırlar. Literatürde en sık kullanılan yanıt yüzeyi 2. dereceden polinom yanıt yüzeyleridir [152]. Bu bilgiler ışığında çalışma kapsamında yanıt yüzeyi olarak, 2. dereceden polinom yanıt yüzeyleri seçilmiştir. Deneysel tasarım sonrasında 2 boyutlu ve 3 boyutlu yanıt yüzeyleri elde edilmiştir ve hangi parametrelerin deneysel yüzeye en yakın sonuç verdiği belirlenmiştir. Dolayısı ile belirlenen parametreler açılı kanal çekme işlemi sonlu elemanlar analizi için en hassas parametrelerdir. Deneysel tasarım prosesi sonucunda elde edilen 2 ve 3 boyutlu yanıt yüzeyleri tez çalışmasının EK-B bölümünde verilmiştir.

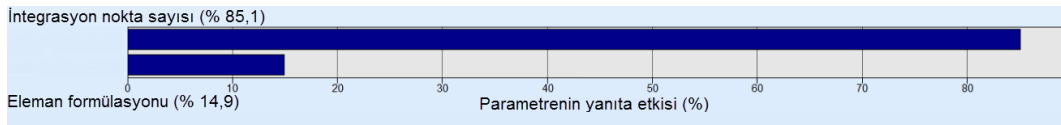
Yanıt yüzeylerinin elde edilmesinin ardından karar verme mekanizması gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda 2-boyutlu yanıt yüzeyleri hem integrasyon nokta sayısı için hem de eleman formülasyonu için ayrı ayrı incelenebilmektedir, aynı zamanda 3-boyutlu yanıt yüzeyi sonucunda tüm parametreler aynı anda gözlemlenebilmektedir. Deneysel tasarım sonrasında parametre çiftlerine göre elde edilen maksimum geri esneme miktarları Tablo 6.4'te verilmiştir.

Tablo 6.4. Parametre çiftlerine göre maksimum geri esneme miktarları

İntegrasyon Nokta Sayısı	Eleman Formülasyonu	Maksimum geri esneme miktarı (mm)
3	FI-kabuk eleman	~3,9
5	FI-kabuk eleman	~4,4
7	FI-kabuk eleman	~4,70
9	FI-kabuk eleman	~4,50
3	BT-kabuk eleman	~4,25
5	BT-kabuk eleman	~4,70
7	BT-kabuk eleman	~5,00
9	BT-kabuk eleman	~4,85

Deneysel tasarım sonrasında deneysel sonuçlara en yakın maksimum geri esneme miktarına BT kabuk eleman ve 7 integrasyon noktası kullanıldığında ulaşıldığı tespit edilmiştir. Bu durumda maksimum geri esneme miktarı 5,9 mm'dir. Açılı kanal çekme işlemi için belirlenen tek kriter maksimum geri esneme miktarı olduğundan sonlu elemanlar hesaplama parametreleri olarak BT kabuk eleman ve 7 integrasyon nokta sayısı seçilmiştir.

Deneysel tasarım çalışması kapsamında aynı zamanda, parametrelerin maksimum geri esneme miktarına etki ağırlıkları da incelenmiştir. Parametrelerin etki ağırlıkları Şekil 6.8'de gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde açılı kanal çekme işleminde maksimum geri esneme miktarına, integrasyon nokta sayısının yaklaşık %85 oranında, eleman formülasyonunun ise yaklaşık %15 oranında etki ettiği belirlenmiştir. Bu sonuca göre, açılı kanal çekme işlemi için geri esneme açısından sonlu elemanlar hesaplama parametrelerinden ilk olarak integrasyon nokta sayısının incelenmesi gerektiği tespit edilmiştir.



Şekil 6.8. Kanal çekme prosesi için sonlu elemanlar parametrelerinin maksimum geri esneme miktarına etki ağırlıkları

6.1.2. Açılı kanal çekme işlemi için telafili kalıp yüzeylerinin geliştirilmesi

Tez çalışması kapsamında önerilen tasarım yöntemi kapsamında geri esneme miktarı yüksek hassasiyetle elde edildikten sonra geri esneme telafisi gerçekleştirilmiştir. Bu

amaçla ilk olarak proses parametrelerinin geri esneme davranışına etkisi incelenmiştir. Sonlu elemanlar analizlerinde malzeme modeli olarak önceki çalışmalarda belirlenen Yoshida kinematik pekleşme malzeme modeli kullanılmıştır.

6.1.2.1. Proses parametrelerinin sonlu elemanlar geri esneme davranışına etkisi

Proses parametrelerinin geri esneme davranışına etkisi hassasiyet analizlerinde olduğu gibi deneysel tasarım yöntemi ile incelenmiştir. Deneysel tasarım yönteminde bu kez tasarım parametreleri olarak parça tutucu kuvvet ve sürtünme katsayısı seçilmiştir. Bu parametreler için maksimum ve minimum aralıklar belirlenerek parametrelerin bu aralıklar içerisindeki değerleri ile sonlu elemanlar analizlerinde geri esneme davranışına etkileri incelenmiştir. Bu çalışmada amaç, geri esneme telafisi olduğu için, karar verme mekanizmasında geri esnemeyi minimum yapan proses parametrelerinin seçimi gerçekleştirilecektir. Deneysel tasarım için belirlenen parametreler ve aralıkları Tablo 6.5'te verilmiştir.

Deneysel tasarım prosesi kapsamında hassasiyet analizlerinde olduğu gibi yine vekil modeller vasıtası ile yanıt yüzeyleri elde edilmiş ve yanıt yüzeyleri incelenerek proses parametreleri belirlenmiştir. Hassasiyet analizlerinden farklı olarak bu çalışmada parametreler, belirlenen değerlerle değil belirlenen aralıklarda incelenmiştir. Deneysel tasarım prosesi sonrasında yine 2 ve 3 boyutlu yanıt yüzeyleri elde edilmiştir. Proses parametreleri için elde edilen 2 ve 3 boyutlu yanıt yüzeyleri yine tez çalışmasının EK-B bölümünde verilmiştir.

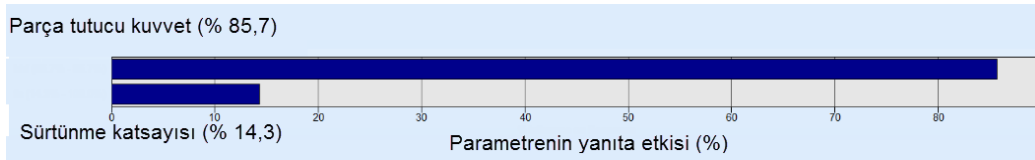
Tablo 6.5. Deneysel tasarım prosesi için belirlenen proses parametreleri ve inceleme aralıkları

Parametre	Aralık
Parça tutucu kuvvet (kN)	1 – 25
Sürtünme katsayısı	0,05 – 0,2

Deneysel tasarım sonuçları incelendiğinde geri esneme miktarı telafi öncesinde 5,9 mm iken proses parametreleri ile telafi sonrasında geri esneme miktarının minimum 3,7 mm olduğu tespit edilmiştir. Minimum geri esneme miktarı parça tutucu kuvvet 1 kN ve sürtünme katsayısı 0,2 iken elde edilmiştir. Sonuç olarak maksimum geri esneme miktarı %37 oranında telafi edilebilmiştir. Bu oran endüstri açısından kabul

edilebilir bir seviyede değildir ve parça geometrisi hala endüstriyel tolerans bant sınırlarının dışındadır. Deneysel tasarım prosesi sonrasında sonlu elemanlar hesaplama parametrelerine benzer şekilde, proses parametrelerinin de geri esnemeye etki ağırlıkları da elde edilmiştir. Sonuçlar Şekil 6.9’da verilmiştir. Parça tutucu kuvvetin, sürtünme katsayısına göre geri esneme üzerinde daha fazla ağırlığı bulunduğu tespit edilmiştir.

Sonuç olarak proses parametreleri ile yapılan telafinin yeterli olmadığı tespit edilmiştir. Bu nedenle kalıp yüzeylerinin geri esneme miktarına göre yeniden oluşturulması ile telafi adımına geçilmiştir. Parçada formlama sonrası elde edilen gelen geri esneme dağılımı dikkate alınarak açılı kanal çekme işlemi için telafili kalıp yüzeyleri geliştirilmiştir.



Şekil 6.9. Proses parametrelerinin geri esneme üzerindeki etki ağırlıkları

6.1.2.2. Telafili kalıp yüzeylerinin geliştirilmesi

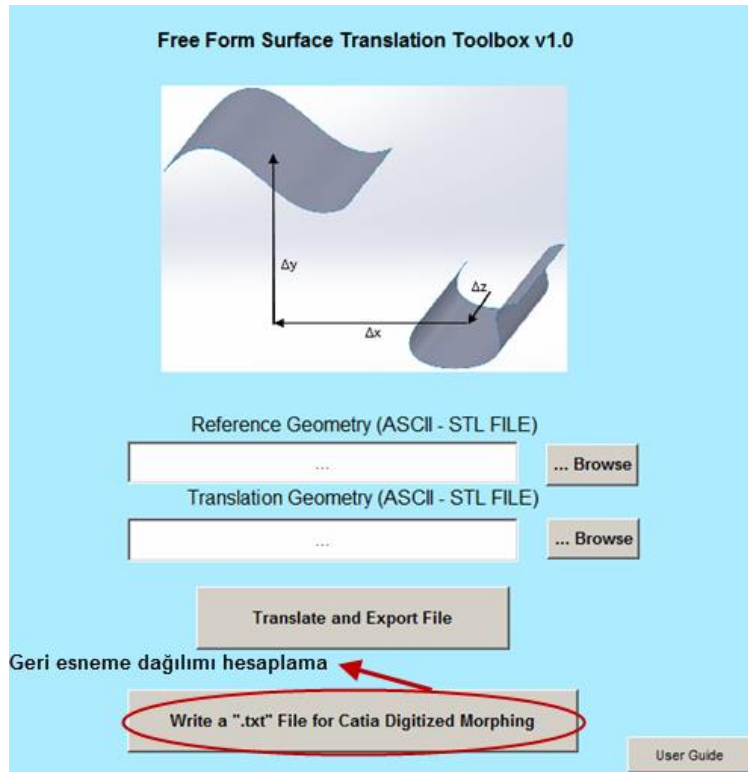
Açılı kanal çekme işleminde geri esneme telafisi için bir sonraki adım olarak Deplasman Ayar (DA) yöntemi ile telafi gerçekleştirilmiştir. DA yönteminde geri esneme dağılımı göz önüne alınarak geri esnemeye ters yönde kalıp yüzeyleri yeniden oluşturulmaktadır. Bu kapsamda geri esneme dağılımı, sonlu elemanlar analizi sonuçlarından parçadaki her bir düğüm noktası için tespit edilerek kalıp yüzeyi, bu dağılıma göre yeniden oluşturulmalıdır. Geri esneme dağılımını bütün düğüm noktaları için hesaplamak adına yine tez çalışması kapsamında geliştirilen FFST ara yüzü kullanılmıştır. FFST ara yüzü, serbest formlu yüzeyleri konumlandırmakla birlikte, ara yüz içerisine alınan iki yüzeyin düğüm noktaları arasındaki farkları da hesaplayabilmektedir. Bu kapsamda ara yüz, her bir düğüm noktası için fark hesapladıktan sonra, bu farkları bir matris içerisine yazmaktadır. Elde edilen fark matrisi ise, bir “txt” dosyası olarak kaydedilmektedir. Fark matrisinin ara yüz üzerinden hesaplandığı kısım, Şekil 6.10’da verilmiştir. Bu “txt”

dosyası, geri esneme telafisi için kalıp yüzeyinin yeniden oluşturulmasında kullanılmaktadır. DA yöntemi ile geri esneme telafisi için kalıp yüzeyleri Catia yazılımının “Digitized Morphing” modülü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu modülün telafi adımı için ihtiyaç duyduğu veriler, geri esneme fark matrisi ve telafi faktörüdür. Geri esneme için fark matrisi FFST ara yüzü ile elde edildikten sonra telafi faktörü (α) üç farklı şekilde kullanılmıştır.

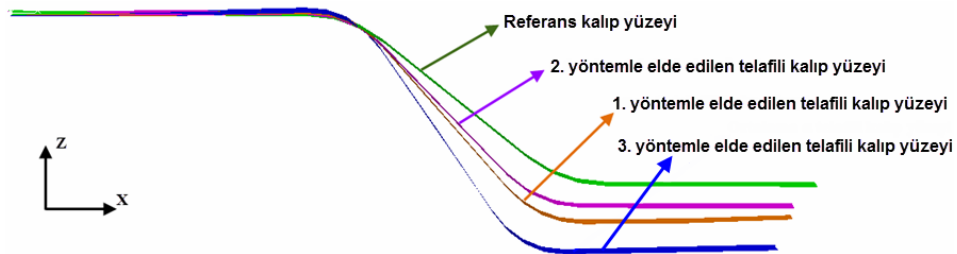
Birinci yöntemde, telafi faktörü (-1) katsayısı olarak alınmıştır, bu durumda geri esneme telafisi geri esneme miktarı kadar ve geri esnemeye ters yönde gerçekleştirilecektir. İkinci yöntemde, telafi faktörü dağılım şeklinde uygulanmıştır, bu durumda her bir düğüm noktası için farklı telafi faktörleri elde edilmiştir. Son yöntemde ise ortalama telafi faktörü kullanılmıştır. Burada geri esneme dağılımı için ortalama telafi faktörü hesaplanmış ve telafi, bu faktöre göre gerçekleştirilmiştir. Yöntemlerde kullanılan telafi faktörleri Tablo 6.6’da özetlenmiştir. Üç yönteme göre elde edilen telafili kalıp geometrileri Şekil 6.11’de verilmiştir.

Tablo 6.6. Deplasman ayar yönteminde kullanılan yöntemler

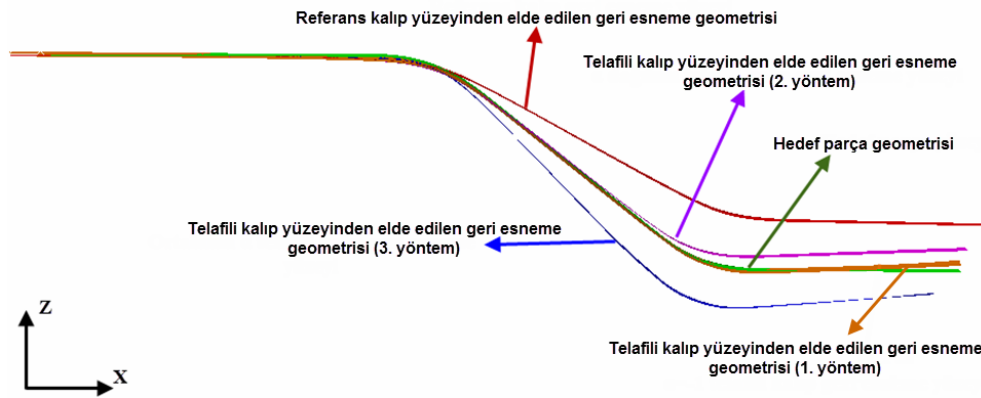
Yöntem	Telafi faktörü kullanım şekli
1. Yöntem	(-1) katsayısı olarak
2. Yöntem	Dağılım şeklinde
3. Yöntem	Ortalama telafi faktörü olarak



Şekil 6.10. FFST arayüzü ile geri esneme fark matrisinin hesaplanması



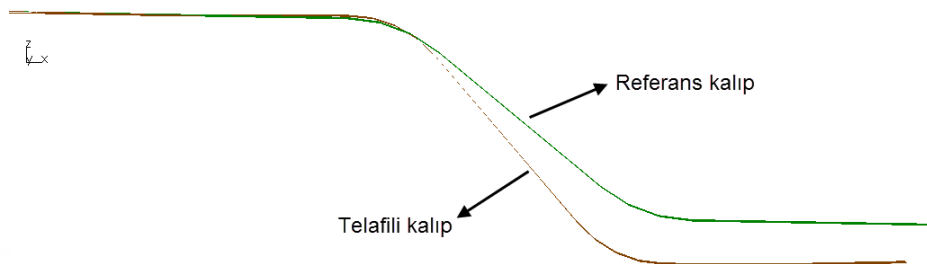
Şekil 6.11. Farklı telafi faktörlerine göre elde edilen kalıp yüzeyleri



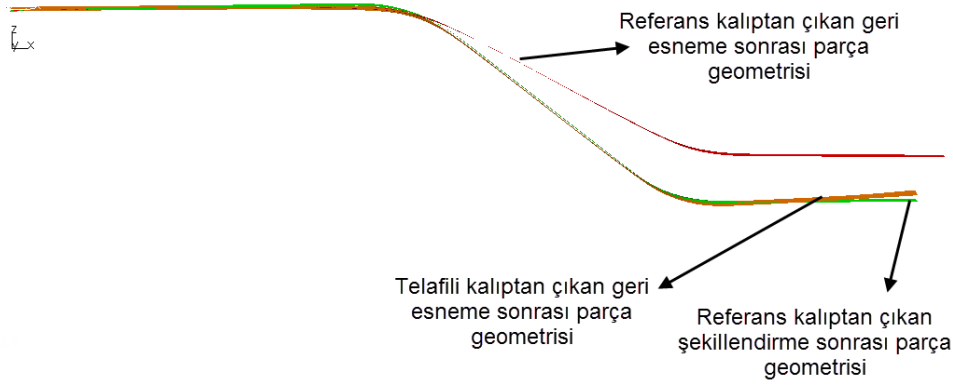
Şekil 6.12. Farklı telafi faktörleri ile elde edilen kalıplardan çıkan geri esneme geometrileri

Elde edilen telafili kalıp yüzeyleri ile sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak sonlu elemanlar analizleri sonrasında elde edilen geri esneme yüzeyleri, hedeflenen parça geometrisi ile karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırma Şekil 6.12’de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde 3. yöntem ile elde edilen geometrinin ürün geometrisinden oldukça fazla formlandığı görülmektedir. Ortalama α ile aşırı telafi gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemle elde edilen sonuçlar ürün geometrisinden oldukça uzaktır. 2. yöntem sonucunda geri esneme telafisi başarılı olmuştur fakat henüz hedef parça boyutları yakalanamamıştır. Bu durumda ikinci bir iterasyonun yapılması gerekmektedir. 1. yöntemde ise oldukça başarılı bir telafi gerçekleştirilmiştir. Maksimum geri esneme yaklaşık 0,58 mm seviyesine indirilmiştir. Bu kapsamda sac kalınlığının 1 mm olduğu göz önüne alınırsa geri esneme artık montajda telafi edilebilecek seviyeye getirilmiştir. Bu işlem tek iterasyonda gerçekleştirilmiştir. İkinci bir iterasyona ihtiyaç duyulmamaktadır. Her üç yöntem de göz önüne alınırsa, başarılı telafi, 1. ve 2. yöntemlerle elde edilmiştir. Fakat 1. yöntemde tek iterasyonda telafi gerçekleştirilmiş, 2. yöntemde ise bir iterasyona daha ihtiyaç duyulmaktadır. Sonuç olarak açılı kanal çekme işlemi için telafi faktörü (-1) olarak kullanıldığında oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

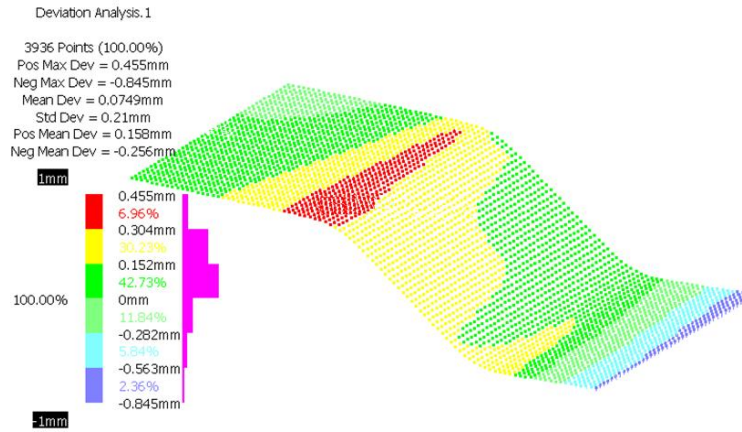
Bu kapsamda 1. yöntemin kullanıldığı durum ayrı olarak incelenmiştir. Telafili kalıp geometrisi Şekil 6.13’te ve telafili kalıptan elde edilen geri esneme geometrisinin hedef parça geometrisi ile karşılaştırılması Şekil 6.14’te verilmiştir. Aynı zamanda sonuçlar yüzey uyumluluk analizleri ile de doğrulanmıştır. Telafi sonrası geri esneme yüzeyi ve hedef parça geometrisinin yüzey uyumluluk analizine bakıldığında endüstriyel tolerans bantları içerisinde %100 uyumluluk olduğu tespit edilmiştir. Sonuçlar Şekil 6.15’te verilmiştir.



Şekil 6.13. Referans ve telafili kalıp yüzeyleri ($\alpha = -1$)



Şekil 6.14. Referans ve telafili kalıplardan elde edilen parça geometrileri ($\alpha = -1$)



Şekil 6.15. Hedef parça geometrisi ve telafili kalıptan ($\alpha = -1$) elde edilen geri esneme geometrilerinin yüzey uyumluluk analizi

6.1.3. Sonuçların değerlendirilmesi ve literatürle karşılaştırılması

Tez çalışması kapsamında önerilen tasarım yöntemi, ilk olarak literatürde sıklıkla kullanılan açılı kanal çekme işlemi için uygulanmıştır. Tasarım yöntemi kapsamında öncelikle sonlu elemanlar modellemesi gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar analizleri, hassasiyet analizi çerçevesinde yapılarak geri esneme telafisi için harcanacak süre en aza indirilmiştir. Bu kapsamda malzeme modellerinin seçimi ve deneysel tasarım yöntemi ile parametre hassasiyet analizi gerçekleştirilmiştir.

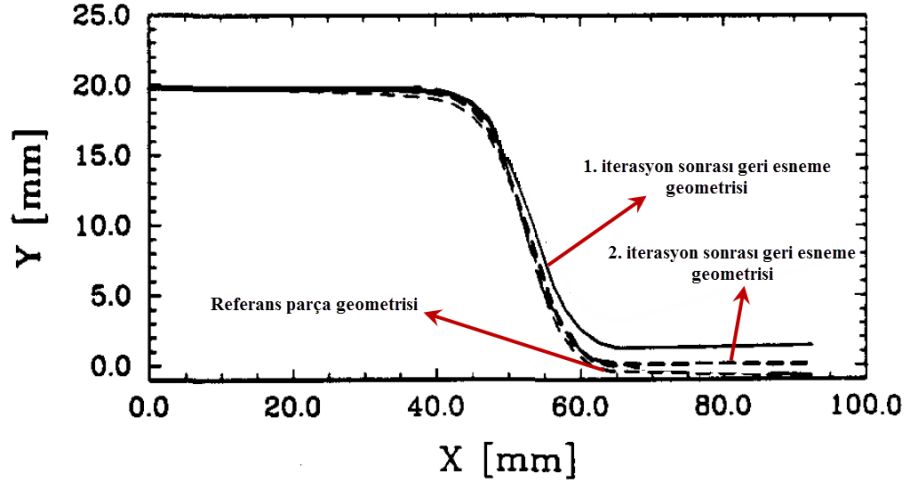
Malzeme davranışının modellenmesinde izotrop ve kinematik pekleşme kabulü yapan malzeme modelleri kullanılmıştır. Sonlu elemanlar analizi sonucunda kinematik malzeme modelinin diğer modellere göre daha hassas tahmin gerçekleştirdiği tespit edilmiştir. Tasarım yönteminin bir sonraki adımı olan geri

esneme telafisi için proses parametreleri ile telafi yeterli olmadığından Deplasman Ayar (DA) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem ortalama, dağılım ve (-1) katsayılı olmak üzere 3 farklı telafi faktörü ile uygulanmıştır. Telafi faktörü (-1) olarak kullanıldığında tek adımda telafi işleminin gerçekleştirildiği tespit edilmiştir.

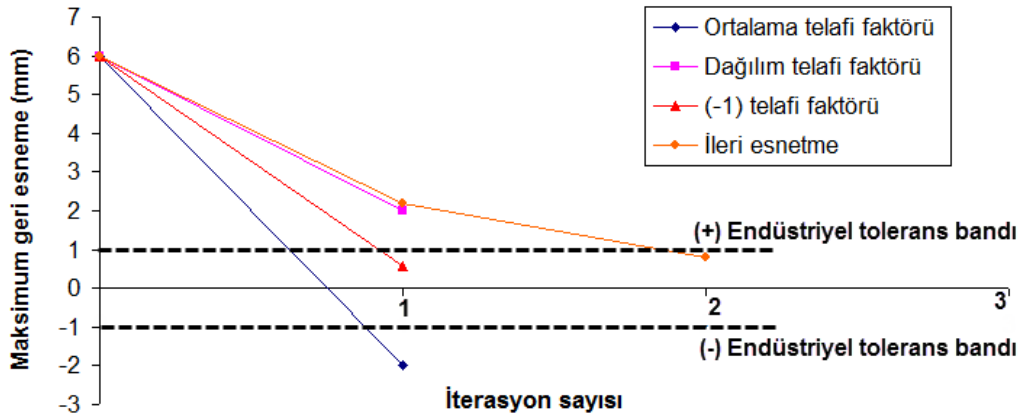
Önerilen tasarım yöntemi literatürden referans olarak kullanılan Karafillis ve Boyce'un [93] çalışması ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma kapsamında ilk farklılık, kullanılan malzeme modellerinde ortaya çıkmaktadır. Karafillis, çalışmasında malzemeyi izotrop olarak kabul edip izotrop pekleşme davranışı ile modelleme yapmıştır, mevcut tez çalışmasında ise hem izotrop hem de kinematik pekleşme malzeme modelleri kullanılmış ve kinematik pekleşme kabulü yapan malzeme modellerinin daha hassas sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Aynı zamanda önerilen telafi yönteminin, hem izotrop hem de kinematik pekleşme malzeme modelleri ile uygulanabildiği ve sonuç olarak yöntemin malzeme modelinden bağımsız olduğu tespit edilmiştir. Aynı zamanda çalışma kapsamında, parametre seçiminde deneysel tasarım yöntemi kullanıldığından parametre belirleme sürecinde deneme-yanılma yönteminde yaşanan zaman kayıplarının önüne geçilmiştir.

Geri esneme telafi adımında ise Karafillis'in çalışmasında İleri Esnetme, mevcut tez çalışmasında ise Deplasman Ayar (DA) yöntemi kullanılmıştır. Telafi sonuçları incelendiğinde ileri esnetme yöntemi ile 2 iterasyon sonucunda telafi gerçekleştirilmiş ve başlangıçta yaklaşık 6 mm olan maksimum geri esneme miktarı 0.8 mm seviyesine indirilmiştir. Sonuçlar, Şekil 6.16'da görülmektedir. Tez çalışması kapsamında ise DA yöntemi ile (-1) telafi faktörü kullanılarak tek adımda telafi gerçekleştirilmiş ve maksimum geri esneme miktarı 0.58 mm seviyesine indirilmiştir. Şekil 6.17'de literatürde kullanılan ileri esnetme yöntemi ve tez çalışması kapsamında kullanılan 3 farklı telafi faktörü kullanımına göre DA yöntemine ait sonuçlar karşılaştırılmıştır. Görüldüğü üzere (-1) telafi faktörü kullanılan DA yöntemi ile tek adımda parça geometrisi endüstriyel tolerans bant sınırları içerisine getirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre tez çalışması kapsamında önerilen yöntemin telafili kalıp tasarımı açısından literatür çalışmalarına göre daha hızlı ve daha başarılı çalıştığı tespit edilmiştir.

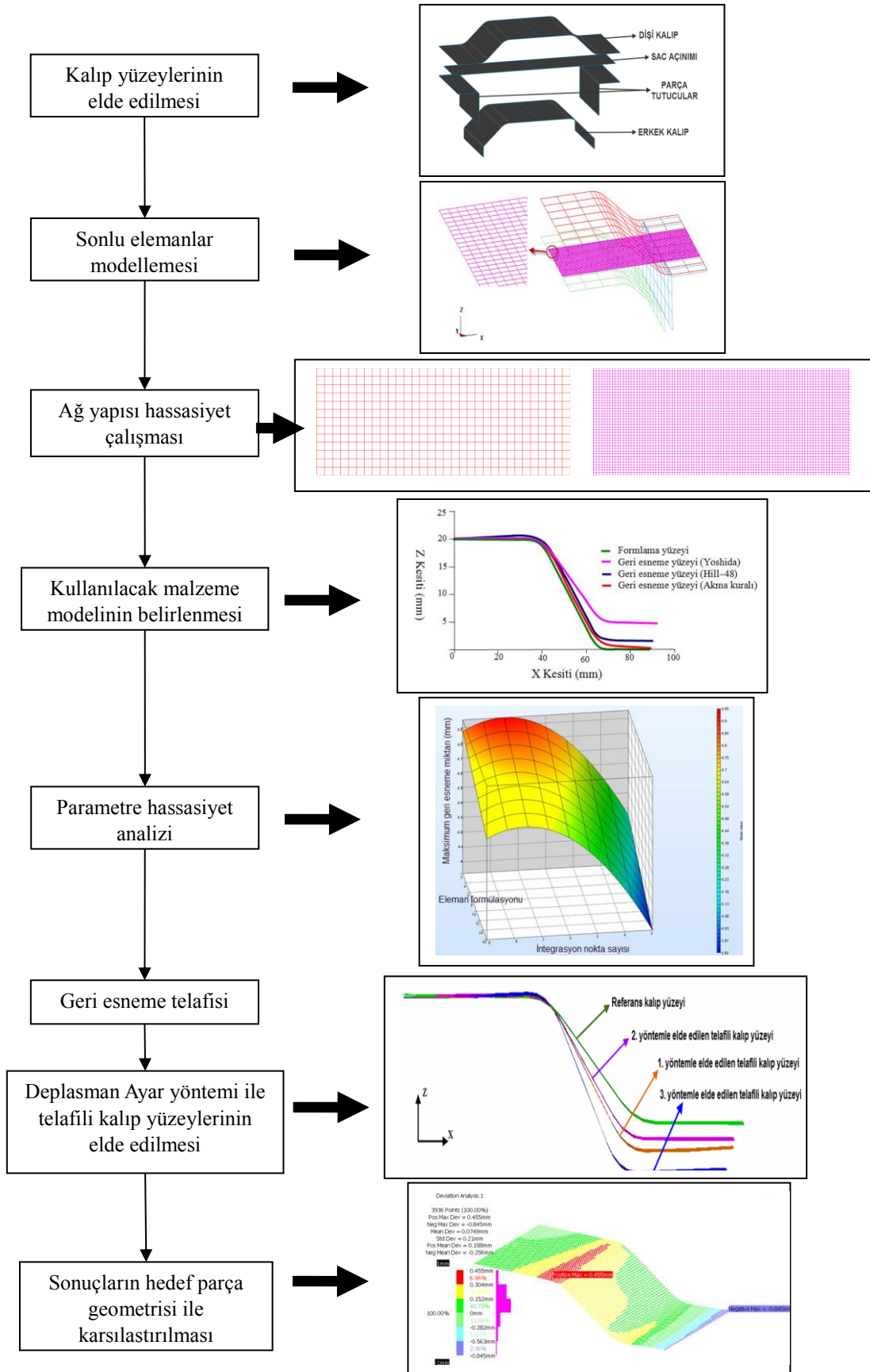
Açılı kanal çekme işlemi için önerilen tasarım yönteminin uygulanmasında izlenen iş akışı Şekil 6.18’de özetlenmiştir.



Şekil 6.16. İleri esnetme yöntemi ile elde edilen telafi sonuçları [93]



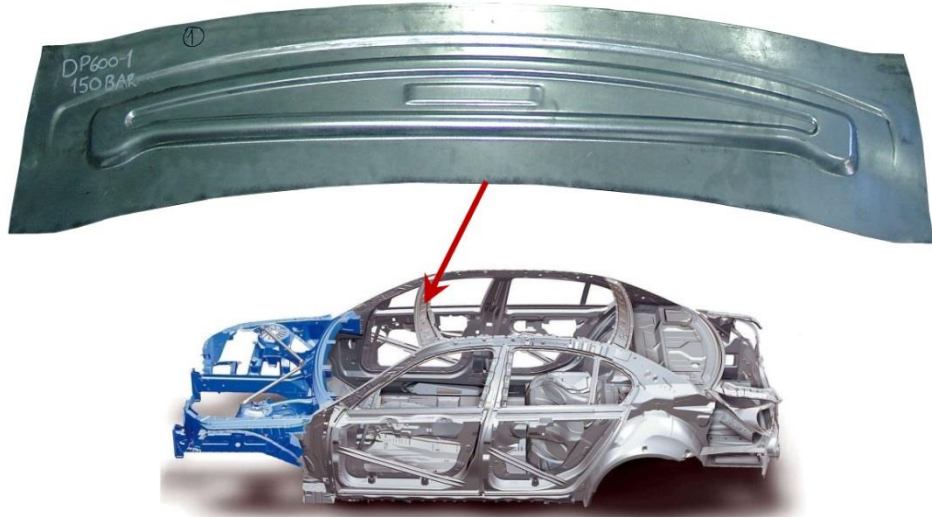
Şekil 6.17. Açılı kanal çekme işlemi için telafi yöntemlerinin karşılaştırılması



Şekil 6.18. Açılı kanal çekme işlemi için tez çalışmasında önerilen tasarım yönteminin uygulama adımları

6.2. Endüstriyel Uygulama: DP600 Tavan Destek Sacı Form Kalıp Tasarımı

Doktora tez çalışmasında endüstriyel uygulama olarak BMW binek aracında kullanılan bir tavan destek sacı formlama işlemi çalışılmıştır. Tavan destek sacının araç üzerindeki konumu Şekil 6.19’da gösterilmiştir.



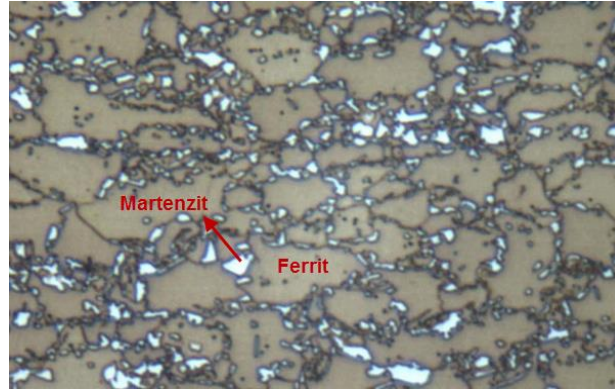
Şekil 6.19. Tavan destek sacı ve araç üzerindeki konumu

Bu parça, aynı zamanda Coşkunöz A.Ş. bünyesinde gerçekleştirilen bir Tubitak-Teydeb projesinde kullanılmıştır. Dolayısı ile ilk kalıp tasarımları, formlama işlemleri ve deneysel çalışmalar firma bünyesinde gerçekleştirilmiştir.

Tavan destek sacı parçaları, çarpışma kritik ve devrilme durumlarında araçta güvenliği sağlayan elemanlardır. Bu parçalar yüksek eğrilik barındırdığından ve düşük çekme miktarına sahip olduğundan yüksek geri esneme davranışı sergilemektedir. Bu özelliklerinden dolayı tez çalışması kapsamında uygulama örneği olarak tercih edilmiştir. Bir diğer tercih nedeni ise gelişmiş yüksek mukavemetli çeliklerden çift fazlı çelik grubuna ait DP600 malzemesine sahip olmasıdır.

Çift fazlı çelikler içerisinde ferrit ve martenzit fazlarını barındırırlar. Ferrit fazı süneklik, martenzit fazı ise dayanım özelliğini çeliğe sağlamaktadır. Sıcak haddeleme ürünlerinde östenit fazından kontrollü soğutma ile hızlı soğutmadan önce

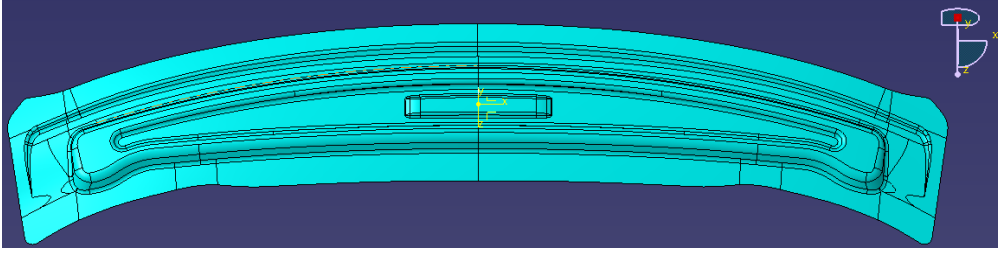
östenitin bir kısmı ferrite, hızlı soğutma ile de kalan kısmı martenzite dönüştürülür [156]. Bu içyapı özelliği çift fazlı çeliklere hem yüksek mukavemet hem de yüksek çekme miktarları sağlamaktadır. Çift fazlı çelik grubundan DP600 ise endüstride oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptir [60]. DP600 malzemesine ait mikro yapı görüntüsü Şekil 6.20’de verilmiştir. Burada ferritik matris içerisinde adacıklar şeklinde ikinci faz olan martenzit görülmektedir.



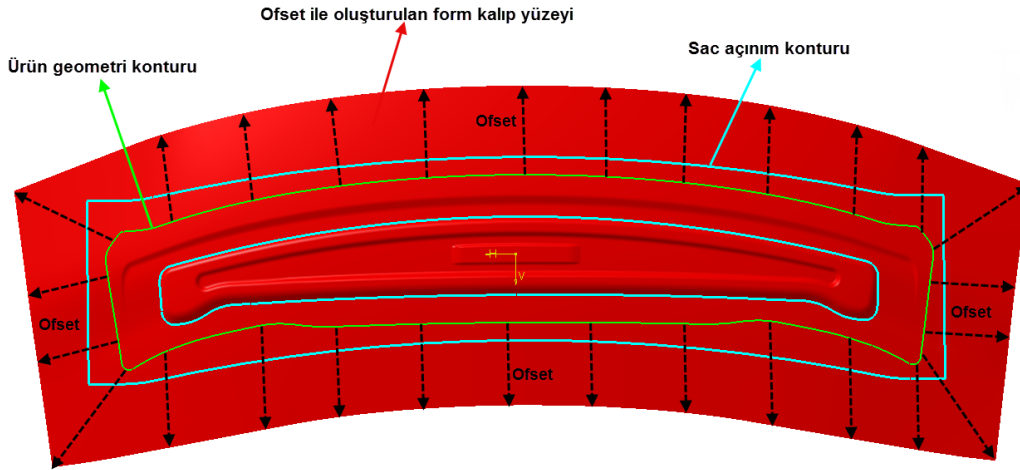
Şekil 6.20. DP600 malzemesine ait içyapı görüntüsü [157]

6.2.1. Form kalıp yüzeyi tasarımı

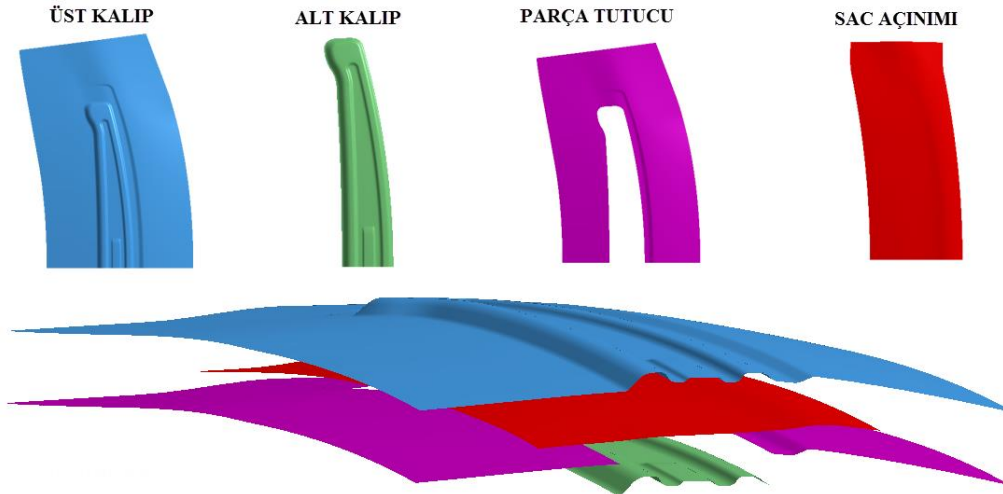
Çalışma kapsamında ilk olarak hedef parça geometrisinden form kalıp yüzeyleri oluşturulmuştur. Kalıp yüzeyleri, parça yüzeyinden ofset tekniği ile elde edilmiştir. Orijinal parça geometrisi Şekil 6.21’de ve bu geometriden elde edilen kalıp yüzeyi ise Şekil 6.22’de verilmiştir. Kalıp yüzeyi elde edildikten sonra kalıp takımını oluşturan alt kalıp ve parça tutucu yüzeylere ait konturlar belirlenerek yüzey tasarımları gerçekleştirilmiş, sonrasında ise sac açınım geometrisi elde edilmiştir. Oluşturulan kalıp takımı Şekil 6.23’te görülmektedir. Bu kapsamda Coşkunöz A.Ş. bünyesinde elde edilen form kalıp yüzeyleri ile ilk sonlu elemanlar analizleri ve sonrasında kalıp imalatı gerçekleştirilmiştir. Tasarımı ve imalatı yapılan tavan destek sacı form kalıp takımı Şekil 6.24’te verilmiştir.



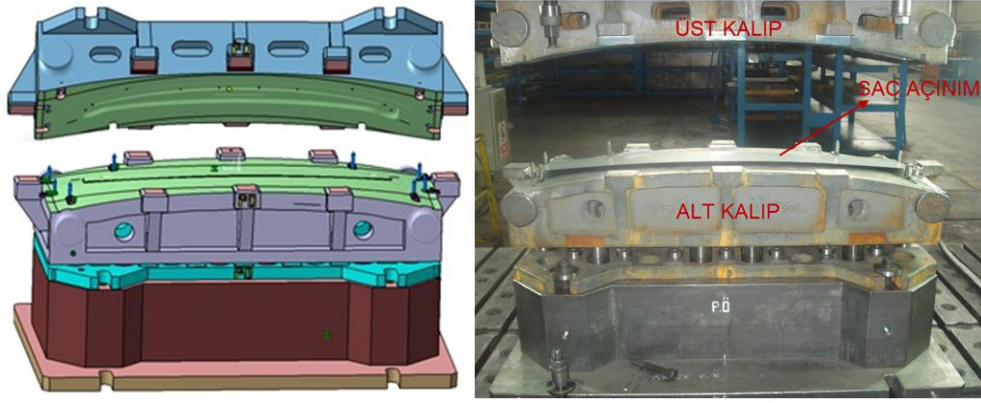
Şekil 6.21. Orijinal parça geometrisi



Şekil 6.22. Parça geometrisinden elde edilen kalıp yüzeyi ve sac açınımı

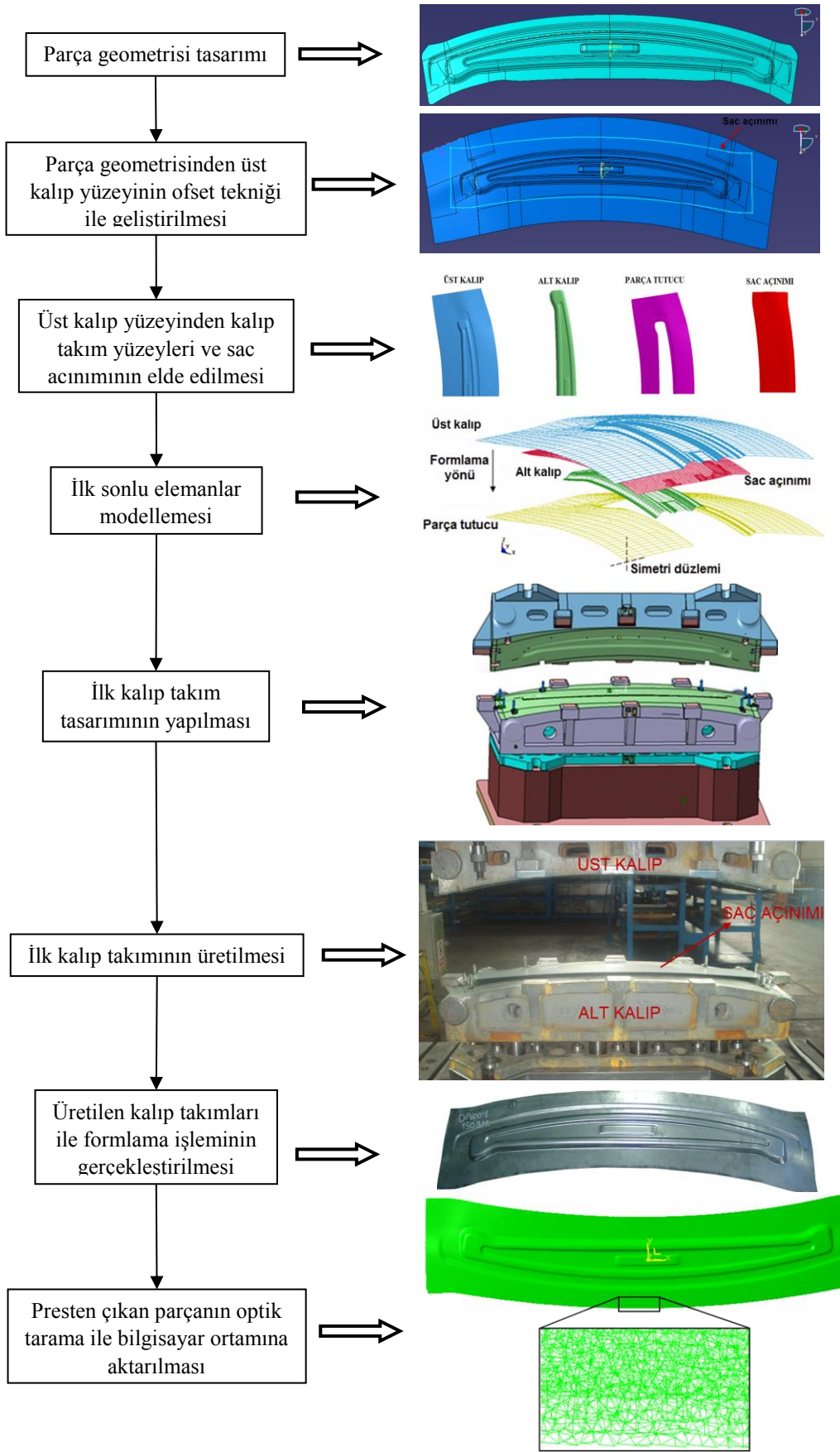


Şekil 6.23. Tasarlanan kalıp takım yüzeyleri



Şekil 6.24. Tavan destek sacı form kalıpları tasarım ve imalatı

İlk simülasyon sonuçlarının karşılaştırılabilmesi adına üretilen kalıp takımı ile formlanan tavan destek sacı parçası optik tarama sistemi ile taranarak bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Elde edilen tarama yüzeyi karşılaştırmalarda referans deneysel yüzey olarak kullanılmıştır. Form kalıplarının tasarım ve imalat süreci Şekil 6.25'te özetlenmiştir. Çalışmanın sonraki adımlarında, üretilen ilk kalıp takımı referans alınarak geri esneme telafili yeni bir kalıp yüzeyi tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda sonlu elemanlar analizleri ile geri esneme modellenerek, formlama işleminde parçaya ait geri esneme dağılımı elde edilmiştir.



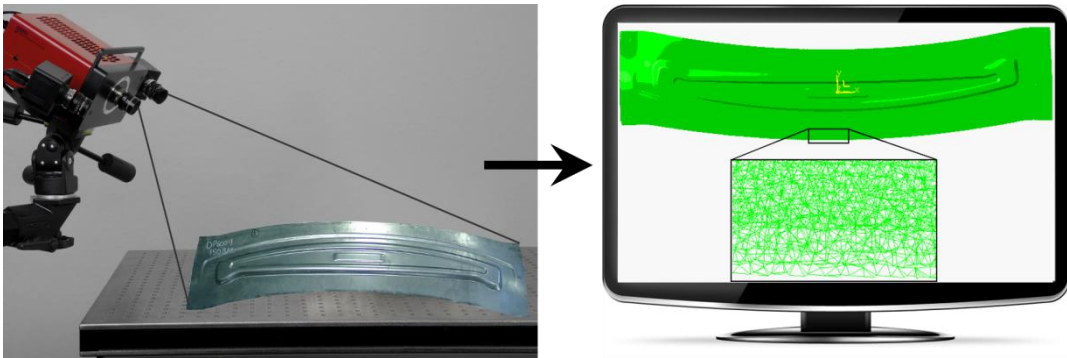
Şekil 6.25. Tavan destek sacı referans form kalıp yüzeylerinin tasarım ve imalat süreci

6.2.2. Formlama işlemi ve formlanmış parça geometrisinin bilgisayar ortamına aktarılması

Üretilen kalıp takımları kullanılarak sonlu elemanlar analizleri için referans yüzeyi temsil edecek olan formlanmış parça geometrisi elde edilmiştir. Formlama işlemleri Coşkunöz A.Ş. bünyesindeki hidrolik presler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Formlanan sac açınımlı 0.8 mm kalınlığa sahiptir ve işlem sırasında parça tutucu kuvvet 526 kN'dur. Formlanan parça geometrisi Şekil 6.26'da görülmektedir. Sonrasında sonlu elemanlar analizi sonuçlarının karşılaştırılması için optik tarama yöntemi ile imalatı yapılan referans kalıp kullanılarak formlanan parçalara ait deneysel yüzeyler elde edilmiştir. Optik tarama işlemleri yine Coşkunöz A.Ş. bünyesinde bulunan Gom Atos tarama sistemi ile gerçekleştirilmiştir, sistem Şekil 6.27'de görülmektedir. Tarama sonrası elde edilen yüzeyler "stl" dosyaları olarak bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Oluşturulan yüzeyler üçgenleme yöntemi ile tanımlandığından, düğüm noktaları ve üçgen elemanlardan oluşmaktadır. Dolayısı ile deneysel geometri, sonlu elemanlar analizi sonuçları ile karşılaştırılırken yüzeyler arasında ilişki kurulabilmektedir. Bu ilişki düğüm noktaları, eleman kenarları ya da elemanlar arasında olabilmektedir.



Şekil 6.26. Formlanmış tavan destek sacı parçası

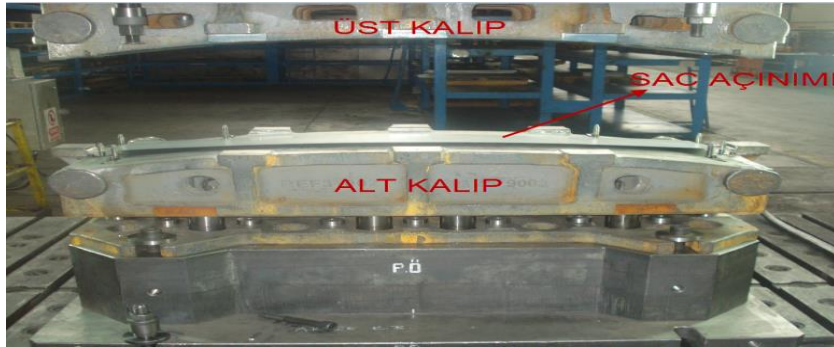


Şekil 6.27. Formlanmış parça geometrilerinin bilgisayar ortamına aktarılması

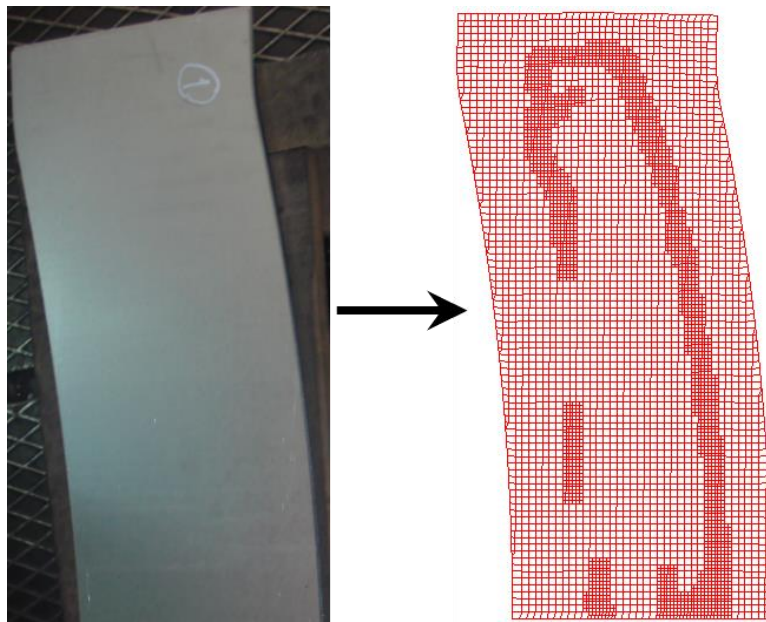
6.2.3. Formlama işleminin sonlu elemanlar modellemesi

6.2.3.1. Ağ yapısının oluşturulması

Tavan destek sacı formlama işleminde geri esneme davranışının modellenmesi sonlu elemanlar analizleri ile gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan referans kalıp yüzeyleri ve sac açınımları için kabuk elemanlar kullanılarak sonlu elemanlar modeli elde edilmiştir. Sonlu elemanlar modelinde dişi kalıp 7733, erkek kalıp 3157, parça tutucu 1699 ve sac açınımları ise 5347 elemandan oluşmaktadır. Parça geometrisinde simetri bulunduğu için sonlu elemanlar modellemesinde yarı model kullanılmıştır. Tavan destek sacı formlama işlemine ait sonlu elemanlar modeli Şekil 6.28’de ve sac açınımlarına ait ağ yapısı Şekil 6.29’da verilmiştir.



Şekil 6.28. Tavan destek sacı formlama prosesi sonlu elemanlar ağ yapısı



Şekil 6.29. Sac açınımları ağ yapısı

6.2.3.2. Malzeme plastisite modellemesi

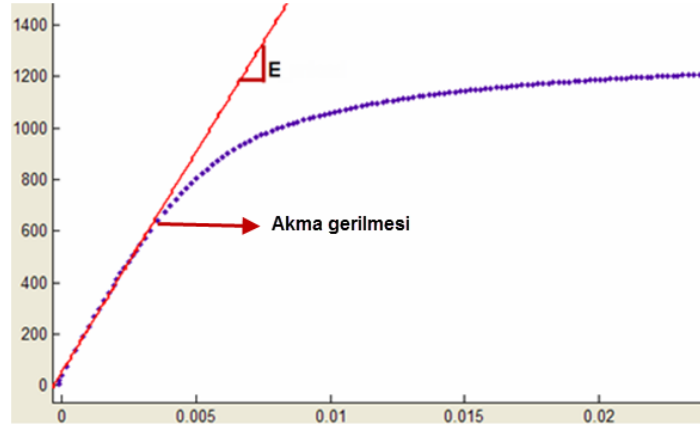
Tavan destek sacı formlama işlemi için ilk olarak sonlu elemanlar analizlerinde kullanılacak malzeme parametreleri belirlenerek plastisite modellemesi yapılmıştır. Malzeme parametrelerinin belirlenmesi adına çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çekme deneyleri 100 kN kapasiteli, temassız ekstensometreye sahip Shimadzu marka çekme deney cihazında yapılmıştır. Çekme deneyi 25 mm/dk sabit hızda gerçekleştirilmiştir. Tez çalışması kapsamında ASTM E-8 standartlarına [61] göre üretilmiş, 80 mm ilk boya ve 0.8 mm kalınlığına sahip deney numuneleri kullanılmıştır. Çekme deneylerinde ve formlama işlemlerinde kullanılan DP600 malzemesinin kimyasal kompozisyonu Tablo 6.7’de verilmiştir.

Çekme deneyi sonucunda elde edilen kuvvet-uzama verilerinden yola çıkılarak ihtiyaç duyulan mekanik özellikler hesaplanarak plastisite modellemesi gerçekleştirilmiştir. İlk olarak mühendislik gerilmesi-mühendislik gerinimi eğrisi elde edilmiştir. Bu eğri üzerinden öncelikle malzemenin elastisite modülü tespit edilmiştir. Tez çalışması kapsamında elastisite modülünün hassas olarak elde edilmesi sonlu elemanlar modellemesi açısından oldukça kritiktir. Bunun nedeni geri esnemeye baskın olarak etkisi bulunan malzeme parametrelerinin başında elastisite modülünün gelmesidir.

Çekme grafiğinin lineer bölgesinin eğimi elastisite modülünü (E) vermektedir. Eğrinin lineer bölgesinin, bir doğru denklemi ile tanımlanması gerekmektedir. Bu işlem grafiğin lineer bölgesine eğri uydurularak yapılabilmektedir. Eğri uydurma, bir grafik üzerinde seçilen bir veri kümesini tanımlayan, lineer ya da farklı derecelerdeki polinomlar olarak belirlenebilen bir eğrinin ve eğriye ait denklemin elde edilmesidir. Bu kapsamda birçok veri işleme yazılımı kullanılabilir. Tez çalışması kapsamında eğri uydurma işlemleri Matlab yazılımında gerçekleştirilmiştir. Elastisite modülünün elde edilme işlemi Şekil 6.30’da gösterilmiştir.

Tablo 6.7. DP600 malzemesi kimyasal kompozisyonu

Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Al	Ti	Diğ.
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
97.4	0.0985	0.237	1.76	0.0150	0.0106	0.189	0.0304	0.0241	<0.0010	Kln.

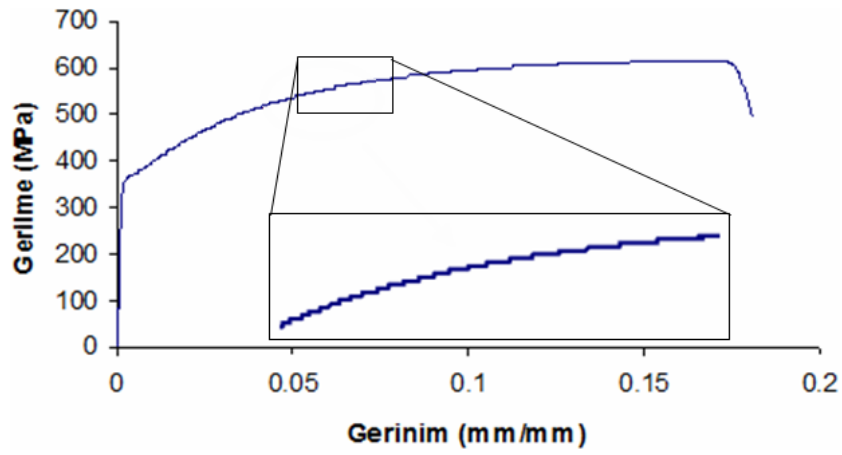


Şekil 6.30. Eğri uydurma ile elastisi modülü tespiti

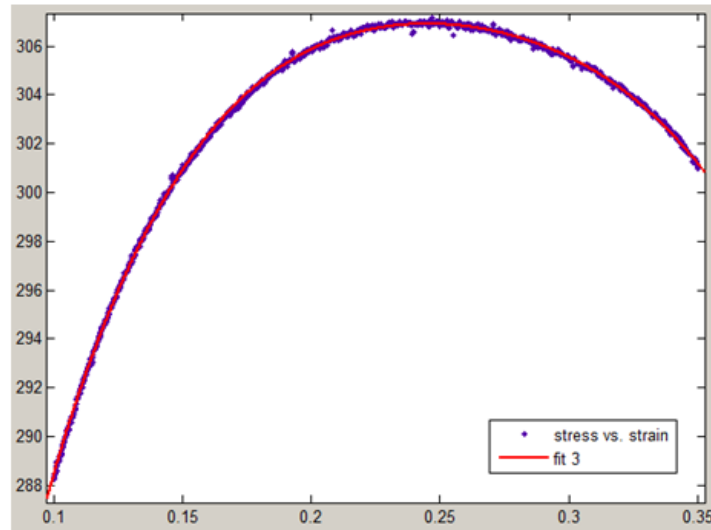
Elastisite modülünün elde edilmesinin ardından malzemeye ait akma gerilmesi tespit edilmiştir. Elastisite modülünü tespit etmek için gerilme-gerinim grafiğinin lineer kısmına uydurulan eğrinin grafikten ayrıldığı nokta akma gerilmesi olarak tespit edilmektedir. Bu yöntemle belirgin olmayan akma gösteren malzemelerde ofset yapılmadan akma gerilmesi tespit edilmektedir, bu yöntemle elde edilen akma gerilmesine orantısal akma gerilmesi denilmektedir.

Bir sonraki adımda ise malzemenin çekme gerilmesi (maksimum gerilme) ve uniform gerinim değerleri tespit edilir. Uniform gerinim, çekme gerilmesine karşılık gelen gerinim değeridir. Çekme gerilmesi olarak genellikle gerilme-gerinim verilerindeki maksimum gerilme değeri alınır bu yöntem kullanışlı ve hızlı bir yöntem olmasına rağmen hassas hesaplamalar gerektiren durumları tam olarak karşılamamaktadır. Çünkü çekme deneyi sonucunda elde edilen gerilme-gerinim grafiği düzgün bir eğri değildir. Deney sırasında verileri kaydeden yük hücreleri ve ekstensometreler oldukça hassas oldukları için en küçük değişiklikleri dikkate almaktadırlar. Bu durum Şekil 6.31’de gösterilmektedir. Çekme gerilmesinin hassas olarak tespit edilebilmesi için tez çalışması kapsamında yine eğri uydurma yöntemi kullanılmıştır. Yöntem Şekil 6.32’de görülmektedir. Uydurulan eğriler artık düzleştirilmiş eğrilerdir. Malzemenin elastik bölgeden sonraki kısmına uydurulan

eğri genellikle 4. veya 5. dereceden bir polinom olduğu tespit edilmiştir. Bu polinomun tepe noktası çekme gerilmesini vermektedir. Polinomun tepe noktası tespiti için polinomun türevi alındıktan sonra polinomun kökleri bulunur. Bulunan köklerden seçilen aralığın içerisinde kalan kök uniform gerinimi vermektedir. Bu gerinim değerine karşılık gelen gerilme değeri ise çekme gerilmesini temsil etmektedir.



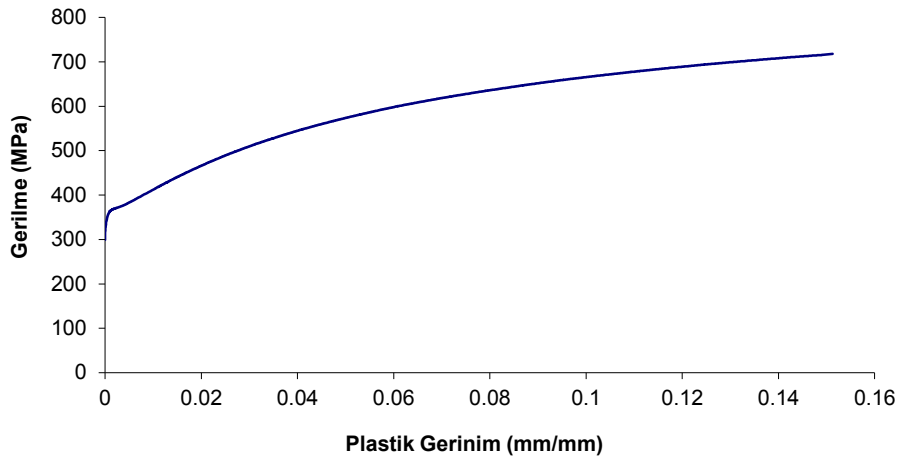
Şekil 6.31. Gerilme-gerinim grafiğindeki düzgünsüzlük durumu



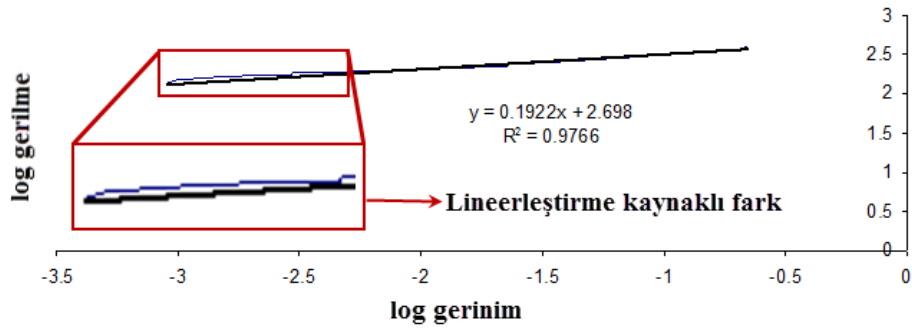
Şekil 6.32. Çekme gerilmesi tespiti için oturtulan eğri

lineerleştirilmesindeki hatadır. Bu sebeple K ve n değerlerinde de bir miktar hata söz konusu olabilmektedir. Anlatılan yöntem K ve n değerlerinin elde edilmesinde en sık kullanılan yöntemdir. Tez çalışması kapsamında lineerleştirme yöntemindeki hatanın elimine edilmesi için ikinci bir yöntem olarak Holloman ifadesi, non-lineer olarak Matlab yazılımında tanımlanmış ve K-n değerleri bu denklem yardımıyla tespit edilmiştir. Bu yöntemde, malzemeye ait gerilme ve gerinim değerleri kullanılarak bu değerlere göre eğri oluşturulmuştur. Sonrasında bu eğriye $\sigma = K\varepsilon^n$, Holloman ifadesini temsil eden bir başka eğri oturtulmuştur ve K, n değerleri tespit edilmiştir. Lineerleştirme ve eğri uydurma yöntemlerinin karşılaştırılması Şekil 6.36'da verilmiştir. Şekil 6.36'dan görüldüğü üzere non-lineer K-n eğrisi deneysel çekme eğrisi ile uyumludur fakat lineerleştirilerek elde edilen K-n eğrisi lineerleştirmedeki sapmayı çekme grafiğinde de göstermiştir. Bu nedenle tez çalışması kapsamında non-lineer yöntemle elde edilen K ve n değerleri kullanılmıştır.

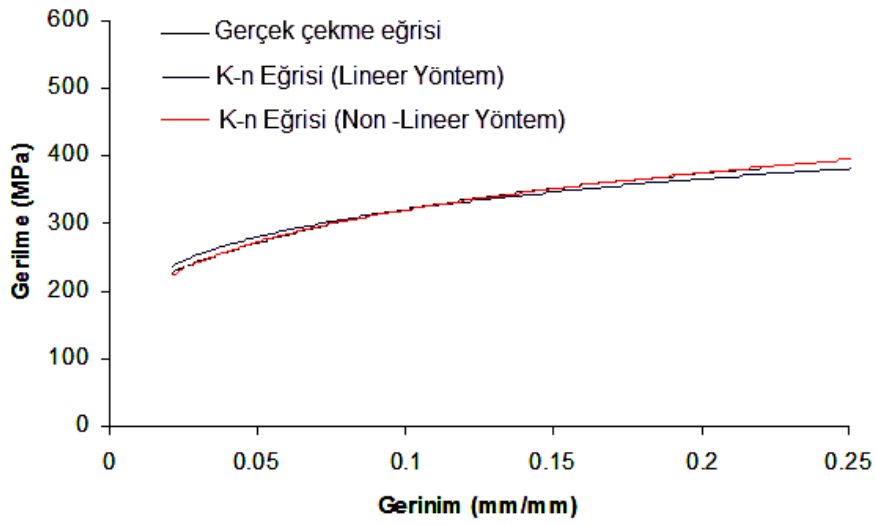
Akma eğrisinin ardından DP600 malzemesine ait Hill akma yüzeyi elde edilmiştir. Elde edilen akma yüzeyi Şekil 6.37'de verilmiştir. DP600 malzemesi için çekme deneyinden elde edilen mekanik özellikler Tablo 6.8'de özetlenmiştir.



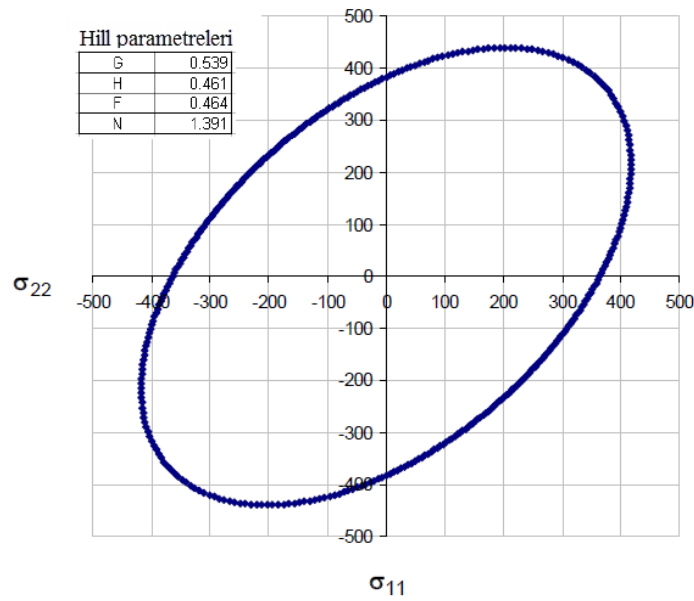
Şekil 6.34. DP600 malzemesi akma eğrisi



Şekil 6.35. Lineerleştirme yöntemi ile K ve n değerlerinin hesaplanması



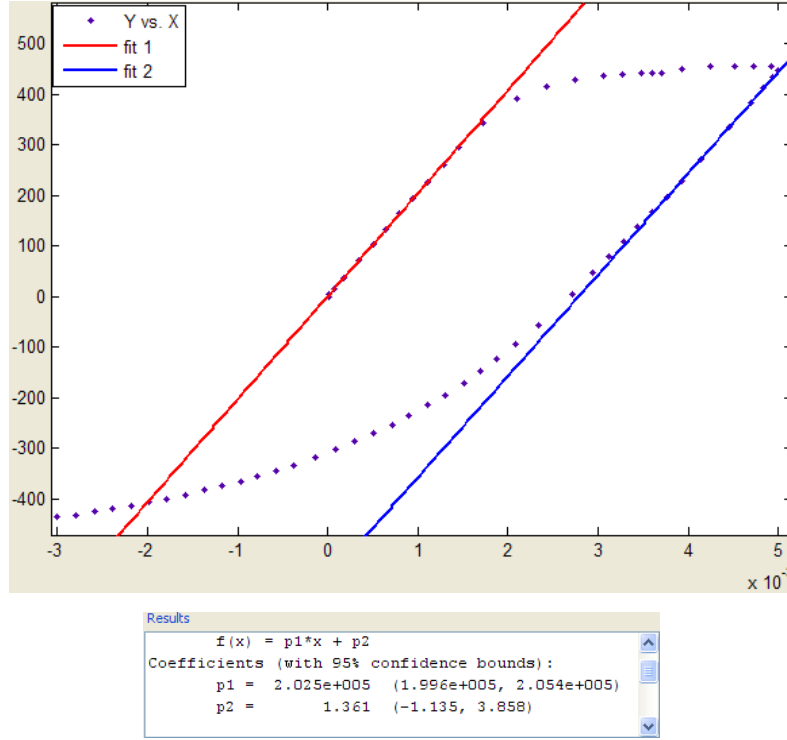
Şekil 6.36. Farklı yöntemlerle elde edilen K-n eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 6.37. DP600 malzemesi Hill akma yüzeyi

Tablo 6.8. DP600 için çekme deneyinden elde edilen mekanik özellikler

σ_{akma} (MPa)	σ_{akma} (%0.2) (MPa)	$\sigma_{çekme}$ (MPa)	ϵ_{akma}	$\epsilon_{uniform}$
299,17	367,26	614,95	0,0013	0,167
E (GPa)	K (MPa)	n		
201,5	1100,4	0,22		



Şekil 6.38. Çekme ve basma durumlarında elastisite modüllerinin tespiti

Bauschinger etkisinin modellenmesini dikkate alan kinematik pekleşme malzeme modelleri için elastisite modülünün değişimi de tespit edilmelidir. Çekme-basma deneylerinde hem çekme hem de basma durumlarındaki elastisite modülleri, akma gerilmesinde olduğu gibi değişkenlik göstermektedir. Elastisite modülleri çekme deneyinde anlatılan yöntem ile çekme-basma deneylerinde de hesaplanabilir. Çekme ve basma durumlarında elastisite modüllerinin tespiti Şekil 6.38’de gösterilmiştir.

Çekme-basma testleri sırasında elastisite modülünün tespitini kolaylaştırmak adına tez çalışmasında basma bölgesindeki eğri çekme bölgesine aktarılmıştır. Bu işlemi gerçekleştirebilmek için eksen dönüşümü yapılmalıdır. Bu dönüşümün gerçekleştirilebilmesi için dönüşüm matrisleri kullanılmıştır. İşlemin şematik gösterimi Şekil 6.39’da verilmiştir. Hesaplamalarda kullanılan dönüşüm matrisi aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$[T] = [\cos \theta_{ij}] = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

Burada $[T]$ dönüşüm matrisini, θ ise eksenler arasındaki açıyı temsil etmektedir. Denklem (6.1), Şekil 23'te verilen çekme-basma deneyi için yazılırsa,

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos 180 & \sin 270 \\ -\sin 90 & \cos 180 \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

$$\bar{r}_i = T_{ij} r_j \quad (6.3)$$

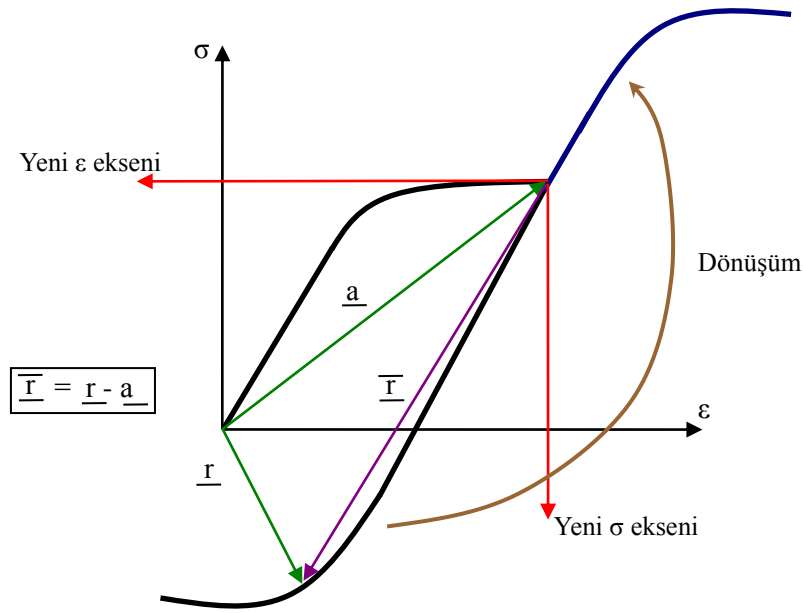
$$\bar{r}_1 = T_{11} r_1 + T_{12} r_2 \quad (6.4)$$

$$\bar{r}_1 = -\bar{r}_1 = -(r_1 - a_1) \quad (6.5)$$

$$\bar{r}_2 = T_{21} r_1 + T_{22} r_2 \quad (6.6)$$

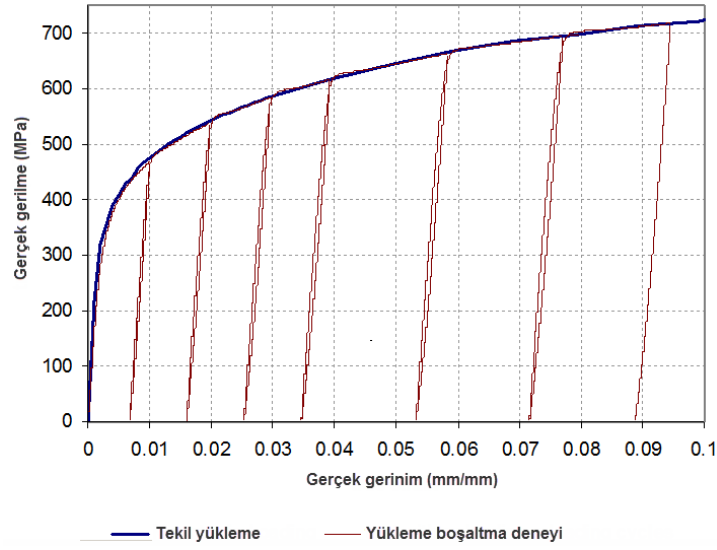
$$\bar{r}_2 = -\bar{r}_2 = -(r_2 - a_2) \quad (6.7)$$

ifadeleri elde edilir. Eksen dönüşümü Denklem (6.5) ve (6.7) kullanılarak gerçekleştirilebilir. Elde edilen grafiklerden hem çekme hem de basma bölgesindeki elastisite modülleri ve akma gerilmeleri hesaplanabilmektedir.

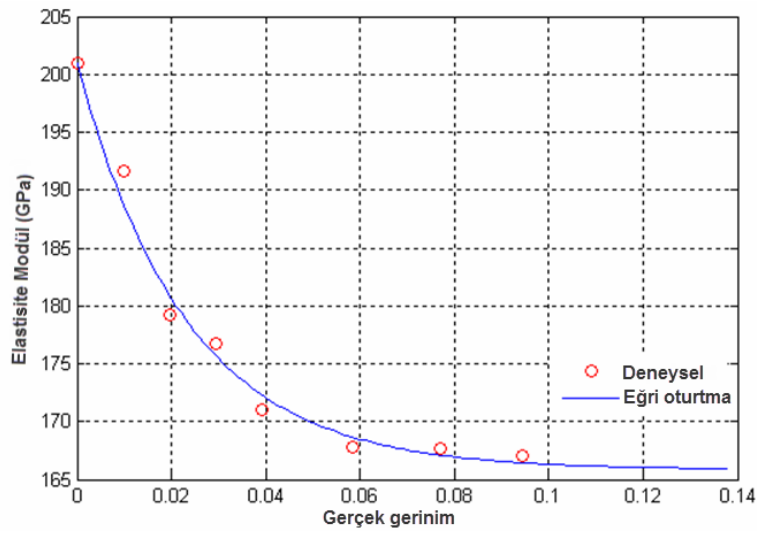


Şekil 6.39. Eksen transformasyonunun şematik gösterimi

Sonlu elemanlar malzeme kartlarında elastisite modülü değişimini tanımlayabilmek için tez çalışması kapsamında DP600 malzemesi için yükleme-boşaltma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Malzeme üzerindeki yük, akma gerilmesi geçildikten sonra boşaltılmış sonrasında tekrar yükleme gerçekleştirilmiştir. Elde edilen gerilme-gerinim grafiği ve elastisite modülün değişimi Şekil 6.40 ve Şekil 6.41’de gösterilmiştir. Tablo 6.9’da ise üç yönde gerçekleştirilen yükleme-boşaltma deneyleri sonucu elde edilen elastisite modülleri verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde yük boşaltma işleminde elastisite modülünün yaklaşık 35 GPa düşüş gösterdiği görülmektedir.



Şekil 6.40. Yükleme boşaltma deneyi sonrasında DP600 malzemesi için gerilme-gerinim grafiği



Şekil 6.41. DP600 malzemesi için elastisite modülünün değişim grafiği

Tablo 6.9. DP600 malzemesine ait elastisite modülü verileri

Test yönü	E_{ζ} (GPa)	E_b (GPa)	ζ
Hadde yönü	201.5	166.0	43.4
Hadde yönüne 45^0	202.3	169.1	39.7
Hadde yönüne dik	204.7	172.5	41.3

6.2.3.3. İlk simülasyon sonuçları

Ağ yapısının elde edilmesinden sonra sonlu elemanlar modeli çözülmüştür. Çözüm sonrasında elde edilen geri esneme yüzeyi deneysel geometri ile karşılaştırılmıştır.

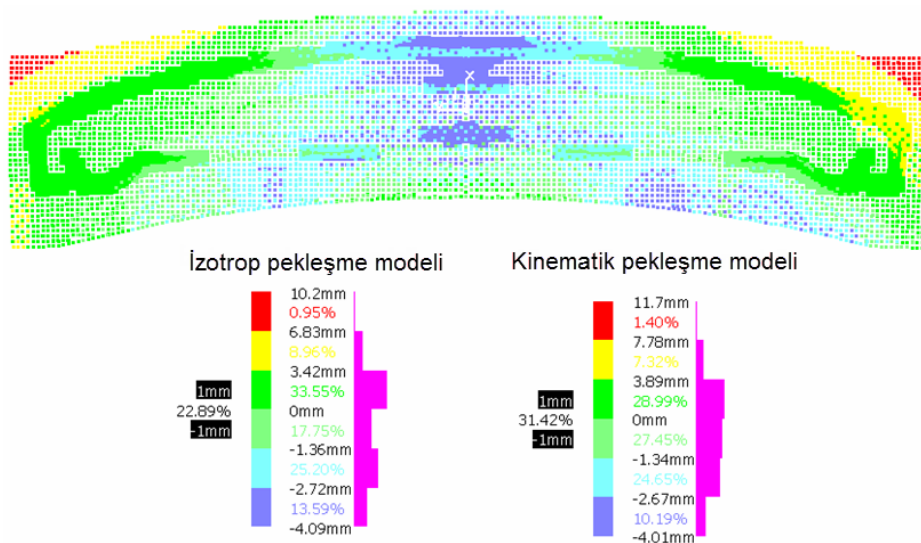
Gerçekleştirilen ilk sonlu elemanlar analizleri, izotrop ve kinematik pekleşme kabulü yapan malzeme modelleri kullanılarak yapılmıştır. İzotrop pekleşme modeli olarak Hill-48, kinematik pekleşme modeli olarak Yoshida modeli kullanılmıştır. DP600 malzemesine ait malzeme model parametreleri Tablo 6.10'da ve sonlu elemanlar analizlerine ait proses parametreleri Tablo 6.11'de verilmiştir. Her iki modelle de sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen geri esneme yüzeyleri deneysel yüzeyle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları Şekil 6.42'de verilmiştir. Karşılaştırma sonucunda kinematik pekleşme modelinin geri esneme davranışını modellemede daha başarılı olduğu tespit edilmiştir. Tez çalışması kapsamında ilerleyen adımlarda yapılan tüm sonlu elemanlar analizlerinde Yoshida non-lineer kinematik pekleşme modeli kullanılmıştır.

Tablo 6.10. DP600 Malzeme Model Parametreleri

İzotrop pekleşme malzeme model parametreleri (Hill-48)									
E (GPa)	ν	R	σ_{ak} (MPa)	K (MPa)	n	F	G	H	N
201.5	0.28	1.069	360	1076	0.22	0.464	0.539	0.461	1.391
Kinematik pekleşme malzeme model parametreleri (Yoshida)									
E (GPa)	ν	R	σ_{ak} (MPa)	m	b (MPa)	C	h	N	B (MPa)
201.5	0.28	1.069	360	45.5	163	471	0.9	0.44	368.8

Tablo 6.11. Tavan destek sacı proses parametreleri

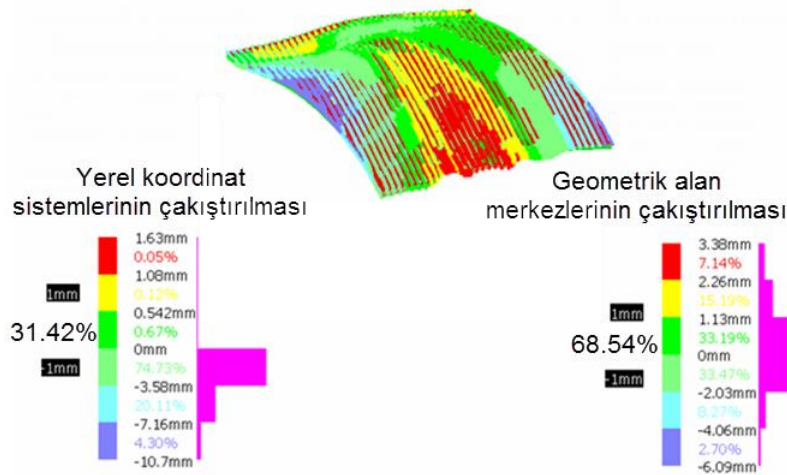
Sac kalınlığı	0,8 mm
Parça tutucu kuvvet	263 kN (1/2 model)
Sürtünme katsayısı	0,124
Maksimum üst kalıp hızı	2000 mm/s



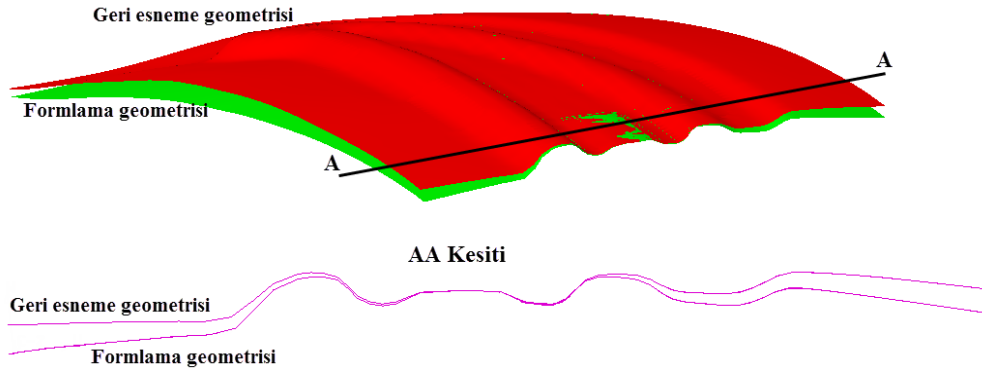
Şekil 6.42. Farklı malzeme modellerinden elde edilen SE sonuçlarının karşılaştırılması

Sonraki adım olarak karmaşık yüzeylerin karşılaştırılması incelenmiştir. Karşılaştırma, ilk olarak CAD yazılımının geleneksel konumlandırması ile yüzeylerin yerel koordinat sistemleri çakıştırılarak gerçekleştirilmiştir. İkinci olarak ise tez çalışması kapsamında yüzeyleri geometrik alan merkezlerinden çakıştıran FFST ara yüzü kullanılmıştır. Her iki yöntemle de elde edilen sonuçlar Şekil 6.43'te verilmiştir. Görüldüğü üzere karşılaştırma yüzeyleri aynı olmasına rağmen FFST ile konumlandırma oldukça hassastır. Geleneksel konumlandırma ile sonuçların iyileştirilmesi ve telafi adımına geçilmesi oldukça zaman alıcı prosesler sonrasında mümkün olabilecektir. İkinci yöntemde ise yakalanabilecek hassasiyet daha yüksek olurken, ek işlemler yapılmasının önleniği için çok daha kısa sürede telafi adımına geçilebilecektir. Telafi hassasiyeti, sonlu elemanlar tahmin hassasiyeti ile doğru orantılı olduğundan, yüzeylerin ilk karşılaştırma sonuçları, telafide yapılacak işlem sayısını ve süresini doğrudan etkilemektedir. Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen tüm karşılaştırmalar geliştirilen ara yüz kullanılarak yapılmıştır.

İlk simülasyon sonuçlarının elde edilmesinin ardından malzemenin geri esneme davranışını tespit etmek amacıyla geri esneme ve formlama yüzeyleri de karşılaştırılmıştır. Sonuçlar Şekil 6.44'de görülmektedir. Önerilen tasarım yönteminde kapsamında bir sonraki adım hassasiyet analizleridir.



Şekil 6.43. Konumlandırma işlemine göre yüzey uyumluluk analizi sonuçları



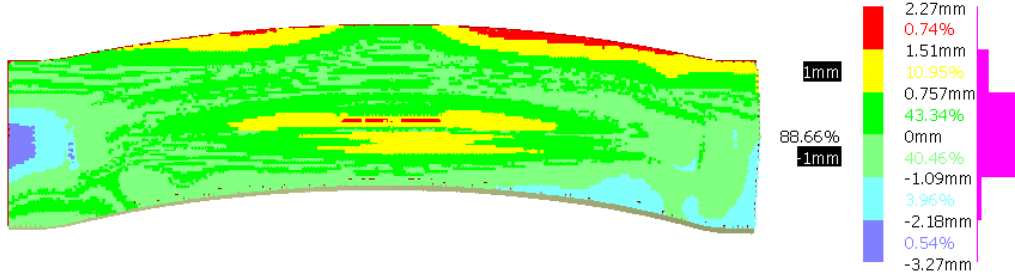
Şekil 6.44. Referans sonlu elemanlar analizi sonrasında elde edilen şekillendirme ve geri esneme yüzeyleri

6.2.3.4. Parametre hassasiyet analizi

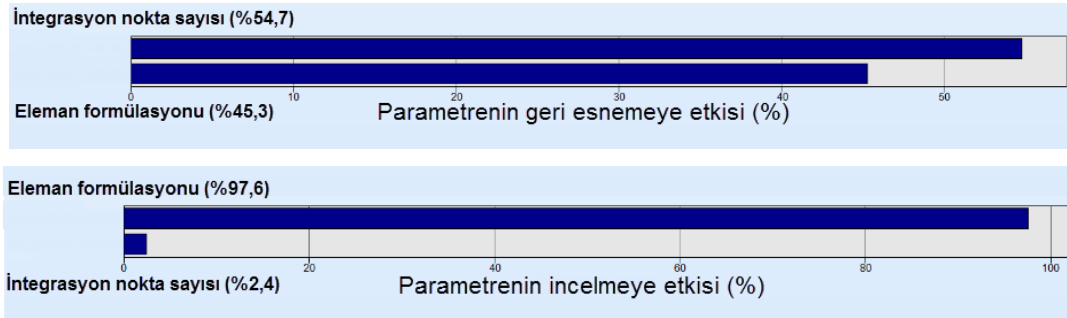
Bu adımda, sonlu elemanlar modellemesi için tasarım yöntemi kapsamında parametre hassasiyet analizleri yapılmıştır. Bu çalışmalarda açılı kanal çekme işlemine benzer şekilde deneysel tasarım yöntemi kullanılmıştır. Deneysel tasarım analizlerinde parametre olarak sonlu elemanlar hesaplama parametrelerinden integrasyon nokta sayısı ve eleman formülasyonu seçilmiştir. Eleman formülasyonu BT kabuk eleman ve FI kabuk eleman olarak, integrasyon nokta sayısı ise 3, 5, 7 ve 9 olarak belirlenmiştir. Belirlenen parametre kümesi içerisinde deneysel sonuca en yakın sonucun elde edildiği parametreler belirlenmiştir. Vekil modeller ile 2 boyutlu ve 3 boyutlu yanıt yüzeyleri elde edilmiştir. Tavan destek sacı formlama işleminde inceleme, %10 sınırının altında olduğundan karar verme mekanizmasında kritik parametre olarak yalnızca maksimum geri esneme miktarı dikkate alınmıştır.

Bu kapsamda elde edilen deneysel yüzey ile deneysel tasarım sonrası parametre gruplarından elde edilen yüzeyler karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalarda yüzey uyumluluk analizleri kullanılmıştır. Yüzey uyumluluk analizi sonuçlarında deneysel yüzeye en yakın sonuç, yaklaşık %88,7 uyumluluk ile BT kabuk eleman ve 7 integrasyon nokta sayısı kullanıldığında elde edilmiştir. Sonuçlar Şekil 6.45'te görülmektedir. Ayrıca deneysel tasarım çalışması ile sonlu elemanlar parametrelerinin hem maksimum geri esneme miktarına hem de incelemeye etki ağırlıkları da tespit edilmiştir. Sonuçlar Şekil 6.46'da verilmiştir. Görüldüğü üzere geri esneme üzerinde hemen hemen aynı etkiye sahip olsalar da inceleme üzerinde eleman formülasyonunun etkisi çok daha yüksektir. Hassasiyet analizleri sonrasında

sonlu elemanlar analizi sonuçlarının doğruluk seviyesi en hassas şekilde elde edilerek tavan destek sacı formlama işlemi için geri esneme telafili kalıp yüzeylerinin tasarımı gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.45. Hassasiyet analizi sonrası yüzey uyumluluk analizi

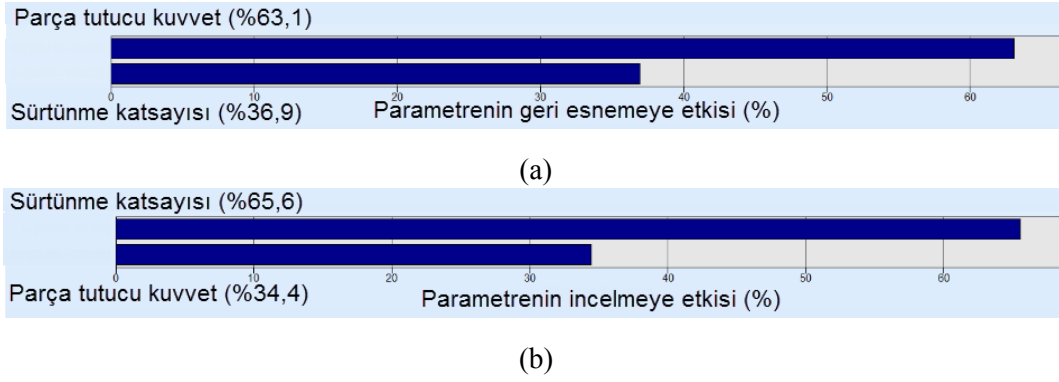


Şekil 6.46. Deneysel tasarım sonrası parametrelerin geri esneme ve incelme üzerindeki etkileri

6.2.4. Geri esneme telafili form kalıp yüzeylerinin geliştirilmesi

6.2.4.1. Proses parametrelerinin sonlu elemanlar geri esneme davranışına etkisi

Tavan destek sacı formlama işlemi için ilk olarak, sonlu elemanlar analizleri sonucu elde edilen geri esneme davranışı ele alınarak proses parametreleri ile geri esneme telafisi gerçekleştirilmiştir. Referans sonlu elemanlar analizleri sonucunda elde edilen geri esneme geometrisi, hedef parça geometrisi karşılaştırıldığında maksimum geri esneme miktarının yaklaşık 12 mm seviyelerinde olduğu tespit edilmiştir. Maksimum geri esneme bölgesi Şekil 6.47'de gösterilmiştir. Parça geometrisinde yüksek eğrilik bulunması ve çekme miktarının oldukça düşük olması ve yeni nesil yüksek mukavemetli çeliklerin yüksek geri esneme davranışı göstermesinden dolayı

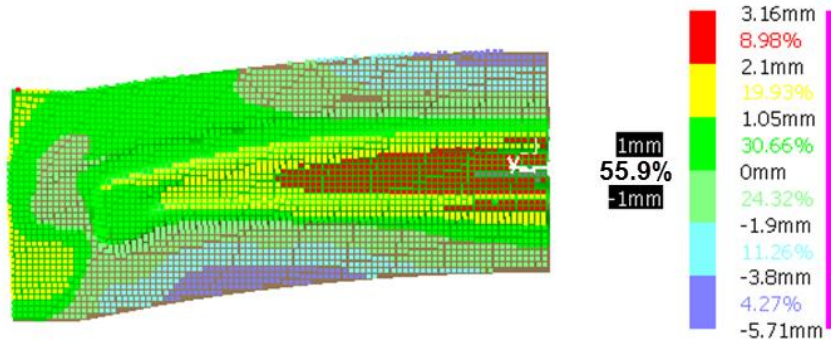


Şekil 6.48. Proses parametrelerinin geri esneme ve inceleme üzerine etki ağırlıkları

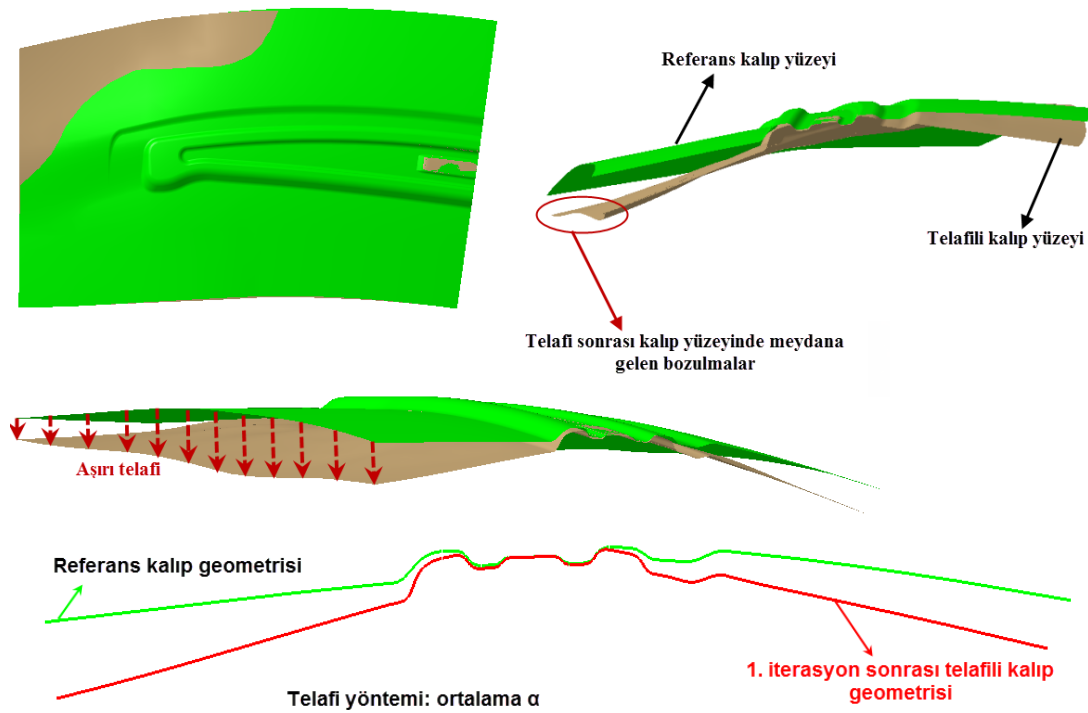
6.2.4.2. Telafili kalıp yüzeylerinin geliştirilmesi

Proses parametreleri ile yapılan telafi sonrasında geri esneme miktarı kabul edilebilir seviyeye indirilememiştir. Bu nedenle telafi, Deplasman Ayar (DA) yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. DA yöntemi açılı kanal çekme işleminde olduğu gibi üç farklı telafi faktörü (α) ile yapılmıştır. Birinci yöntemde telafi faktörü ortalama olarak, ikinci yöntemde (-1) olarak, üçüncü yöntemde ise dağılım olarak kullanılmıştır. İlk olarak referans sonlu elemanlar analizi sonuçları incelenmiştir. Bu kapsamda hedef parça geometrisini temsil eden formlama yüzeyi ve geri esneme yüzeyi yüzey uyumluluk analizleri ile karşılaştırılmıştır. Şekil 6.49'dan karşılaştırma sonucunda yüzey uyumluluğunun yaklaşık %46 olduğu görülmektedir. Bu oran endüstride, yüzeylerin montajda telafi edilebileceği limit olarak kabul edilen %80 limitinin üzerinde olmalıdır. DA yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen telafiler sonucunda, hedef parça geometrisi ve telafili kalıptan çıkan geri esneme geometrisinin uyumluluğu bu oranın üzerinde olmalıdır.

İlk telafi prosesi, ortalama α 'ya göre gerçekleştirilmiştir. Tavan destek sacı formlama işlemi için ortalama α değeri 2,75 olarak hesaplanmıştır. Ancak bu durumda, kalıp geometrisi istenilen parça geometrisinden farklılık göstermiş ve yüzeyde yüksek seviyelerde bozulmalar meydana gelmiştir, aşırı telafi olduğundan bu parça için ortalama α 'ya göre telafi gerçekleştirilememiştir. Elde edilen yüzeyler Şekil 6.50'de verilmiştir.



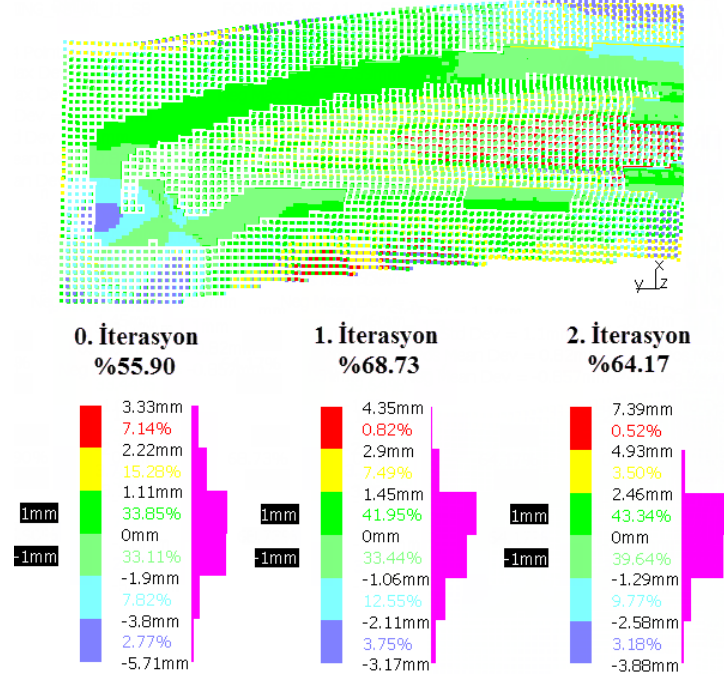
Şekil 6.49. Referans sonlu elemanlar analizi sonucunda formlama ve geri esneme geometrilerinin yüzey uyumluluk analizi



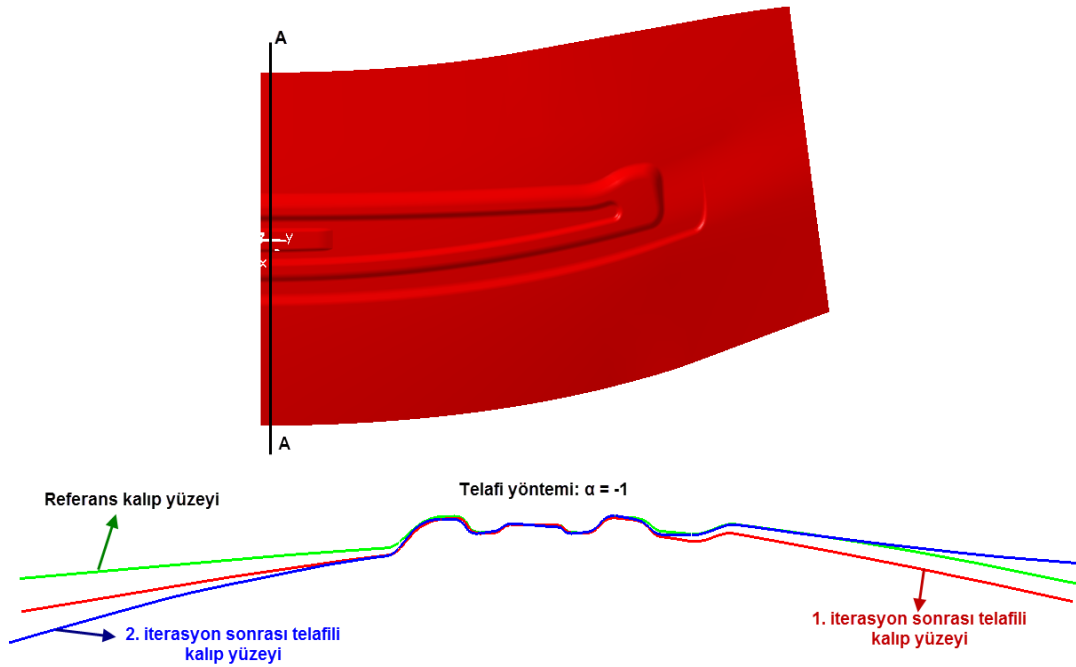
Şekil 6.50. Ortalama telafi faktörüne göre elde edilen telafili kalıp geometrisi

İkinci yöntemde ise telafi faktörü (-1) olarak kullanılarak, telafinin geri esneme miktarı kadar gerçekleşmesi sağlanmıştır. İlk iterasyon sonrası yüzey uyumluluk analizi yaklaşık %69 seviyesine gelmiştir. Endüstride yüzey uyumluluk analizi için kabul edilebilirlik limiti yaklaşık %80 olarak kullanıldığından bu seviye telafi için yeterli olmamaktadır. Bu nedenle yöntem iterasyonlu bir şekilde uygulanmıştır. Bu yöntemde 2 iterasyon sonrasında ortalama α 'da karşılaşılan yüzey bozulmaları meydana gelmiştir. Telafi faktörü (-1) iken iki iterasyon sonrası telafi durdurulmuştur. Telafi sonrası elde edilen geri esneme yüzeyleri ile ürün geometrisinin yüzey uyumluluk analizleri Şekil 6.51'de, iterasyonlar sonrasında elde

edilen telafili kalıp geometrileri ise Şekil 6.52’de gösterilmiştir. Sonuç olarak bu yöntemle de başarılı bir telafi gerçekleştirilememiştir.

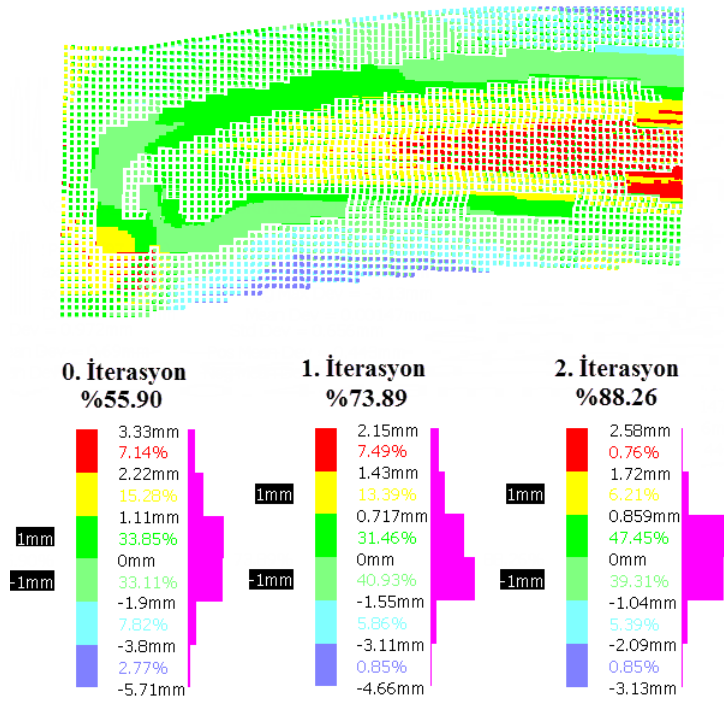


Şekil 6.51. Telafi faktörü (-1) iken elde edilen yüzey uyumluluk analizi sonuçları

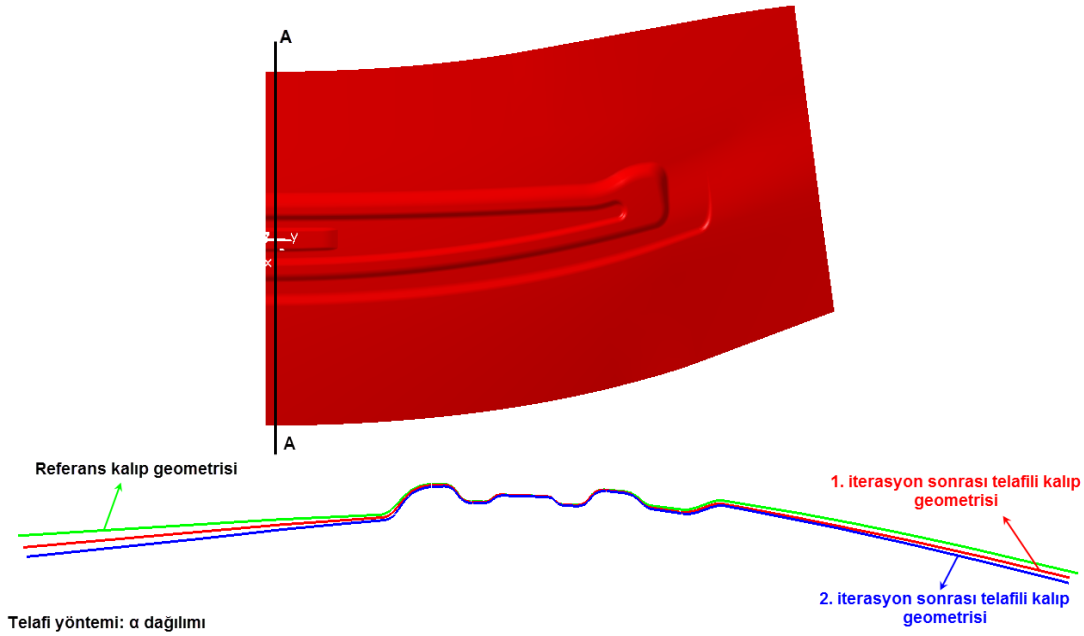


Şekil 6.52. İterasyonlar sonrasında elde edilen kalıp yüzeyleri ($\alpha = -1$)

Son olarak telafi faktörü parça üzerinde dağılım şeklinde uygulanmıştır. Böylelikle tek bir telafi faktörü yerine her bir düğüm noktası için farklı telafi faktörleri kullanılmıştır. Bu durumda birinci iterasyon sonrası yüzey uyumluluk analizi yaklaşık %74 seviyesine gelmiştir. Bu seviye yeterli olmadığından iterasyonlara devam edilmiştir. 2. iterasyon sonrası yüzey uyumluluk analizi %88 seviyesine çıkmıştır. Bu sonuç endüstriyel bir ürün için montajda telafi edilebilecek seviyeye geldiğini göstermektedir. Sonuçları daha da iyileştirmek adına bir iterasyon daha yapıldığında diğer yöntemlerde olduğu gibi kalıpta yüzey bozulmaları meydana gelmiştir. Yüzey uyumluluk analizi sonuçları Şekil 6.53'te, iterasyonlar sonrasında elde edilen kalıp geometrileri ise Şekil 6.54'de verilmiştir.



Şekil 6.53. Telafi faktörünün dağılım olarak kullanıldığı telafiler sonrası yüzey uyumluluk analizi sonuçları



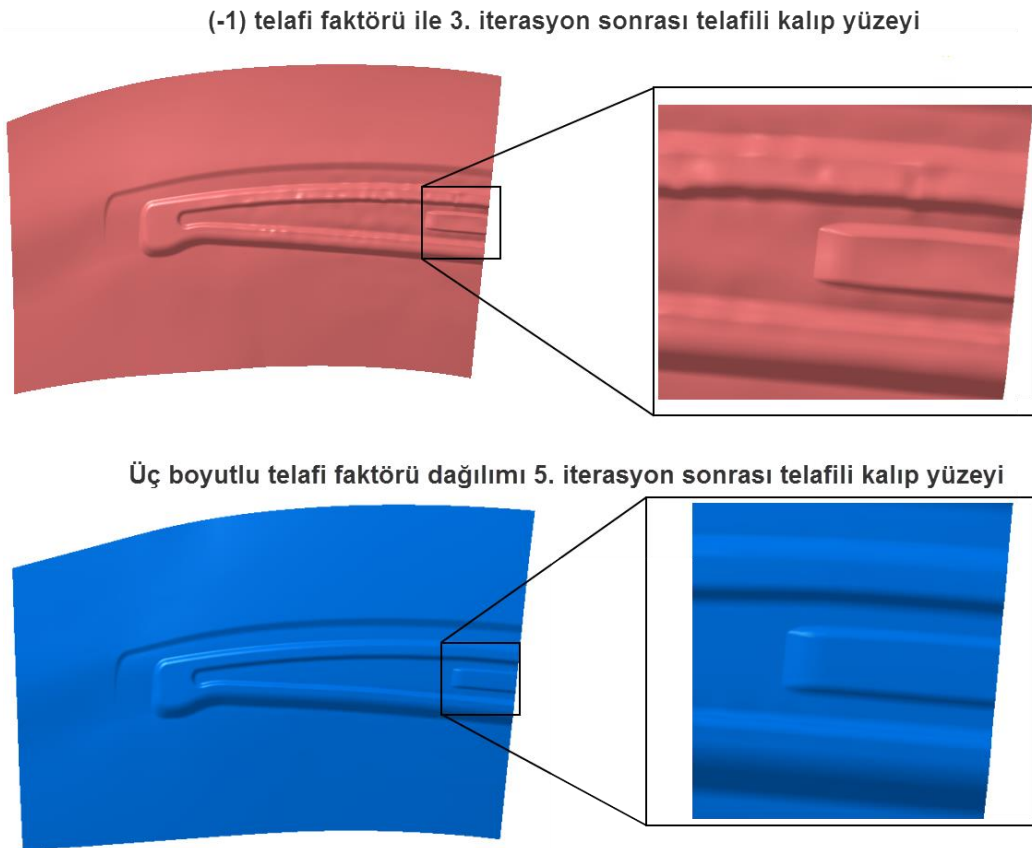
Şekil 6.54. İterasyonlar sonrasında elde edilen kalıp yüzeyleri (α dağılımı)

Son olarak telafi faktörü parça üzerinde dağılım şeklinde uygulanmıştır. Böylelikle tek bir telafi faktörü yerine her bir düğüm noktası için farklı telafi faktörleri kullanılmıştır. Bu durumda birinci iterasyon sonrası yüzey uyumluluk analizi yaklaşık %74 seviyesine gelmiştir. Bu seviye yeterli olmadığından iterasyonlara devam edilmiştir. 2. iterasyon sonrası yüzey uyumluluk analizi %88 seviyesine çıkmıştır. Bu sonuç endüstriyel bir ürün için montajda telafi edilebilecek seviyeye gelindiğini göstermektedir. Sonuçları daha da iyileştirmek adına bir iterasyon daha yapıldığında diğer yöntemlerde olduğu gibi kalıpta yüzey bozulmaları meydana gelmiştir. Yüzey uyumluluk analizi sonuçları Şekil 6.53'te, iterasyonlar sonrasında elde edilen kalıp geometrileri ise Şekil 6.54'de verilmiştir.

Sonuç olarak telafi faktörü dağılım olarak kullanıldığı başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Fakat bütün yöntemlerde belirli bir iterasyon sonrasında kalıp yüzeylerinde bozulmalar meydana gelmekte ve elde edilen sonuçlar belirli bir seviyeden daha ileriye gidememektedir. Böylesi bir problemin geometri ya da malzeme değiştiğinde daha büyük sorunlara neden olabileceği hatta telafi yapılmasını mümkün kılamayacağı düşünülmektedir. Bu nedenle bu problemin önüne geçmek adına tez çalışması kapsamında üç boyutlu telafi faktörü ile geri esneme yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemde her bir düğüm noktası ve her bir yön

için farklı telafi faktörleri kullanılmaktadır. Böylelikle kalıp geometrisi her yönde telafi edilmektedir. Bu yöntem, tez çalışmasının 5. Bölümünde detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

Telafi faktörünü üç boyutlu dağılım şeklinde kullanarak tavan destek sacı formlama prosesi tekrar çalışılmıştır. Telafi faktörü dağılım şeklinde sadece formlama yönünde uygulandığında 2 iterasyon sonrasında kalıp geometrisinde bozulmalar meydana geldiği tespit edilmiş ve dolayısı ile telafi 2 iterasyon sonunda sonlandırılmak zorunda kalmıştır. Fakat telafi faktörü üç boyutlu dağılım şeklinde uygulandığında 5 iterasyon sonrasında bile kalıp yüzeyi bozulmamaktadır. Kalıp yüzeyleri, Şekil 6.55’de görülmektedir.

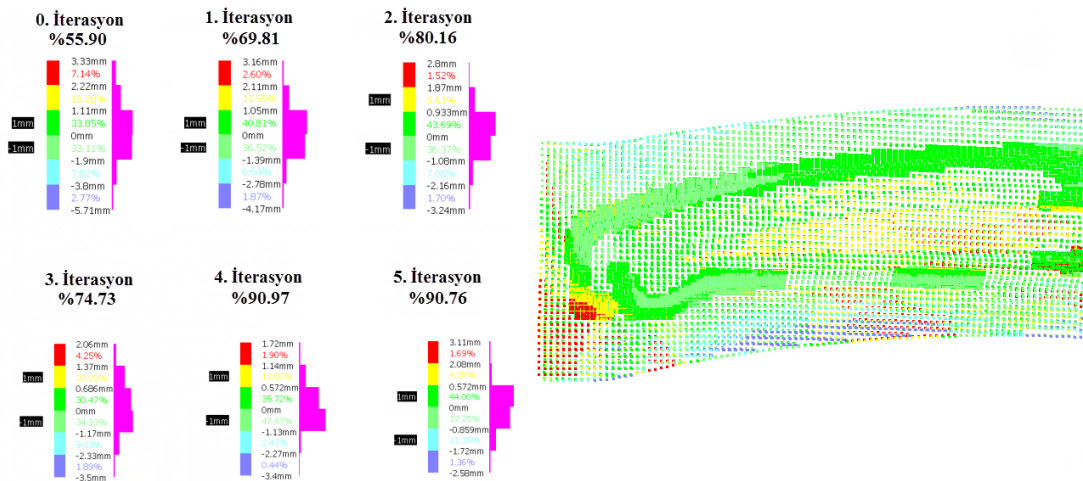


Şekil 6.55. İterasyonlar sonucu telafili kalıp yüzeyleri

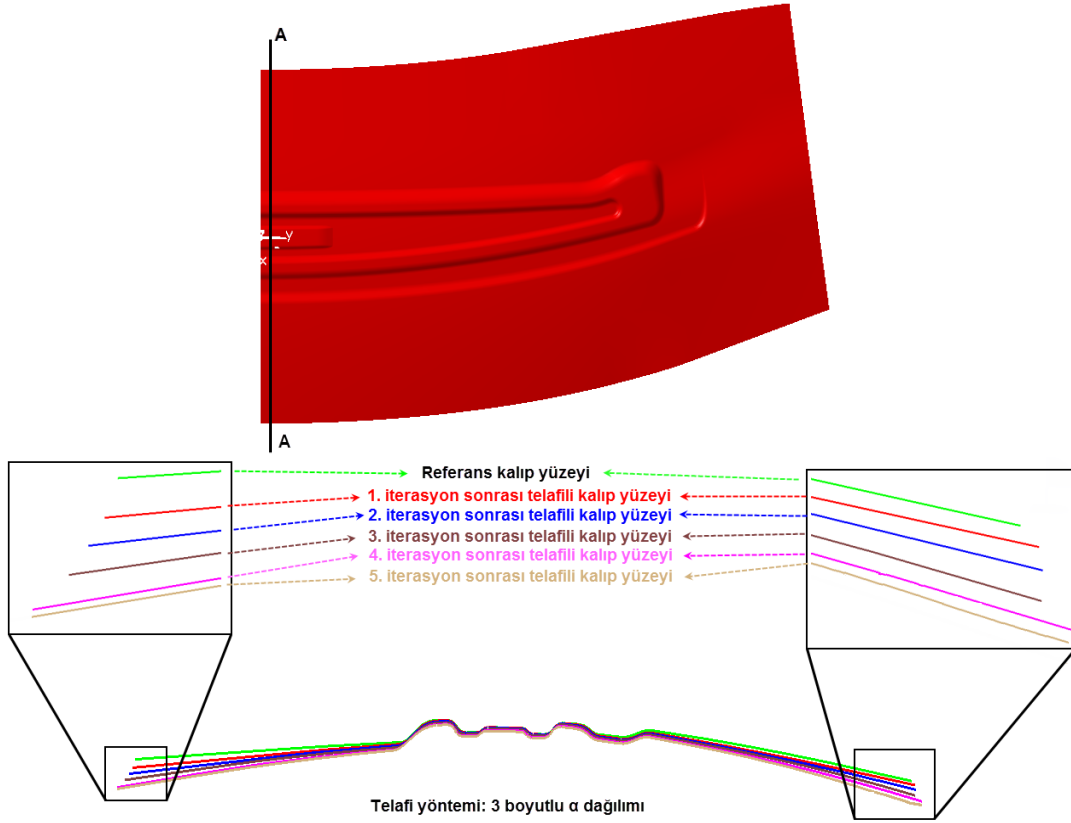
Telafi faktörünün üç boyutlu dağılım şeklinde uygulanması telafi yakınsama hızını bir miktar azaltmaktadır fakat kalıp yüzeyi bozulmadığından iterasyon sayısı oldukça fazla tutulabilmektedir ve en hassas telafi geometrisinin yakalanma şansı oldukça

artmaktadır. Ayrıca iterasyonlar sonrasında telafi için yakınsama sağlanabilmektedir. Telafi faktörü üç boyutlu dağılım şeklinde tavan destek sacı formlama işlemi için 5 iterasyon olarak uygulanmıştır. İterasyonlar sonucu elde edilen her bir telafili kalıpla tekrar sonlu elemanlar analizleri yapılmıştır. Elde edilen geri esneme geometrileri, ürün geometrisi ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmaların yüzey uyumluluk analizi sonuçları Şekil 6.56'da, iterasyonlar sonucunda elde edilen kalıp geometrileri ise Şekil 6.57'de gösterilmiştir.

Görüldüğü üzere telafi faktörü üç boyutlu dağılım şeklinde kullanıldığında yaklaşık %91 oranında uyumluluk elde edilebilmektedir. Sonuç olarak üç boyutlu telafi faktörü kullanarak uygulanan yöntem sonrasında tavan destek sacı formlama işleminde geri esneme telafisi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.56. Telafi faktörünün üç boyutlu dağılım şeklinde kullanılması ile 5 iterasyon sonrası elde edilen sonuçların yüzey uyumluluk analizleri



Şekil 6.57. İterasyonlar sonrasında elde edilen kalıp yüzeyleri (3-D α dağılımı)

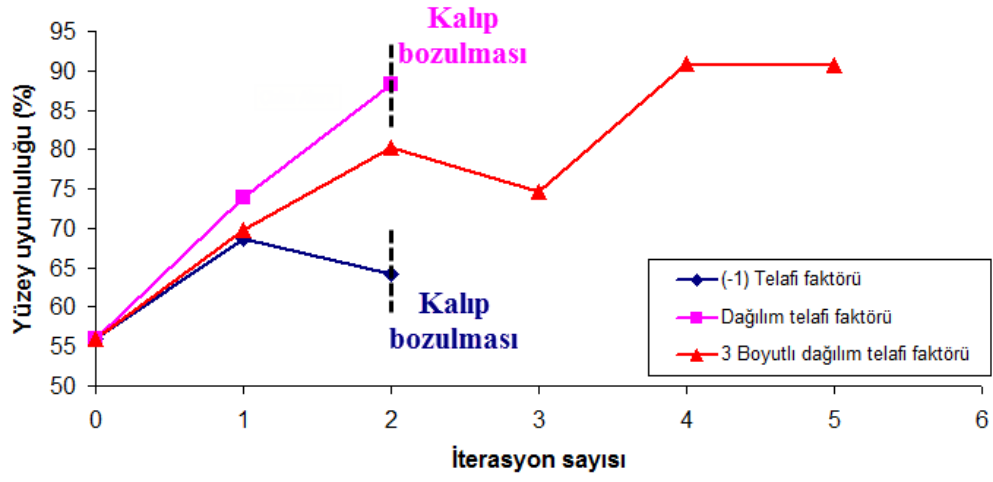
6.2.5. Adımlı telafi sonuçlarının değerlendirilmesi

Tez çalışması kapsamında önerilen tasarım yöntemi, endüstriyel bir uygulama olarak tavan destek sacı formlama prosesine uygulanmıştır. Çalışma kapsamında ilk olarak sonlu elemanlar modellemesinde malzeme davranışının tanımlanması adına malzeme parametreleri elde edilmiştir. Malzeme parametrelerinin elde edilmesinde tek eksenli çekme deneyi ve yükleme-boşaltma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Geri esneme davranışı üzerinde oldukça yüksek etkisi bulunan elastisite modülü çekme deneyinden eğri uydurma yöntemi ile hassas bir şekilde hesaplanmıştır. Malzemenin plastisite modellemesinde kinematik pekleşme modelleri kullanılarak elastisite modülünün değişimi de dikkate alınmıştır. Sonlu elemanlar modellemesi, deneysel tasarım yöntemi kullanılarak hassasiyet analizleri ile birlikte gerçekleştirilmiştir. Böylelikle telafi adımı için en hassas sonlu elemanlar parametreleri belirlenmiş ve zaman kayıpları en aza indirilmiştir. Yüzey karşılaştırmaları tez çalışması kapsamında geliştirilen FFST ara yüzü ile yapılarak yüzey karşılaştırmaları en hassas şekilde gerçekleştirilmiştir.

Bir sonraki adımda, geri esneme telafili kalıp yüzeyleri elde edilmiştir. Geri esneme telafisi için öncelikle proses parametreleri yine deneysel tasarım analizleri ile incelenmiş fakat geri esneme sonucunda parça boyutlarını tolerans sınırlarına getiremediği tespit edilmiştir. Bu nedenle Deplasman Ayar (DA) yöntemi ile geri esneme telafili kalıp yüzey tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda 3 farklı telafi faktörü kullanılmıştır. Telafi faktörünün ortalama olarak kullanımında kalıp yüzeyinde bozulma meydana geldiğinden bu faktörle telafi gerçekleştirilememiştir. İkinci olarak telafi faktörü (-1) olarak kullanılmıştır 3. iterasyon adımında yine kalıp yüzeyinde bozulmalar meydana gelmiş ve bu adımda telafi prosesi sonlandırılmıştır. Yüzey uyumluluk analizleri incelendiğinde telafi faktörünün (-1) olarak kullanılması ile tolerans boyutlarına ulaşamamıştır. Diğer yöntem olarak telafi faktörü dağılım şeklinde uygulanmıştır. Bu yöntemde de 3. iterasyon sonrasında da kalıp yüzeyi bozulmuş ve telafi sonlandırılmıştır. Telafi faktörünün dağılım olarak kullanılması ile yaklaşık %88 oranında yüzey uyumluluk analizi elde edilmiştir. Bu seviye endüstride montajda telafi edilebilir şekilde yorumlanmaktadır. Her üç yöntemde de belirli bir iterasyon sonrasında kalıp yüzeyleri bozulduğundan telafileri belirli bir adımdan sonra sonlandırılmak zorunda kalmıştır. Bu nedenle son olarak tez çalışması kapsamında önerilen üç boyutlu telafi faktörü dağılımı yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemle 5 iterasyon sonrasında bile kalıp yüzeylerinde herhangi bir bozulma meydana gelmemiştir. Bu yöntemle yüzey uyumluluk analizi sonucu ise yaklaşık %91 oranındadır. Bu sonuç ile telafinin oldukça başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği görülmektedir.

Sonuçlar incelendiğinde, önerilen tasarım yönteminin endüstriyel uygulamalar için de oldukça kullanışlı ve başarılı olduğu tespit edilmiştir. Telafi prosesi oldukça hassas ve zaman kayıpları en aza indirilmiş olarak gerçekleştirilmiştir. Önerilen 3 boyutlu telafi faktörü dağılımı ile birlikte kalıp yüzey bozulmaları önlenmiş ve iterasyonlar sonucu yüzey uyumluluk analizlerinde yakınsama elde edilmiştir. Literatürde geri esneme telafisi ile ilgili çalışmalar [99-102] incelendiğinde kalıp bozulmaları ve yakınsama üzerine herhangi bir çalışma yapılmadığı tespit edilmiştir. Tavan destek sacı formlama prosesi için yapılan telafi yöntemlerinin karşılaştırması Şekil 6.58'de verilmiştir. Görüldüğü üzere diğer yöntemlerde belirli bir iterasyondan sonra kalıp geometrileri bozulurken üç boyutlu telafi faktörü dağılımı yönteminde

kalıp bozulmaları oluşmamış ve 5 iterasyon sonrasında yüzey uyumluluk analizlerinde yakınsama sağlanmıştır.



Şekil 6.58. Tavan destek sacı formlama işlemi için toleran sonuçlarının karşılaştırılması

BÖLÜM 7. DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER

7.1. Değerlendirme

Yapılan tez çalışmasının temel amacı, sac metal formlama işlemlerinde ortaya çıkan şekilsel ve boyutsal bozulmaların telafisini amaçlayan bir tasarım yöntemi oluşturmaktır.

Tez çalışmasında önerilen tasarım yönteminde ilk olarak sonlu elemanlar modellenmesi için oldukça kritik olan malzeme davranışının modellenmesi ve sonlu elemanlar hesaplama parametreleri incelenmiştir. Malzemelerin plastisite modellenmesi için izotrop malzeme- izotrop pekleşme kabulü yapan modeller [50, 51], anizotropik malzeme-izotrop pekleşme kabulü yapan modeller [55, 56] ve anizotropik malzeme-kinematik pekleşme kabulü yapan modeller incelenmiştir [59]. Literatür araştırmaları da göz önüne alındığında kinematik pekleşme kabulü yapan malzeme modellerinin sac metal formlama sonlu elemanlar analizleri için daha hassas sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Malzeme davranışının modellenmesi için bir diğer kritik unsur plastisite model parametrelerinin elde edilmesidir. Tez çalışmasında malzeme parametrelerinin elde edilmesi için çekme ve yükleme-boşaltma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Malzeme parametrelerinin hassas elde edilebilmesi için geleneksel yöntemler yerine Matlab yazılımında eğri uydurma yöntemleri kullanılmıştır. Geri esneme davranışında oldukça kritik bir malzeme özelliği olan elastisite modülünün formlama sırasındaki değişimini modelleyebilmek adına yükleme-boşaltma deneylerinden elastisite modülleri hesaplanmıştır. Elde edilen değişimler kinematik pekleşme kabulü yapan malzeme modellerinde uygulanmıştır. Modelleme açısından bir diğer önemli unsur olan sonlu elemanlar analizlerine ait parametrelerin modelleme hassasiyetine etkileri deneysel tasarım yöntemi ile incelenmiştir. Eleman formülasyonu ve integrasyon nokta sayısı sonlu elemanlar analizi parametreleri olarak seçilmiş ve yanıt yüzeyleri kullanılarak geri

esneme modelleme hassasiyetine etkileri incelenerek parametrelerin en hassas şekilde seçilmesi sağlanmıştır.

Sonlu elemanlar modellemesi sonrasında elde edilen geri esneme yüzeylerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılmasında önemli rol oynayan yüzeylerin konumlandırılması işlemi tasarım yönteminin bir diğer adımını oluşturmaktadır. Tez çalışmasında yapılan literatür inceleme sonucunda yüzey karşılaştırmasında genellikle kontrol noktaları ya da karşılaştırılacak yüzeylerin yerel koordinat sistemlerinin çakıştırıldığı görülmüştür. Çalışma kapsamında karşılaştırılacak yüzeylerin geometrik alan merkezlerini hesaplayan ve yüzeyleri bu alan merkezlerinden konumlandıran bir ara yüz geliştirilmiştir. Bu ara yüz ile yapılan konumlandırma işlemlerinin geleneksel yöntemlere göre daha hassas olduğu tespit edilmiştir. Geliştirilen ara yüz ile aynı ya da farklı sonlu elemanlar ağ yapısına sahip olan yüzeyler kolaylıkla karşılaştırılabilmektedir. Ara yüz aynı zamanda telafili form yüzeylerinin geliştirilmesinde dikkate alınan geri esneme dağılımını hesaplayabilmekte ve CAD yazılımlarında kullanılabilir bir dosya oluşturup kaydedebilmektedir. Karşılaştırılacak yüzeylerin boyutsal doğrulukları endüstriyel tolerans bantları kullanılarak yüzey uyumluluk analizleri ile incelenmiştir.

Tasarım yönteminin son adımında geri esneme telafisi yer almaktadır. Çalışma kapsamında geri esneme telafisi öncelikle proses parametreleri üzerinden incelenmiştir. Proses parametrelerinin geri esneme davranışına etkisi yine deneysel tasarım yöntemi ile tespit edilmiştir. Kalıp yüzeylerinin geri esneme davranışına göre geliştirilmesi kapsamında ise Deplasman Ayar (DA) yöntemi kullanılmıştır. DA yöntemi, telafinin geri esneme miktarı kadar yapıldığı (-1) telafi faktörü kullanımı, telafinin her bir düğüm noktasındaki geri esneme miktarına göre farklı telafi faktörlerinin kullanıldığı dağılım şeklinde ve telafinin parça üzerindeki ortalama geri esneme dağılımı referans alınarak yapıldığı ortalama telafi faktörü kullanımı olmak üzere üç farklı şekilde kullanılmıştır. DA yönteminde yapılan iterasyonlar sonrasında kalıp yüzeylerinin belirli bir iterasyon sayısından sonra bozulduğu görülmüştür. Bu problemi önlemek adına 3 boyutlu telafi faktörü dağılımı yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemde telafi faktörü yalnızca formlama yönünde değil çalışma uzayındaki kartezyen koordinat sistemine ait tüm yönlerde ve tüm düğüm noktalarında farklılık

göstermektedir. Bunun sonucunda da kalıp yüzeyi her yönde telafi edilmekte ve meydana gelebilecek bozulmalar engellenmektedir.

Tez çalışması kapsamında önerilen tasarım yöntemi ilk olarak literatürde sıklıkla kullanılmış olan ve birçok araştırmacı tarafından geri esneme telafisi konusunda çalışılmış olan açılı kanal çekme işleminin incelenmesi ve geri esneme telafisi yapılarak telafili kalıp yüzey tasarımının gerçekleştirilmesinde kullanılmıştır. Tasarım yöntemi kapsamında ilk olarak sonlu elemanlar modellemesi gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar analizleri hassasiyet analizi çerçevesinde yapılarak geri esneme telafisi için harcanan süre en aza indirilmiştir. Bu kapsamda malzeme modelleri ve deneysel tasarım yöntemi ile parametre hassasiyet analizi gerçekleştirilmiştir. Malzeme davranışının modellenmesinde AA2008-T4 malzemesi için, akma kuralı, Hill-48 ve Yoshida-Uemori modelleri kullanılmıştır. Sonlu elemanlar analizi sonucunda kinematik pekleşme kabulü yapan Yoshida-Uemori malzeme modelinin diğer modellere göre daha hassas tahmin gerçekleştirdiği tespit edilmiştir. Tasarım yönteminin bir sonraki adımı olan geri esneme telafisi için proses parametreleri ile telafi yeterli olmadığından deplasman adaptasyon yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem ortalama, dağılım ve (-1) katsayılı olmak üzere 3 farklı telafi faktörü ile uygulanmıştır. Telafi faktörü (-1) olarak kullanıldığında tek adımda telafi işleminin gerçekleştirildiği tespit edilmiştir. Önerilen tasarım yöntemi literatürden referans olarak kullanılan Karafillis ve Boyce'un [93] çalışması ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma kapsamında ilk farklılık kullanılan malzeme modellerinde ortaya çıkmaktadır. Karafillis çalışmasında malzemeyi izotrop olarak kabul edip izotrop pekleşme davranışı ile modelleme yapmıştır, tez çalışmasında ise hem izotrop hem de kinematik pekleşme malzeme modelleri kullanılmış ve kinematik pekleşme kabulü yapan malzeme modellerinin daha hassas sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Aynı zamanda önerilen telafi yönteminin hem izotrop hem de kinematik pekleşme malzeme modelleri ile uygulanabildiği ve sonuç olarak yöntemin malzeme modelinden bağımsız olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca çalışma kapsamında parametre seçiminde deneysel tasarım yöntemi kullanıldığından parametre belirleme sürecinde deneme-yanılma yönteminde yaşanan zaman kayıplarının önüne geçilmiştir. Geri esneme telafi adımı ise Karafillis'in çalışmasında İleri Esnetme, tez çalışmasında ise Deplasman Ayar yöntemi

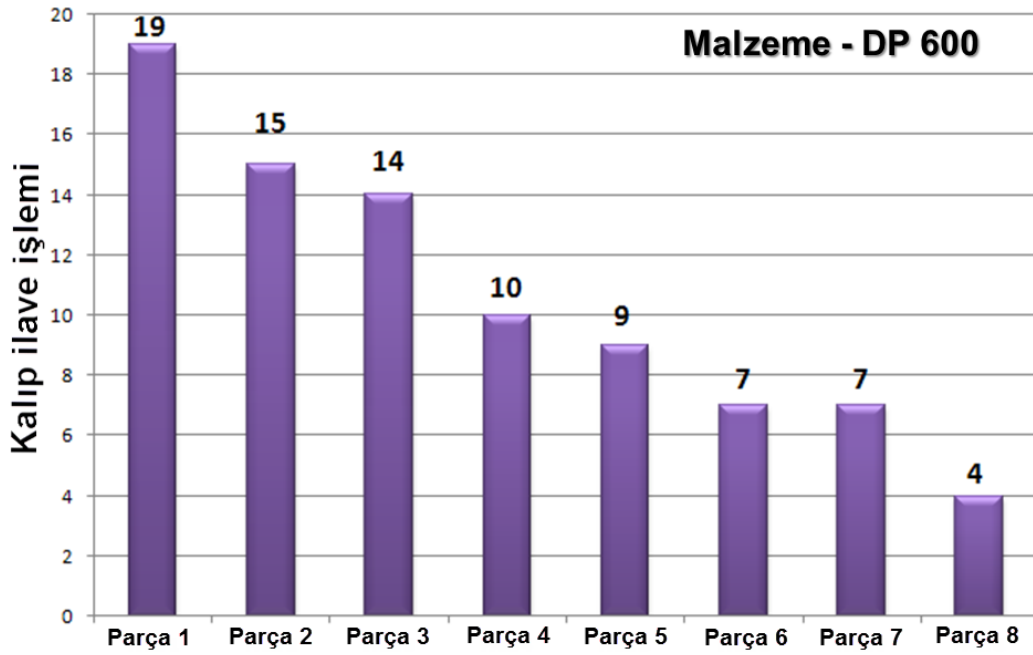
kullanılmıştır. Telafi sonuçları incelendiğinde ileri esnetme yöntemi ile 2 iterasyon sonucunda telafi gerçekleştirilmiş ve başlangıçta yaklaşık 5 mm olan maksimum geri esneme miktarı 0.8 mm seviyesine indirilmiştir. Tez çalışması kapsamında ise DA yöntemi ile (-1) telafi faktörü kullanılarak tek adımda telafi gerçekleştirilmiş ve maksimum geri esneme miktarı 0.58 mm seviyesine indirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre tez çalışması kapsamında önerilen yöntemin telafili kalıp tasarımı açısından literatür çalışmalarına göre daha hızlı ve daha başarılı çalıştığı tespit edilmiştir

Doktora tez çalışmasında endüstriyel uygulama olarak BMW binek aracında kullanılan, DP600 malzemesine sahip bir tavan destek sacı formlama işlemi çalışılmıştır. Malzemenin plastisite modellemesinde kinematik pekleşme modelleri kullanılarak elastisite modülünün değişimi de dikkate alınmıştır. Sonlu elemanlar modellemesi deneysel tasarım yöntemi ile hassasiyet analizleri ile birlikte gerçekleştirilmiştir. Böylelikle telafi adımı için en hassas sonlu elemanlar parametreleri belirlenerek zaman kayıpları en aza indirilmiştir. Bir sonraki adımda geri esneme telafili kalıp yüzeyleri elde edilmiştir. Geri esneme telafisi için öncelikle proses parametreleri yine deneysel tasarım analizleri ile incelenmiş fakat geri esneme sonucunda parça boyutlarını tolerans sınırlarına getiremediği tespit edilmiştir. Bu nedenle Deplasman Ayar (DA) yöntemi ile geri esneme telafili kalıp yüzey tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda 3 farklı telafi faktörü kullanılmıştır. Telafi faktörünün ortalama olarak kullanımında kalıp yüzeyinde bozulma meydana geldiğinden bu faktörle telafi gerçekleştirilememiştir. İkinci olarak telafi faktörü (-1) olarak kullanılmıştır 3. iterasyon adımında kalıp yüzeyinde bozulmalar meydana geldiğinden bu adımda telafi prosesi sonlandırılmıştır. Yüzey uyumluluk analizleri incelendiğinde telafi faktörünün (-1) olarak kullanılması ile tolerans boyutlarına ulaşamamıştır. Diğer yöntem olarak telafi faktörü dağılım şeklinde uygulanmıştır. Bu yöntemde de 3. iterasyon sonrasında kalıp yüzeyi bozulmuş ve telafi sonlandırılmıştır. Telafi faktörünün dağılım olarak kullanılması ile yaklaşık %88 oranında yüzey uyumluluk analizi elde edilmiştir. Bu seviye endüstride montajda telafi edilebilir şekilde yorumlanmaktadır. Her üç yöntemde de belirli bir iterasyon sonrasında kalıp yüzeyleri bozulduğundan telafiler belirli bir adımdan sonra sonlandırılmıştır. Bu nedenle son olarak tez çalışması kapsamında önerilen üç

boyutlu telafi faktörü dağılımı yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemle 5 iterasyon sonrasında bile kalıp yüzeylerinde herhangi bir bozulma meydana gelmemiştir. Bu yöntemle yüzey uyumluluk analizi sonucu ise yaklaşık %91 oranındadır. Bu sonuç ile telafinin oldukça başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde önerilen tasarım yönteminin endüstriyel uygulamalar için de oldukça kullanışlı ve başarılı olduğu tespit edilmiştir. Önerilen 3 boyutlu telafi faktörü dağılımı ile birlikte kalıp yüzey bozulmaları önlenmiş ve iterasyonlar sonucu yüzey uyumluluk analizlerinde yakınsama elde edilmiştir. Literatürde geri esneme telafisi ile ilgili çalışmalar [99-102] incelendiğinde kalıp bozulmaları ve yakınsama üzerine herhangi bir çalışma yapılmadığı tespit edilmiştir.

Uygulama örneklerinden görüldüğü üzere telafinin iterasyon sayısı ve telafi faktörünün kullanım şekli kalıp geometrisine göre değişiklik göstermektedir. Bunun nedeni geometri karmaşıktıkça telafinin sonuca ulaşma hızının azalmasıdır. Açılı kanal çekme işlemi için de telafi faktörü dağılımı olarak kullanılabilir fakat dağılım daha kontrollü bir yöntemdir bu nedenle karmaşık kalıplar için daha uygundur. Basit geometri kalıplar tek bir telafi faktörü kullanılarak daha hızlı ve kolay bir şekilde telafi edilebilmektedirler. Bu kapsamda bir diğer görüş ise parçanın plastik deformasyon miktarıdır. Plastik deformasyon miktarı arttıkça geri esneme azalmaktadır ve aynı zamanda telafi prosesinin etkisi oldukça artmaktadır. Tavan destek sacı gibi düşük derinlikte çekme miktarı ile formlanan ve yüksek eğrilik barındıran parçalarda plastik deformasyon miktarı da düşüktür. Bu durum, hem geri esneme miktarının yüksek olmasına neden olmakta hem de telafinin efektif olarak gerçekleştirilmesini oldukça zorlaştırmaktadır [158]. Tavan destek sacı formlama işlemi için telafiye zorlaştıran bir diğer durum ise malzemedir. Kanal çekme prosesinde bir alüminyum alaşımı kullanılırken, tavan destek sacı formlama işleminde gelişmiş yüksek mukavemetli çelik grubundan DP600 çeliği kullanılmıştır. Sonuç olarak tez çalışması sonucunda geliştirilen yöntemler hem akademik hem de endüstriyel kalıplarda başarılı bir şekilde uygulanabilmektedir. Önerilen tasarım prosedüründe telafi hızını arttırmak adına atılan adımlarda oldukça başarılı olunmuştur.

Şekil bozukluğu telafisinin endüstri için önemi Şekil 7.1'de verilen grafikten anlaşılabilir. Şekilde, Coşkunöz A.Ş. firmasına ait geri esneme sebebi ile 8 farklı parçanın kalıplarında yapılan ilave işleme sayıları görülmektedir. Tekrar işlemler sebebiyle parçaların üretim maliyetleri artmaktadır. En çok ilave işlemeye ihtiyaç duyulan parçalar ise tavan destek sacı gibi yüksek eğrilikli ve düşük çekme miktarına sahip parçalardır. Bu grafik göz önüne alındığında tez çalışması kapsamında önerilen yöntemlerin endüstriyel açıdan önemi açıkça görülmektedir.



Şekil 7.1. Geri esneme sebebi ile farklı parça kalıplarında yapılan ilave işlem sayıları

7.2. Gelecekte Yapılacak Çalışmalar İçin Öneriler

Deplasman Ayar yöntemi ile gerçekleştirilen telafi çalışmaları kapsamında telafi yönünün oldukça kritik rol oynadığı tespit edilmiştir. Yaşanan kalıp bozulmaları 3 boyutlu telafi faktörü dağılımı ise telafi her yönde yapılarak engellenmiştir. Telafi yönünün 3 boyutlu olarak uygulanması daha çok hesap adımı gerektirmektedir. Bu nedenle telafi yönü, genelleştirilmiş bir ifade ile tanımlanarak işlem sayısının azaltılabileceği düşünülmektedir. Dolayısıyla bu açıdan yöntem daha detaylı çalışmalıdır.

Ayrıca, geri esneme davranışı malzemeye göre değişkenlik gösterdiğinden telafi işlemleri de malzemeye göre değişmektedir. İleriki dönemlerde her malzeme için başarılı sonuç verebilen genelleştirilmiş bir telafi prosesinin elde edilmesi özellikle endüstri açısından oldukça önemli olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Digital Car Magazine, sayı:47, Eylül, 2014.
- [2] Autocar, sayı:108, Ocak, 2015.
- [3] www.worldautosteel.org/steel-basics/automotive-steel-definitions, Erişim Tarihi: 29.01.2015.
- [4] BARIANI, P.F., BRUSCHI, S., , GHIOTTI, A., TURETTA, A., Testing formability in the hot stamping of HSS, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 57(1):265–268, 2008.
- [5] STOUGHTON, T. B., YOON, J. W., Sheet metal formability analysis for anisotropic materials under non-proportional loading, International Journal of Mechanical Sciences, 47(12):1972–2002, 2005.
- [6] STOUGHTON, T. B., YOON, J. W., A new approach for failure criterion for sheet metals, International Journal of Plasticity, 27(3):440–459, 2011.
- [7] STOUGHTON, T. B., A general forming limit criterion for sheet metal forming, International Journal of Mechanical Sciences, 42(1):1–27, 2000.
- [8] CHEN, M.H., GAO, L., ZUO, D.W., WANG, M., Application of the forming limit stress diagram to forming limit prediction for the multi-step forming of auto panels, Journal of Materials Processing Technology, v.187–188:173–177, 2007.
- [9] HILDITCH, T.B., DESOUZA, T., HODGSON, P.D., Properties and automotive applications of advanced high-strength steels (AHSS), Welding and Joining of Advanced High Strength Steels (AHSS), Elsevier, pp. 9-28, 2015.
- [10] GRAJCAR, A., KUZIAK, R., ZALECKI, W., Third generation of AHSS with increased fraction of retained austenite for the automotive industry, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 12(3):334–341, 2012.
- [11] KIM, H., KIM, C., BARLAT, F., PAVLINA, E., LEE, M.-G., Nonlinear elastic behaviors of low and high strength steels in unloading and reloading, Materials Science and Engineering: A, 562:161–171, 2013.

- [12] KUZIAK, R., KAWALLA, R., WAENGLER, S., “Advanced high strength steels for automotive industry”, Archives of Civil and Mechanical Engineering, v.8(2), pp. 103–117, 2008.
- [13] www.autosteel.org, Erişim Tarihi: 29.01.2015.
- [14] BHAT, S.P., Advances In High Strength Steels for Automotive Applications, Great Design in Steel Seminar, 2008.
- [15] CHEN, W., YANG, J.-C., LIN, Z.-Q., Application of integrated formability analysis in designing die-face of automobile panel drawing dies, Journal of Materials Processing Technology, 121(2–3):293–300, 2002.
- [16] YUE, Z.M., BADREDDINE, H., DANG, T., SAANOUNI, K., TEKKAYA, A.E., Formability prediction of AL7020 with experimental and numerical failure criteria, Journal of Materials Processing Technology, 218:80–88, 2015.
- [17] ISIK, K., SILVA, M.B., TEKKAYA, A.E., MARTINS, P.A.F., Formability limits by fracture in sheet metal forming, Journal of Materials Processing Technology, 214(8):1557–1565, 2014.
- [19] GOUD, R. R., PRASAD, K. E., SINGH, S. K., Formability Limit Diagrams of Extra-deep-drawing Steel at Elevated Temperatures, Procedia Materials Science, 6:123–128, 2014.
- [19] BRUSCHI, S., ALTAN, T., BANABIC, D., BARIANI, P.F., BROSIUS, A., CAO, J., GHIOTTI, A., KHRAISHEH, M., MERKLEIN, M., TEKKAYA, A.E., Testing and modelling of material behaviour and formability in sheet metal forming, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 63(2):727–749, 2014.
- [20] NARANJE, V., KUMAR, S., A knowledge based system for automated design of deep drawing die for axisymmetric parts, Expert Systems with Applications, 41(4):1419–1431, 2014.
- [21] KUMAR, S., SINGH, R., An automated design system for progressive die, Expert Systems with Applications, 38(4):4482–4489, 2011.
- [22] SAMUEL, M., Experimental and numerical prediction of springback and side wall curl in U-bendings of anisotropic sheet metals, Journal of Materials Processing Technology, 105:382–393, 2000.
- [23] INAMDAR, M. V., DATE, P. P., SABNIS, S. V., On the effects of geometric parameters on springback in sheets of five materials subjected to air vee vending, Journal of Materials Processing Technology, 123: 459–463, 2002.

- [24] TEKARSLAN, O., SEKER, U., OZDEMIR, A., Determining springback amount of steel sheet metal has 0.5 mm thickness in bending dies, *Materials and Design*, 27:251–258, 2006.
- [25] TEKASLAN, O., GERGER, N., SEKER, U., Determination of springback of stainless steel sheet metal in “V” bending dies, *Materials and Design*, 29:1043–1050, 2008.
- [26] OZTURK, F., TOROS, S., KILIC, S., Tensile and Spring-Back behavior of DP600 advanced high strength steel at warm temperatures, *Journal of Iron and Steel Research International*, 16(6):41-46, 2009.
- [27] HAN, X., SHI-HONG, Z., RONG, Z., DE-HONG, L., Springback characteristics of AZ31 magnesium alloy as-extruded profile in warm tension-rotation bending process, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 22:416–421, 2012.
- [28] WANG, L., HUANG, G., ZHANGA, H., WANGA, Y., YIN, L., Evolution of springback and neutral layer of AZ31B magnesium alloy V-bending under warm forming conditions, *Journal of Materials Processing Technology*, 213:844– 850, 2013.
- [29] DESOUZA, T., ROLFE, B.F., Understanding robustness of springback in high strength steels, *International Journal of Mechanical Sciences*, 68:236–245, 2013.
- [30] FIRAT, M., Computer aided analysis and design of sheet metal forming processes: Part I – The finite element modeling concepts, *Materials and Design*, 28:1298–1303, 2007.
- [31] BANABIC, D., *Sheet Metal Forming Processes - Constitutive Modelling and Numerical Simulation*, Springer, Heidelberg, 2010.
- [32] BELYTSCHKO, T., LIU, WK., MORAN, B., *Nonlinear Finite Elements for continua and Structures*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 2000.
- [33] BATHE, KJ., RAMM, E., WILSON, EL., Finite element formulations for large deformation dynamic analysis, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 9:353–386, 1975.
- [34] WANG, N-M., BUDIANSKY, B., Analysis of sheet metal stamping by finite element method, *Journal of Applied Mechanics*, Transaction ASME, 45:73–82, 1978.
- [35] HONECKER, A., MATTIASSON, K., Finite element procedures for 3D sheet forming simulation, In: Thompson EG, Wood RD, Zienkiewicz OC, Samuelsson A (eds) *NUMIFORM’89*, AA Balkema, Fort Collins, 1989.

- [36] CETIN, M.S., Derin çekme ile soğuk şekillendirmenin sonlu elemanlar metodu yardımıyla analizi, Yüksek Lisans Tezi, T. Ü. Fen bilimleri enstitüsü, Edirne, 2007.
- [37] KILIC, S., DP600 Çeliğinin Geri Esneme Davranışının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde, 2009.
- [38] PRIOR, A.M., Applications of Implicit and Explicit Finite Element Techniques to Metal Forming, *J. Mater. Process. Technol.* 45:649-656, 1994.
- [39] FINN, M.J., GALBRAITH, P.C., WU, L., HALLQUIST, J.O., LUM, L., LIN, T.-L., Use of a coupled explicit—implicit solver for calculating spring-back in automotive body panels, *Journal of Materials Processing Technology*, 50:395-409, 1995.
- [40] NARASIMHAN, N., LOVELL, M., Predicting springback in sheet metal forming: an explicit to implicit sequential solution procedure, *Finite Elements in Analysis and Design*, 33:29-42, 1999.
- [41] FIRAT M., U-channel forming analysis with an emphasis on springback deformations, *Materials & Design*, 28:147-154, 2007.
- [42] METE, O.H., Sac Levhaların Şekillendirilebilirliğine Etki Eden Değişkenliklerin İncelenmesi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2007.
- [43] ROLL K., TEKKAYA AE., Numerische Verfahren der Procebsimulation in der Umformtechnik. In: Lange K, editor. Umformtechnik, Handbuch fuer Industrie und Wissenschaft, Band 4. Berlin: Springer-Verlag; 1993.
- [44] BELYTSCHKO, T., LIU, WK., MORAN, B., Non-linear finite elements for continua and structures. New York: Wiley; 2000.
- [45] SIMO, JC., HUGHES, TJR., Computational inelasticity. New York: Springer-Verlag; 1998.
- [46] BATHE, KJ., Finite element procedures in engineering analysis. NJ: Prince-Hall; 1982.
- [47] Ls-Dyna Theoretical Manual, Livermore Software Technology Corporation, 1998.
- [48] MENDELSON, ALEXANDER, Plasticity: Theory and Application, Krieger Publishing, Florida, 1983, originally published by Macmillan, 1968.

- [49] BRIDGMAN, P.W., The Effect of Hydrostatic Pressure on the Fracture of Brittle Substances, *Journal of Applied Physics*, 18:246 1947.
- [50] TRESCA, H., On the yield of solids at high pressures (Fransızca), *Comptes Rendus Academie des Sciences, Paris* 59, pp.754, 1864.
- [51] MISES, R., Mechanics of solids in plastic state (Almanca), *Göttinger Nachrichten Math. Phys. Klasse*, p.582, 1913.
- [52] ALLEN, P.A., PhD Thesis, Hydrostatic Stress Effects on Low Cycle Fatigue, Tennessee Technological University, 2002.
- [53] HOSFORD, W., On the theory of plastic deformations (Almanca), *Z. Ang. Math. Mech.*, pp. 323-334, 1924.
- [54] BANABIC, D., BUNGE, H.-J., POHLANDT, K., TEKKAYA, A.E., *Formability of Metallic Materials*, Springer, Heidelberg, 2000.
- [55] HILL, R., A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals, *Proc. Roy. Soc. London*, pp.281-297, 1948.
- [56] BARLAT, F., LIAN, J., Plastic behaviour and stretchability of sheet metals (Part I): A yield function for orthotropic sheet under plane stress conditions, *International Journal of Plasticity*, 5:51–56, 1989.
- [57] BARLAT, F., RICHMOND, O. , Prediction of tricomponent plane stress yield surfaces and associated flow and failure behaviour of strongly textured FCC polycrystalline sheets, *Materials Science and Engineering*, 91:15–29, 1987.
- [58] LEMAITRE, J., CHABOCHE, JL., *Mechanics of solid materials*, Cambridge University Press, Cambridge, 1990.
- [59] YOSHIDA, F., UEMORI, T., A model of large-strain cyclic plasticity describing the Baushinger effect and workhardening stagnation, *Int. J. Plasticity*, 18:661-689, 2002.
- [60] SHI, M.F., ZHU, X., XIA, C., STOUGHTON, T., Determination of Nonlinear Isotropic/Kinematic Hardening Constitutive Parameters For AHSS Using Tension and Compression Tests, *Numisheet*, Interlaken, Switzerland, September 1 - 5, 2008.
- [61] ASTM Standarts, “Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials”, 2001.
- [62] LUDWIK, P., *Elemente der Technologischen Mechanik* (Almanca), Springer-Verlag, Berlin, 1909.

- [63] HOLLOMAN, J. H., Tensile Deformation, Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, 162:268-290, 1945.
- [64] KRUPKOWSKI, A., The Deformation of Plastic Metals by Strain (Copper and Nickel), Annales de L'Academie Polonaise Scientifique et Technique, 7:113-120, 1945.
- [65] SWIFT, H.W., Plastic Instability Under Plane Stres, Journal of the Mechnaics and Physics of Solids, 1:1-18, 1952.
- [66] VOCE, E., The Relationship Between Stres and Strain for Homogeneous Deformation, Journal of the Institute of Metals, 74:537-562, 1948.
- [67] LIVATYALI, H., ALTAN, T., Prediction and elimination of springback in straight flanging using computer aided design methods Part 1. Experimental investigations, Journal of Materials Processing Technology, 117:262-268, 2001.
- [68] MKADDEM, A., SAIDANE, D., Experimental approach and RSM procedure on the examination of springback in wiping-die bending processes, Journal of Materials Processing Technology, 189:325-333, 2007.
- [69] GAU, J. T., PhD Thesis, A study of the influence of the bauschinger effect on springback in two-dimensional sheet metal forming, The Ohio State University, Columbus, OHIO, 1999.
- [70] MOON, Y.H., KANG, S.S., CHO, J.R., KIM, T.G., Effect of tool temperature on the reduction of the springback of aluminum sheets, Journal of Materials Processing Technology, 132: 365–368, 2003.
- [71] PALANISWAMY, H., NGAILE, G., ALTAN, T., Optimization of blank dimensions to reduce springback in the flexforming process, Journal of Materials Processing Technology, 146:28–34, 2004.
- [72] NACEUR, H., GUO, Y.Q., BEN-ELECHI, S., Response surface methodology for design of sheet forming parameters to control springback effects, Computers and Structures, 84:1651-663, 2006.
- [73] FIRAT, M., KAFTANOGLU, B., ESER, O., Sheet metal forming analyses with an emphasis on the springback deformation, Journal of materials processing technology, 196:135–148, 2008.
- [74] LEU, D.-K., HSIEH, C.-M., The influence of coining force on spring-back reduction in V-die bending process, Journal of materials processing technology, 196:230–235, 2008.

- [75] INGARAO, G., DI LORENZO, R., MICARI, F., Analysis of stamping performances of dual phase steels: A multi-objective approach to reduce springback and thinning failure, *Materials and Design*, 30:4421–4433, 2009.
- [76] DESOUZA, T., ROLFE, B.F., Characterising material and process variation effects on springback robustness for a semi-cylindrical sheet metal forming process, *International Journal of Mechanical Sciences*, 52:1756–1766, 2010.
- [77] MARRETTA, L., INGARAO, G., DILORENZO, R., Design of sheet stamping operations to control springback and thinning: A multi-objective stochastic optimization approach, *International Journal of Mechanical Sciences*, 52:914–927, 2010.
- [78] GREEZE, R., MANACH, P.Y., LAURENT, H., THUILLIER, S., MENEZES, L.F., Influence of the temperature on residual stresses and springback effect in an aluminium alloy, *International Journal of Mechanical Sciences*, 52:1094–1100, 2010.
- [79] FIRAT, M., METE, O.H., KOCABICAK, U., OZSOY, M., Stamping process design using FEA in conjunction with orthogonal regression, *Finite Elements in Analysis and Design*, 46:992–1000, 2010.
- [80] CHEN, W., MSc Thesis, Investigation of Friction Modelling and Elastic Tooling influences on the Springback Behaviour in Sheet Metal Forming Analysis, University West, Sweden, 2011.
- [81] THIPPRAKMAS, S., PHANITWONG, W., Process parameter design of spring-back and spring-go in V-bending process using Taguchi technique, *Materials and Design*, 32:4430–4436, 2011.
- [82] ZHU, Y.-X., LIU, Y.-L., YANG, H., Sensitivity of springback and section deformation to process parameters in rotary draw bending of thin-walled rectangular H96 brass tube, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 22:2233–2240, 2012.
- [83] TANG, L., WANG, H., LI, G., Advanced high strength steel springback optimization by projection-based heuristic global search algorithm, *Materials and Design*, 43:426–437, 2013.
- [84] BASHAH, N.A.K., MUHAMAD, N., DEROS, B.M., ZAKARIA, A., ASHARI, S., MOBIN, A., LAZAT, M.S.M.A., Multi-regression modeling for springback effect on automotive body in white stamped parts, *Materials and Design*, 46:175–190, 2013.

- [85] WEI, L., YUYING, Y., ZHONGWEN, X., LIHONG, Z., Springback control of sheet metal forming based on the response-surface method and multi-objective genetic algorithm, *Materials Science and Engineering A*, 499:325–328, 2009.
- [86] TURA, S.E., Y. Lisans Tezi, Düz Kenar Bükme ve Döner Kalıpla Kenar Bükme İşlemlerinin Geri Yaylanma Üzerine Etkilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi, İTÜ, 2009.
- [87] KIM, H.S., KOC, M., Numerical investigations on springback characteristics of aluminum sheet metal alloys in warm forming conditions, *Journal of Materials Processing Technology*, 204:370-383, 2008.
- [88] BRUNI, C., CELEGHINI, M., GEIGER, M., GABRIELLI, F., A study of techniques in the evaluation of springback and residual stress in hydroforming, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer-Verlag, 33:929-939, 2007.
- [89] LIVATYALI H., FIRAT, M., GURLER, B., OZSOY, M., An Experimental Analysis of Drawing Characteristics of a Dual-Phase Steel through a Round Drawbead, *Materials & Design*, 31(3):1639-1643, 2010.
- [90] TING, D., YUQI, L., ZHIBING, Z., ZHIGANG, L., Fast FE analysis system for sheet metal stamping—FASTAMP, *Journal of Materials Processing Technology*, 187-188:402–406, 2007.
- [91] THOMAS, W., OENOKI, T., ALTAN, T., Process simulation in stamping – recent applications for product and process design, *Journal of Materials Processing Technology*, 98(2):232–243, 2000.
- [92] XIA, ZC., Springback compensation technology for aluminum stamping, NADDRG Spring Meeting. Columbus, Ohio, May 9, 2001.
- [93] KARAFILLIS, AP., BOYCE, MC., Tooling and binder design for sheet metal forming processes compensating springback error, *International Journal of Machine Tools & Manufacturing*, 36:503–26, 1996.
- [94] KARAFILLIS, AP., BOYCE, MC., Tooling design accommodating springback errors, *Journal of Materials Processing Technology*, 32:499–508, 1992.
- [95] ANGGONO, A.D., SISWANTO, W.A., OMAR, B., Algorithm development and application of spring back compensation for sheet metal forming, *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 4(14):2036-2045, 2012.

- [96] WU, L., DU, C., ZHANG, L., Iterative FEM die surface design to compensate for springback in sheet metal stampings, In: Proceedings of NUMIFORM '95. Ithaca, New York, NY; p. 637–41, June 1995.
- [97] WU L., Generate tooling mesh by FEM virtual forming model for springback compensation in die surface design of sheet metal stamping, SAE Transactions: Journal of Materials & Manufacturing (USA), 105:643–9, 1996.
- [98] WU L., Tooling mesh generation technique for iterative FEM die surface design algorithm to compensate for springback in sheet metal stamping, Engineering Computations 14:630–48, 1997.
- [99] GAN, W., WAGONER, R.H., Die design method for sheet springback, International Journal of Mechanical Sciences, 46:1097–1113, 2004.
- [100] MEINDERS, T., BURCHITZ, I.A., BONTE, M.H.A., LINGBEEK, R.A., Numerical product design: Springback prediction, compensation and optimization, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 48:499–514, 2008.
- [101] LINGBEEK, R., HUETINK, J., OHNIMUS, S., PETZOLDT, M., WEIHER, J., The Development of A Finite Elements Based Springback Compensation Tool for Sheet Metal Products, Journal of Materials Processing Technology, 169:115-125, 2005.
- [102] LINGBEEK, R., MEINDERS, T., OHNIMUS, S., PETZOLDT, M., WEIHER, J., Springback Compensation: Fundamental Topics and Practical Application, 9th ESAFORM Conference on Material Forming, Glasgow, UK, 2006.
- [103] LAN, F., CHEN, J., LIN, J., A method of constructing smooth tool surfaces for FE prediction of springback in sheet metal forming, Journal of Materials Processing Technology, 177:382–385, 2006.
- [104] CHENGA, H.S., CAO, J., XIA, Z.C., An accelerated springback compensation method, International Journal of Mechanical Sciences, 49:267–279, 2007.
- [105] YANG, X.A., RUAN, F., A die design method for springback compensation based on displacement adjustment, International Journal of Mechanical Sciences, 53:399–406, 2011.
- [106] CAFUTA, G., MOLE, N., ŠTOK, B., An enhanced displacement adjustment method: Springback and thinning compensation, Materials and Design, 40:476–487, 2012.

- [107] SHEN, H., LI, S., NI, X., CHEN, G., A modified displacement adjustment method to compensate for surface deflections in the automobile exterior panels, *Journal of Materials Processing Technology*, 213:1943–1953, 2013.
- [108] MOLE, N., CAFUTA, G., ŠTOK, B., A 3D forming tool optimisation method considering springback and thinning compensation, *Journal of Materials Processing Technology*, 214:1673–1685, 2014.
- [109] <http://www.motorburn.com>, Erişim Tarihi: 22.02.2015.
- [110] WEINERT, K., Möglichkeiten zur Produktivitätssteigerungen bei der Bearbeitung von Freiformflächen, (Almanca), *Innovative Techniken im Werkzeug- und Formen- und Modelbau*, Conf. Proceedings, Dortmund, Germany, pp.3-20, 1996.
- [111] SAVIO, E., DE CHIFFRE, L., SCHMITT, R., Metrology of freeform shaped parts, *Annals of the CIRP*, 56:810-835, 2007.
- [112] FIRAT, M., KAFTANOGLU, B., ESER, O., Sheet metal forming analyses with an emphasis on the springback deformation, *Journal of materials processing technology*, 196:135–148, 2008.
- [113] LI, Y., GU, P., Free-form surface inspection techniques state of the art review, *Computer-Aided Design*, 36:1395–1417, 2004.
- [114] www.ilt.fraunhofer.de, Erişim Tarihi: 02.12.2014.
- [115] BOZKURT, E.S., Tersine Mühendislik Süreci ve Uygulamaları, *Mühendis ve Makina*, 50/597: 35-42, 2009.
- [116] www.gom.com, Erişim Tarihi: 20.02.2015.
- [117] <http://tr.wikipedia.org/wiki/ASCII>, Erişim Tarihi: 14.03.2015.
- [118] KAYIR, Y., GULESIN, M., 3 Boyutlu Prizmatik Parça Modellerinin Yorumlanmasında Iges Dosyalarının Özel Bir Formata Dönüştürülmesi, *Teknoloji*, 8(2):123-137, 2005.
- [119] www.catia.com, Erişim Tarihi: 15.02.2015.
- [120] INGARAO, G., DI LORENZO, R., MICARI, F., Analysis of stamping performances of dual phase steels: A multi-objective approach to reduce springback and thinning failure, *Materials and Design*, 30:4421–4433, 2009.

- [121] INGARAO, G., DI LORENZO, R., A new progressive design methodology for complex sheet metal stamping operations: Coupling spatially differentiated restraining forces approach and multi-objective optimization, *Computers and Structures*, 88:625–638, 2010.
- [122] ANDERSSON, A., Numerical and experimental evaluation of springback in a front side member, *Journal of Materials Processing Technology*, 169:352–356, 2005.
- [123] MIZUNO, Y., SUGIYAMA, H., Sliding and nonsliding joint constraints of b-spline plate elements for integration with flexible multibody dynamics simulation”, *J. Comput. Nonlinear Dynam.*, 9(1):1-11, 2013.
- [124] ASGARI, S.A., PEREIRA, M., ROLFE, B.F., DINGLE, M., HODGSON, P.D., Statistical analysis of finite element modeling in sheet metal forming and springback analysis, *Journal of materials processing technology*, 203:129–136, 2008.
- [125] TANG, L., WANG, H., LI, G., Advanced high strength steel springback optimization by projection-based heuristic global search algorithm, *Materials and Design*, 43:426–437, 2013.
- [126] PENG, X., SHI, S., HU, K., Comparison of material models for spring back prediction in an automotive panel using finite element method, *JMEPEG*, 22(10):2990–2996, 2013.
- [127] GAU, J.T., KINZEL, G.L., A new model for springback prediction in which the Bauschinger effect is considered, *International Journal of Mechanical Sciences*, 43:1813–1832, 2001.
- [128] TAHERIZADEH, A., GHAEI, A., GREEN, D.E., ALTENHOF, W.J., Finite element simulation of springback for a channel draw process with drawbead using different hardening models, *International Journal of Mechanical Sciences*, 51:314–325, 2009.
- [129] PENG, X., SHI, S., HU, K., Comparison of material models for spring back prediction in an automotive panel using finite element method, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 22(10):2290-2296, 2013.
- [130] CHONGTHAIRUNGRUANG, B., UTHAISANGSUK, V., SURANUNTCHAI, S., JIRATHEARANAT, S., Springback prediction in sheet metal forming of high strength steels, *Materials and Design*, 50:253–266, 2013.
- [131] LI, K.P., CARDEN, W.P., WAGONER, R.H., Simulation of springback, *International Journal of Mechanical Sciences*, 44:103–122, 2002.

- [132] MULLAN, H.B., Improved prediction of springback on final formed components, *Journal of Materials Processing Technology*, 153–154:464–471, 2004.
- [133] LING, Y.E., LEE, H.P., CHEOK, B.T., Finite element analysis of springback in L-bending of sheet metal, *Journal of Materials Processing Technology*, 168:296–302, 2005.
- [134] ANDERSSON, A., Numerical and experimental evaluation of springback in a front side member, *Journal of Materials Processing Technology*, 169:352–356, 2005.
- [135] BAHLOUL, R., BEN-ELECHI, S., POTIRON, A., Optimisation of springback predicted by experimental and numerical approach by using response surface methodology, *Journal of Materials Processing Technology*, 173:101–110, 2006.
- [136] BANU, M., TAKAMURA, M., HAMA, T., NAIDIM, O., TEODOSIU, C., MAKINOUCI, A., Simulation of springback and wrinkling in stamping of a dual phase steel rail-shaped part, *Journal of Materials Processing Technology*, 173:178–184, 2006.
- [137] MKADDEM, A., SAIDANE, D., Experimental approach and RSM procedure on the examination of springback in wiping-die bending processes, *Journal of Materials Processing Technology*, 189:325–333, 2007.
- [138] CHEN, P., KOC, M., Simulation of springback variation in forming of advanced high strength steels, *Journal of Materials Processing Technology*, 190:189–198, 2007.
- [139] LIU, W., LIU, Q., RUAN, F., LIANG, Z., QIU, H., Springback prediction for sheet metal forming based on GA-ANN technology, *Journal of Materials Processing Technology*, 187–188:227–231, 2007.
- [140] KIM, H.S., KOC, M., Numerical investigations on springback characteristics of aluminum sheet metal alloys in warm forming conditions, *Journal of materials processing technology*, 204:370–383, 2008.
- [141] FIRAT, M., “U-channel forming analysis with an emphasis on springback deformation”, *Materials and Design*, 28:147–154, 2007.
- [142] EGGERTSEN, P.-A., MATTIASSON, K., On the modelling of the bending–unbending behaviour for accurate springback predictions, *International Journal of Mechanical Sciences*, 51:547–563, 2009.

- [143] KOZAN, R., FIRAT, M., EGRISOGUT TIRYAKI, A., Prediction of springback in wipe-bending process of sheet metal using neural network, *Materials and Design*, 30:418–423, 2009.
- [144] VELMANIRAJAN, K., SYED ABU THAHEER, A., NARAYANASAMY, R., AHAMED BASHA, C., Numerical modelling of aluminium sheets formability using response surface methodology, *Materials and Design*, 41:239–254, 2012.
- [145] SONG, Y., YU, Z., Springback prediction in T-section beam bending process using neural networks and finite element method, *Archives of civil and mechanical engineering*, 13:229–241, 2013.
- [146] LI, G.Y., TAN, M.J., LIEW, K.M., Springback analysis for sheet forming processes by explicit finite element method in conjunction with the orthogonal regression analysis, *International Journal of Solids and Structures*, 25:4653-4668, 1999.
- [147] INAMDAR, M.V., DATE, P.P., DESAI, U.B., Studies on the prediction of springback in air vee bending of metallic sheets using an artificial neural network, *Journal of Materials Processing Technology*, 108:45-54, 2000.
- [148] PAPELEUX, L., PONTHOT, J. P., Finite element simulation of springback in sheet metal forming, *Journal of Materials Processing Technology*, 125–126:785–791, 2002.
- [149] XU, W.L., MA, C.H., LI, C.H., FENG, W.J., Sensitive factors in springback simulation for sheet metal forming, *Journal of Materials Processing Technology*, 151:217–222, 2004.
- [150] DEAN, A., VOSS, D., *Design and analysis of experiments*, Springer, pp:1, 1999.
- [151] MONTGOMERY, D.C., *Design and analysis of experiments*, John Wiley & Sons Inc., 5th Edition, pp: 2-8, 2001.
- [152] BEKAR, D., Y.Lisans Tezi, Çift fazlı çeliklerde şekil verme operasyonları sonucunda oluşan geri yaylanmanın gürbüz optimizasyonu, TOBB Ekonomi Ve Teknoloji Üniversitesi, Ankara, 2011.
- [153] SAVIO, E., DE CHIFFRE, L., SCHMITT, R., Metrology of freeform shaped parts, *Annals of the CIRP*, 56:810-835, 2007.
- [154] KARAFILLIS, AP., PhD Thesis, Tooling design for three-dimensional sheet metal forming using finite element analysis, Massachusetts Institute of Technology, USA, 1994.
- [155] NURCHESHMEH, M., PhD Thesis, Numerical prediction of sheet metal forming limits, University of Windsor, Canada, 2011.

- [156] MMO, 11. Otomotiv Sempozyumu, “Kalıplılık ve Tasarım”, Bursa, Türkiye, 2009.
- [157] <http://automotive.arcelormittal.com/europe/products/AHSS/DP/EN>, Erişim Tarihi: 30.03.2015.
- [158] LINKBEEK, R. A., GAN, W., WAGONER, R.H., MEINDERS, T., WEIHER, J., Theoretical verification of the displacement adjustment and springforward algorithms for springback compensation, International Journal of Material Forming, 1:159-168, 2008.

EKLER

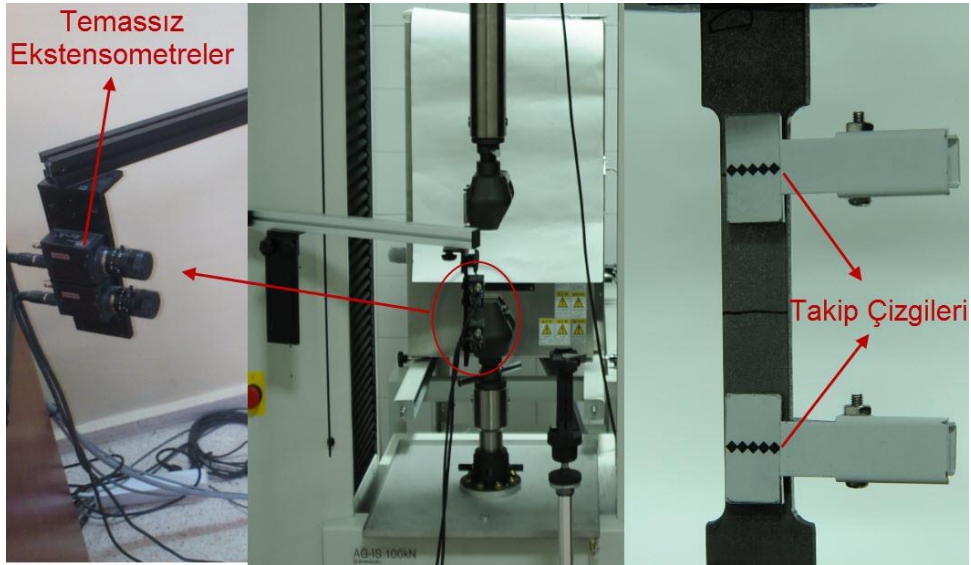
EK A: Tez Çalışması Kapsamında Kullanılan Test Cihazları



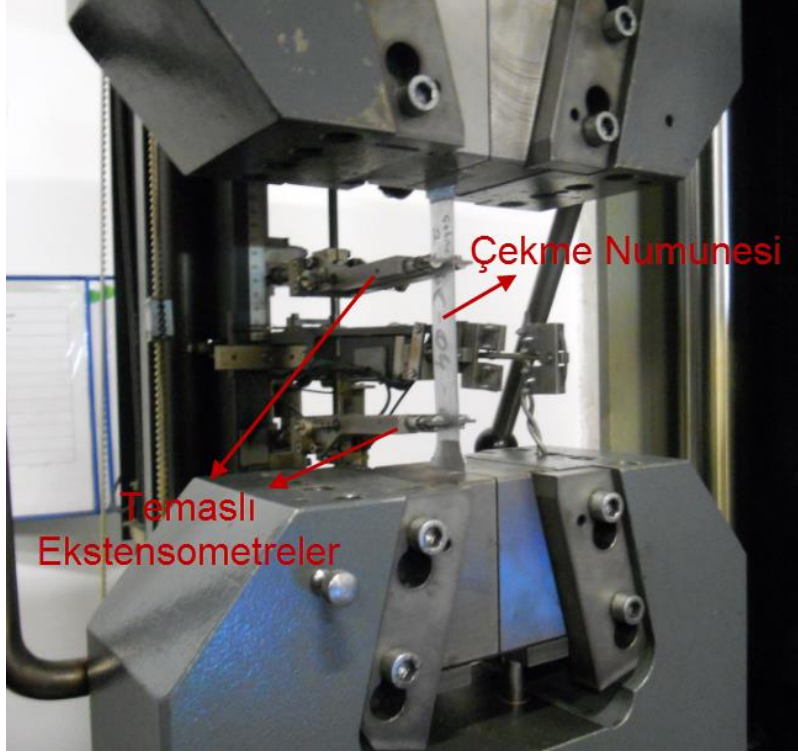
Şekil A.1. Shimadzu çekme deney cihazı



Şekil A.2. Çekme deney cihazı yük hücresi



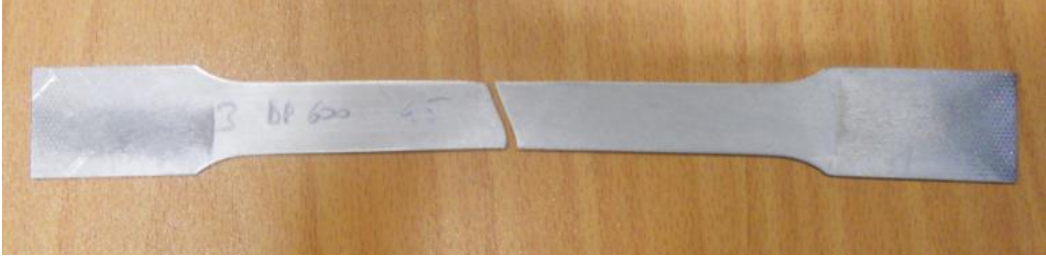
Şekil A.3. Çekme deney cihazı temassız ekstensometreler



Şekil A.4. Zwick çekme deney cihazı temaslı ekstensometreler



Şekil A.5. Çekme deney numuneleri



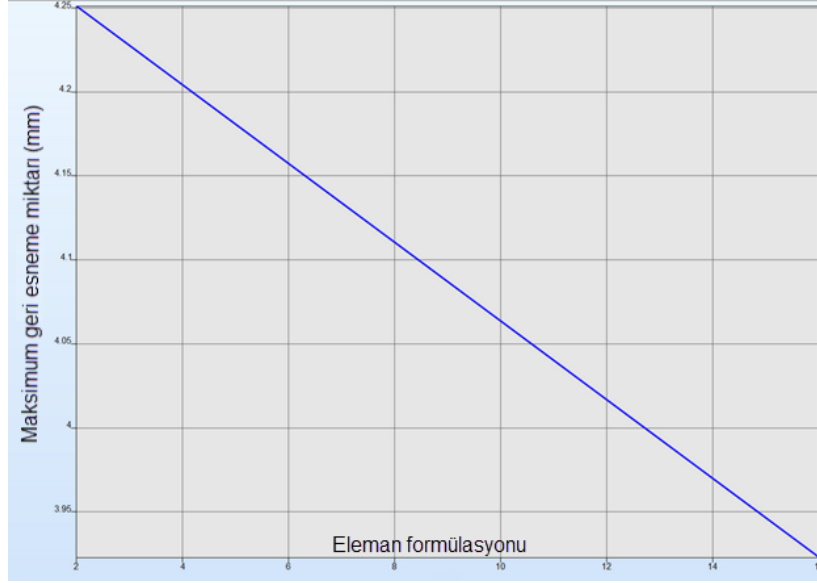
Şekil A.6. Çekme deneyi sonrası test numunesi



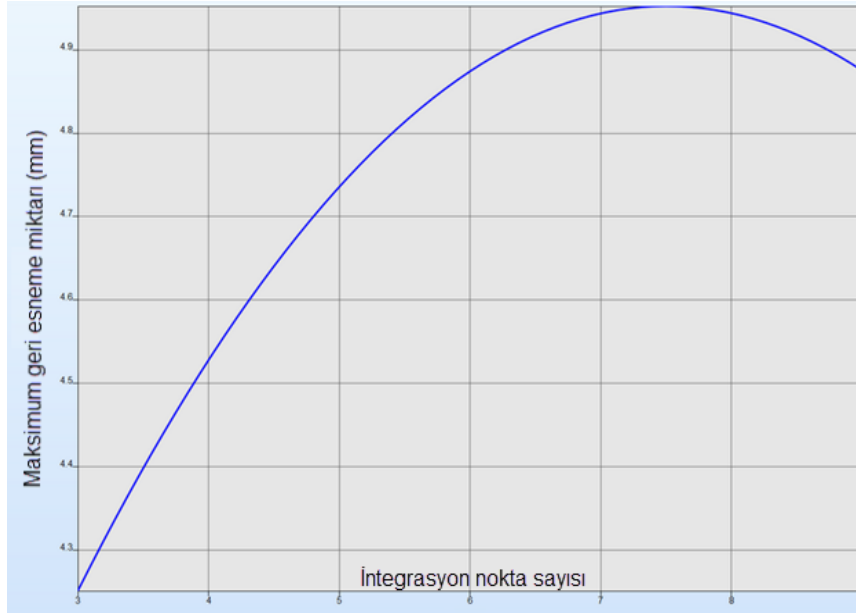
Şekil A.7. GOM Atos tarama sistemi

EK B: Uygulama Örnekleri İçin Deneysel Tasarım Analizi Sonucu Elde Edilen Yanıt Yüzeyleri

Açılı Kanal Çekme İşlemi Sonlu Elemanlar Parametreleri Deneysel Tasarım Yanıt Yüzeyleri

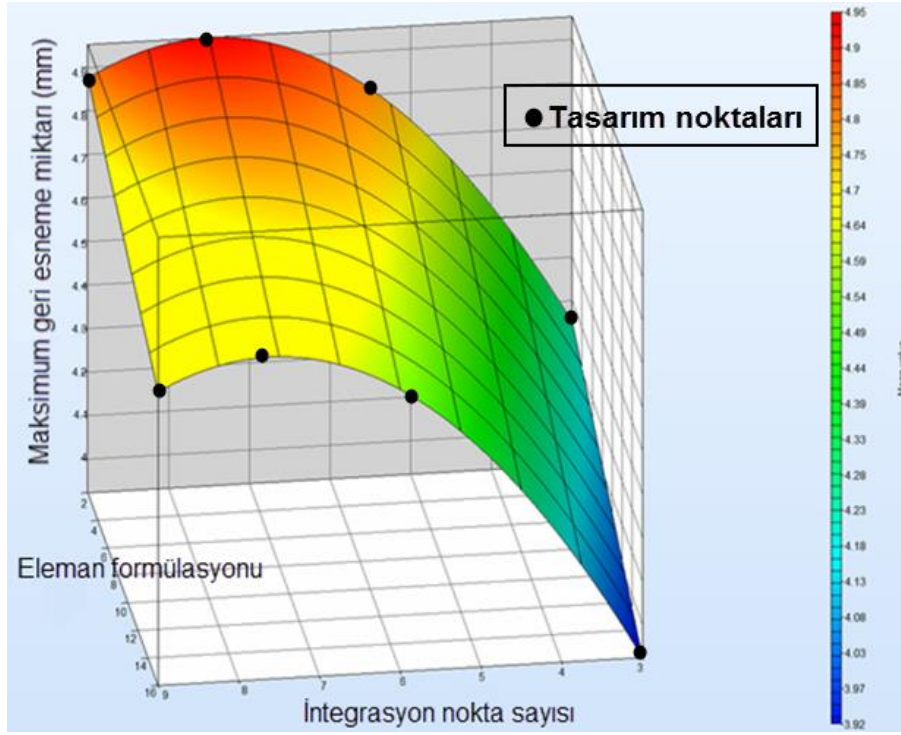


(a)



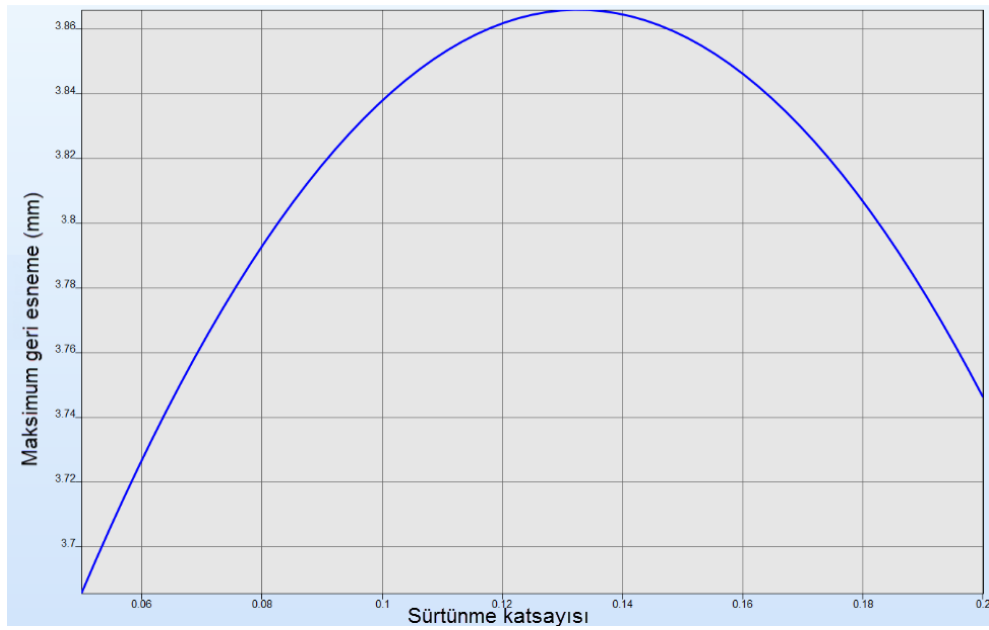
(b)

Şekil B.1. Açılı kanal çekme işlemi deneysel tasarım sonrasında (a) Eleman formülasyonuna göre (b) İntegrasyon nokta sayısına göre elde edilen yanıt yüzeyleri

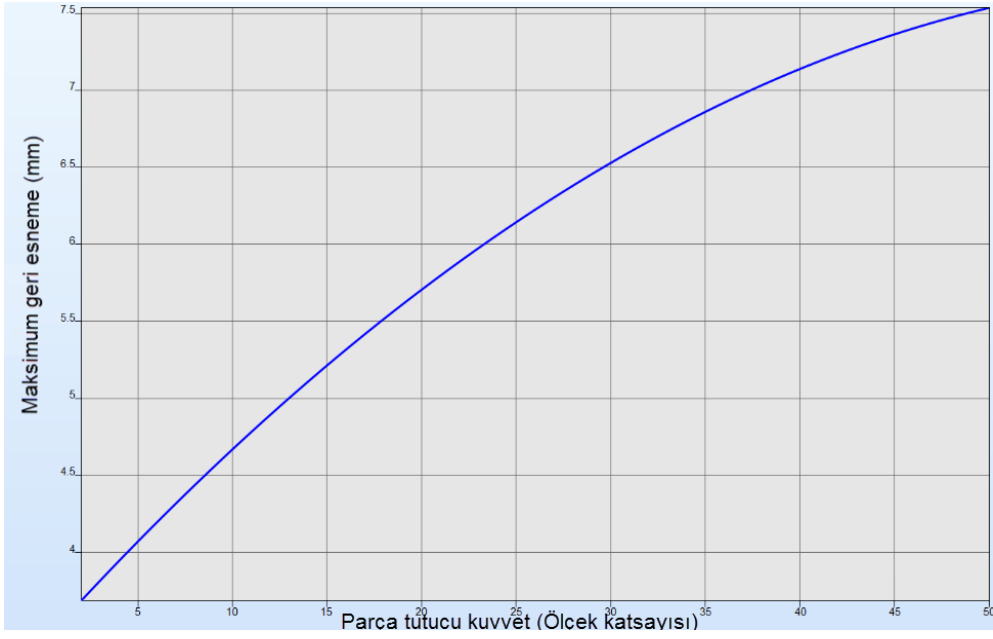


Şekil B.2. Açılı kanal çekme işlemi deneysel tasarım sonrasında elde edilen 3 boyutlu yanıt yüzeyi

Açılı Kanal Çekme İşlemi Proses Parametreleri Deneysel Tasarım Yanıt Yüzeyleri

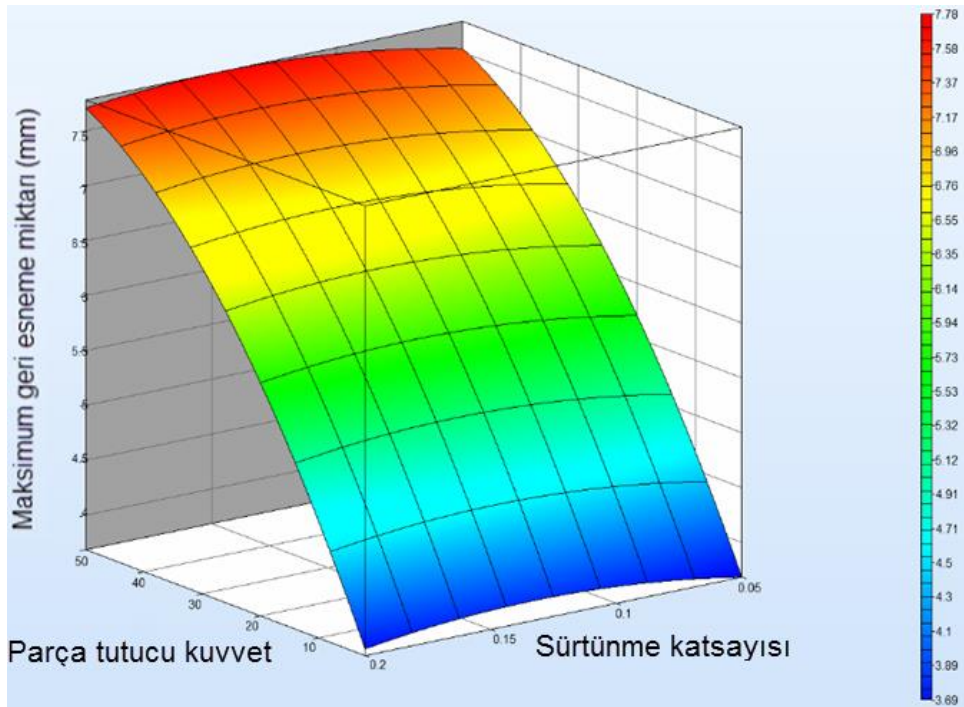


(a)



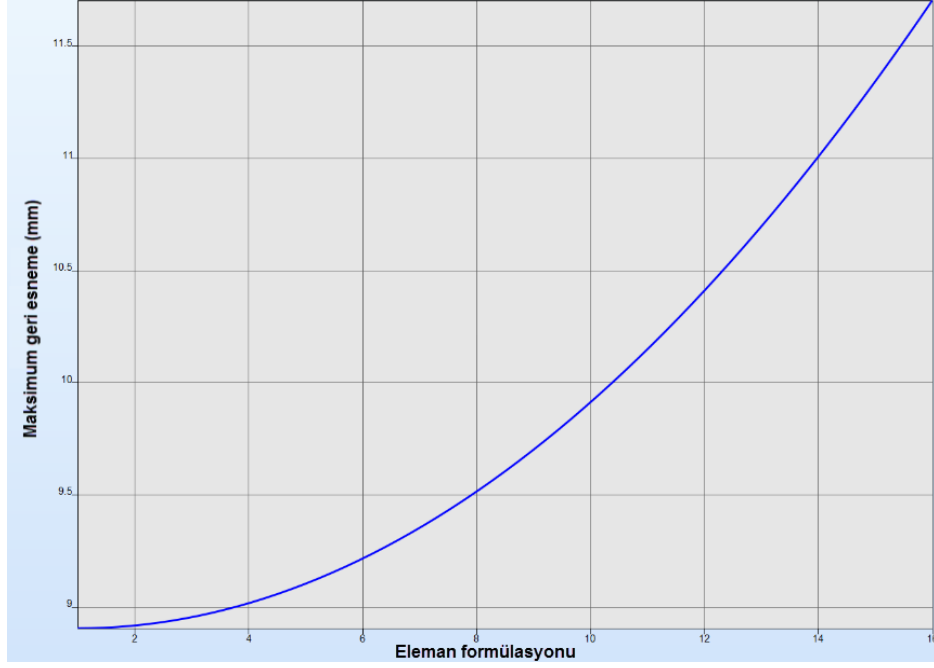
(b)

Şekil B.3. Açılı kanal çekme işlemi deneysel tasarımı sonrasında (a) Sürtünme katsayısına göre (b) Parça tutucu kuvvete göre elde edilen yanıt yüzeyleri

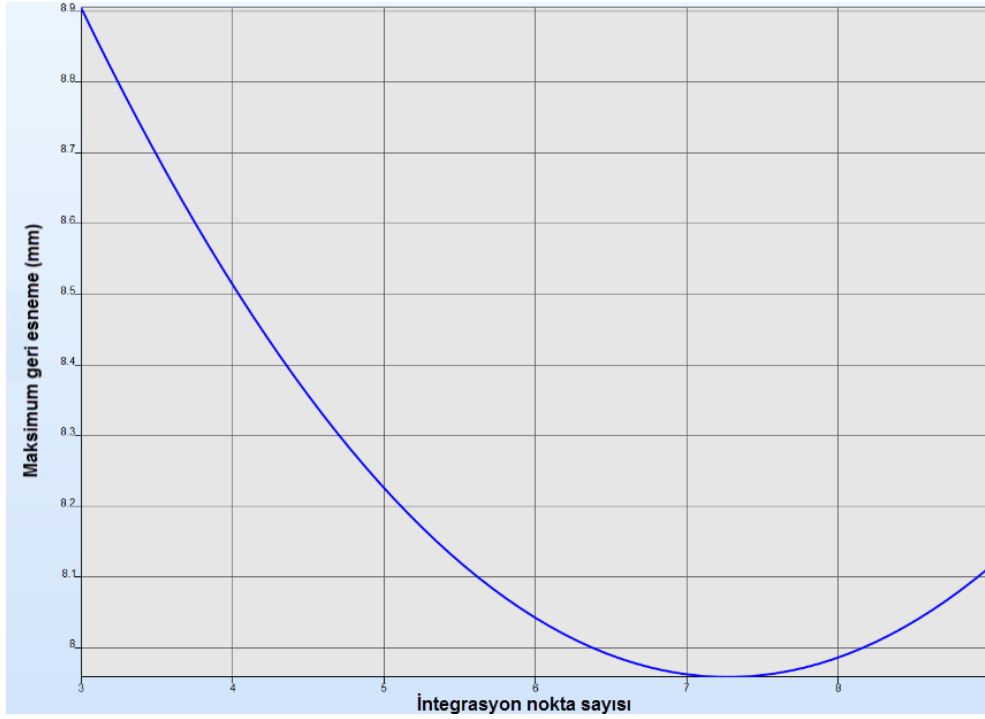


Şekil B.4. Açılı kanal çekme işlemi proses parametreleri ile elde edilen 3 boyutlu yanıt yüzeyi

Tavan Destek Sacı Formlama İşlemi Sonlu Elemanlar Parametreleri Deneysel Tasarım Yanıt Yüzeyleri

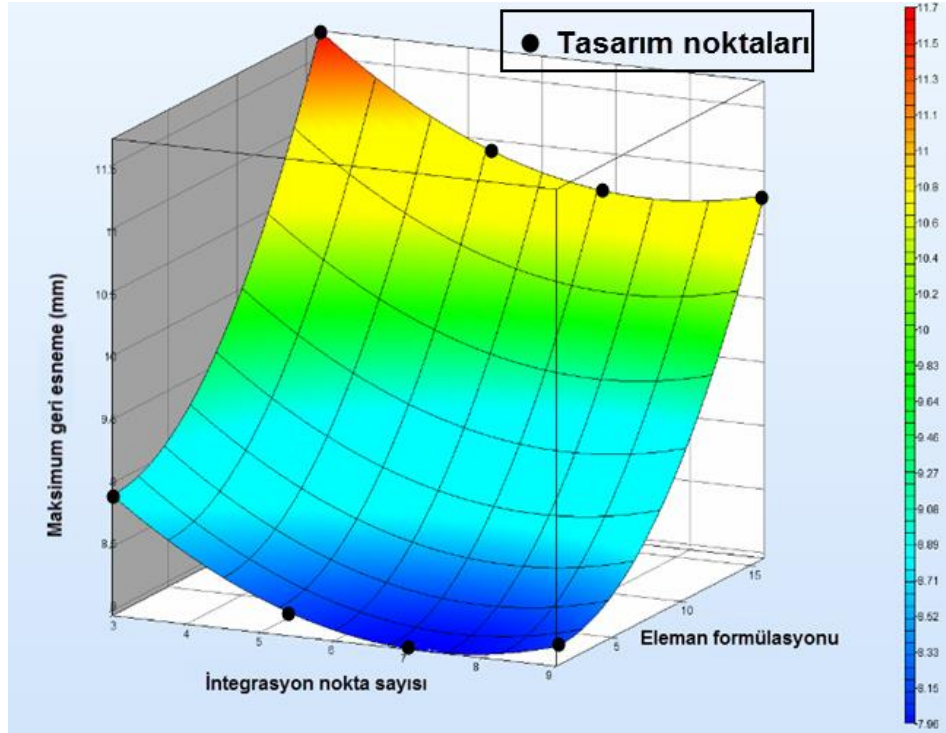


(a)

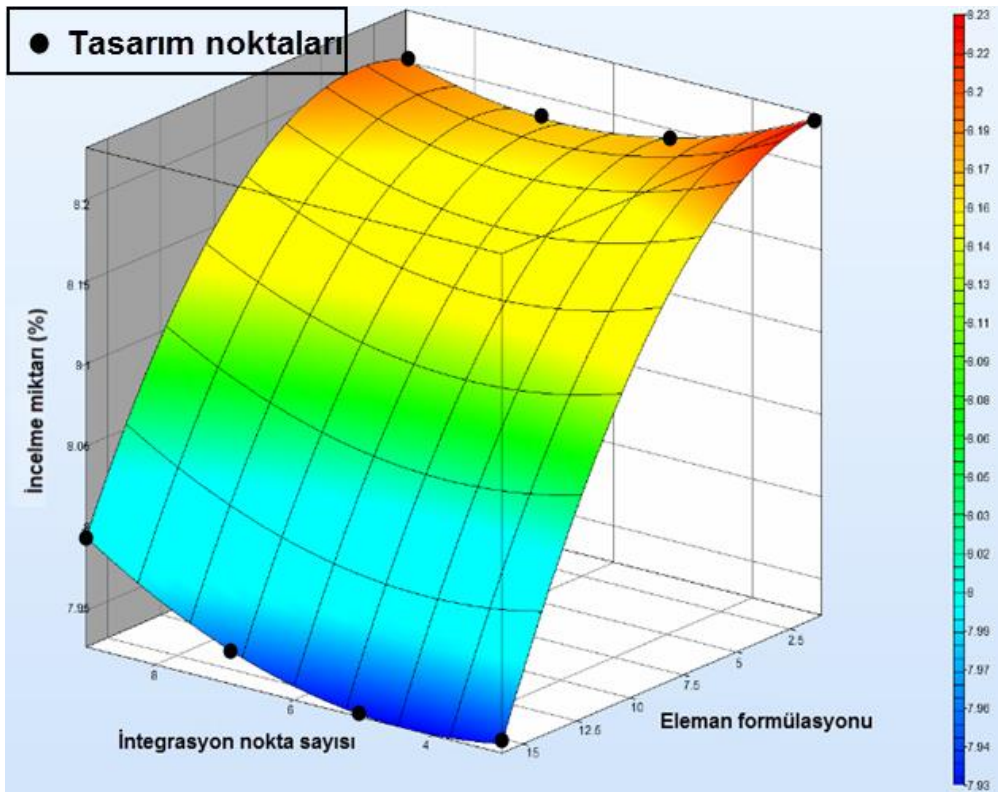


(b)

Şekil B.5. Tavan destek sacı formlama işlemi deneysel tasarım sonrasında (a) Eleman formülasyonuna göre (b) İntegrasyon nokta sayısına göre elde edilen yanıt yüzeyleri



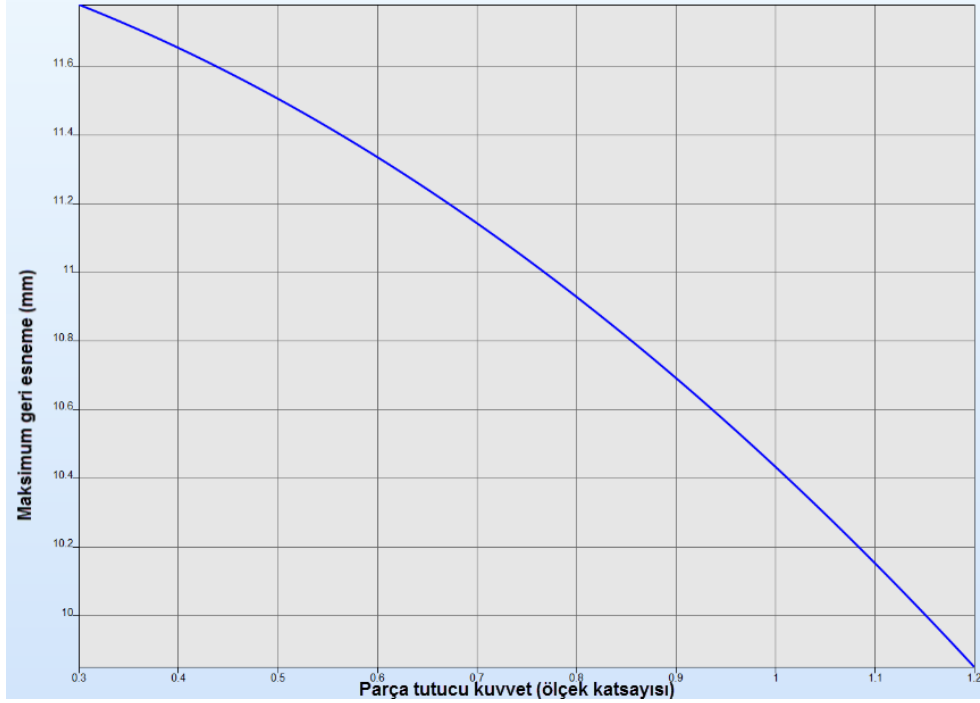
(a)



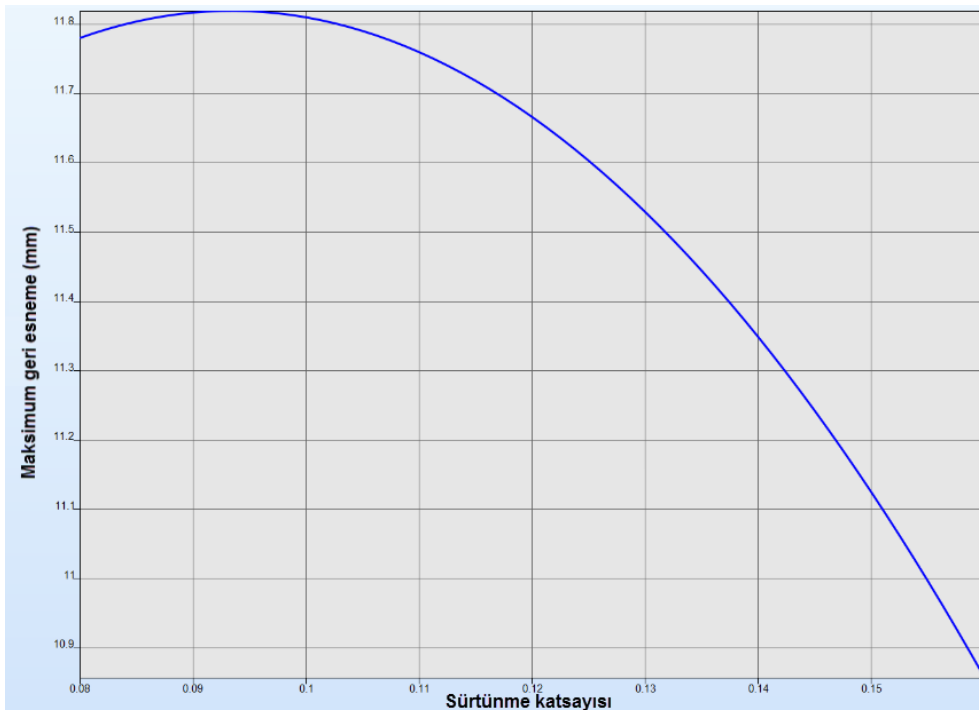
(b)

Şekil B.6. Tavan destek sacı formlama işlemi deneysel tasarım sonrası elde edilen (a) Maksimum geri esneme için (b) % incelme miktarı için 3 boyutlu yanıt yüzeyleri

Tavan Destek Sacı Formlama İşlemi Proses Parametreleri Deneysel Tasarım Yanıt Yüzeyleri

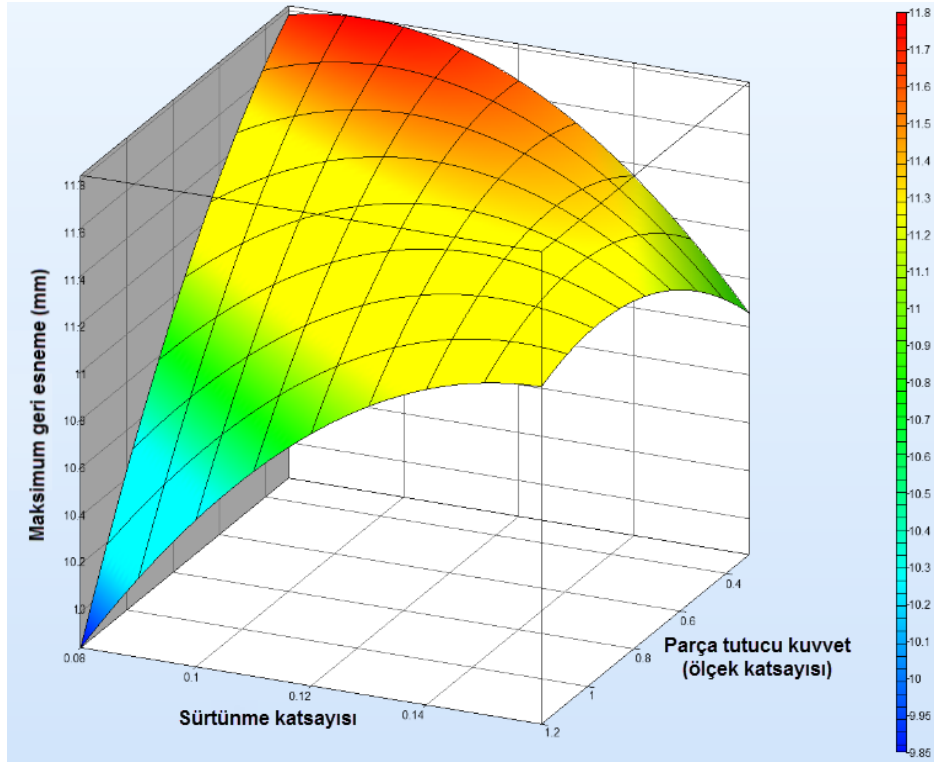


(a)

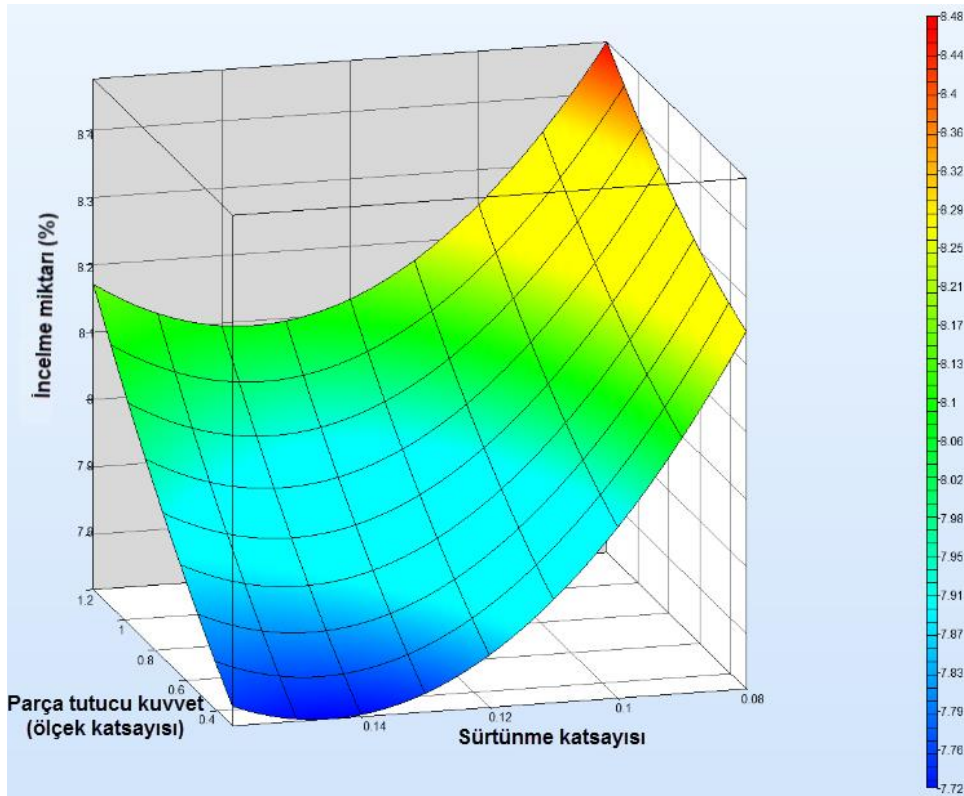


(b)

Şekil B.7. Tavan destek sacı formlama işlemi deneysel tasarım sonrasında (a) Parça tutucu kuvvete göre (b) Sürtünme katsayısına göre elde edilen yanıt yüzeyleri



(a)



(b)

Şekil B.8. Tavan destek sacı formlama işlemi deneysel tasarım sonrası elde edilen (a) Maksimum geri esneme için (b) % incelme miktarı için 3 boyutlu yanıt yüzeyleri

EK C: Ls-Dyna Malzeme Kütüphanesinde Tez Çalışması Kapsamında Kullanılan Malzeme Kartları ve Parametreleri

***MAT_POWER_LAW_PLASTICITY (MAT_18) (Akma Kuralı)**

MID	Malzeme tanımı.
RO	Kütle yoğunluğu
E	Elastisite modülü
PR	Poisson oranı
K	Mukavemet katsayısı
N	Pekleşme üsteli
SRC	Gerinim oranı parametresi. C=0 ise hız etkisi ihmal edilir.
SRP	Gerinim oranı parametresi. P=0 ise hız etkisi ihmal edilir.
SIGY	Başlangıç akma gerilmesini tanımlayan opsiyonel parametre.
VP	Gerinim oranı etkisi formülasyonu. 0 ise, orantısız akma gerilmesi, 1 ise viskoplastik formülasyon ile işlem yapılır.

***MAT_3-PARAMETER_BARLAT (MAT_36) (Barlat-89)**

MID	Malzeme tanımı.
RO	Kütle yoğunluğu
E	Elastisite modülü
PR	Poisson oranı
HR	Pekleşme kuralı. 1 ise, lineer (öntanımlı), 2 ise; üstel (Swift), 3 ise; gerilme-gerinim eğrisi, 4 ise; üstel (Voce), 5 ise; üstel (Gosh), 6 ise; üstel (Hocket-Sherby), 7 ise; üç yöndeki gerilme-gerinim eğrileri.
P1	Malzeme parametresi. 1 ise; tanjant modülü, 2 ise; Swift pekleşme kuralındaki k, mukavemet katsayısı, 4 ise; Voce pekleşme kuralındaki a katsayısı, 5 ise; Gosh pekleşme kuralındaki k, mukavemet katsayısı, 6 ise; Hocket-Sherby pekleşme kuralındaki a katsayısı, 7 ise; 45° yönündeki pekleşme için gerilme-gerinim eğrisi.
P2	Malzeme parametresi. 1 ise; akma gerilmesi, 2 ise; Swift pekleşme kuralındaki n, üsteli, 4 ise; Voce pekleşme kuralındaki c katsayısı, 5 ise; Gosh pekleşme kuralındaki n, üsteli, 6 ise; Hocket-Sherby pekleşme kuralındaki c katsayısı, 7 ise; 90° yönündeki pekleşme için gerilme-gerinim eğrisi.
ITER	Hız için iterasyon hedefi. 0 ise; tam iterasyonlu, 1 ise; üç iterasyonda sabitlenmiş.
M	Barlat akma yüzeyindeki m katsayısı
R00	Hadde yönündeki anizotropi
R45	Hadde yönüne 45° yöndeki anizotropi
R90	Hadde yönüne dik yöndeki anizotropi
LCID	Hadde yönündeki gerilme- gerinim eğrisi numarası.
E0	Malzeme parametresi.
SPI	Malzeme parametresi.
P3	Malzeme parametresi.
AOPT	Malzeme eksen opsiyonu.
C	Cowper-Symonds gerinim oranı kuralındaki c parametresi.
P	Cowper-Symonds gerinim oranı kuralındaki p parametresi. Hız ihmal edilecekse p=0 alınmalı.
VLCID	Efektif plastik gerinimin fonksiyonu olarak, relatif hacim değişimini tanımlayan, hacim düzeltme eğrisi numarası.
BETA	AOPT=3 iken, derece cinsinden malzeme açısı
XP, YP, ZP	AOPT=1 iken tanımlanan koordinatlar
A1, A2, A3	AOPT=2 iken tanımlanan a vektörü bileşenleri
V1, V2, V3	AOPT=3 iken tanımlanan v vektörü bileşenleri
D1, D2, D3	AOPT=2 iken tanımlanan d vektörü bileşenleri

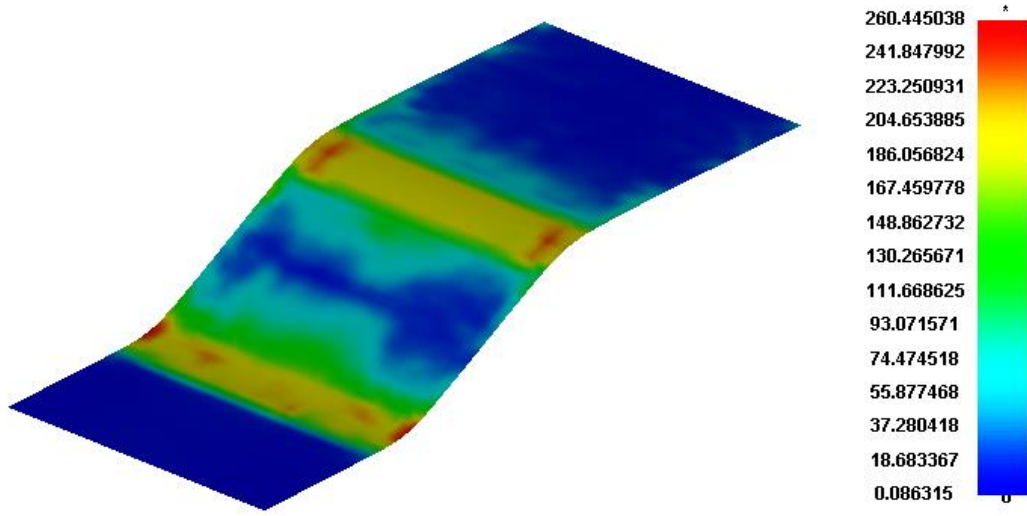
***MAT_TRANSVERSELY_ANISOTROPIC_ELASTIC_PLASTIC (MAT_37 ve
MAT_37_WITH E CHANGE) (Hill-48)**

MID	Malzeme tanımı.
RO	Kütle yoğunluğu
E	Elastisite modülü
PR	Poisson oranı
SIGY	Akma gerilmesi
ETAN	Plastik pekleşme modülü
R	Anizotropik pekleşme parametresi
HLCID	Tanımlanan gerilme-gerinim eğrisi numarası
IDSCALE	Efektif gerinime bağlı elastisite modülü değişimi (EA ve COE tanımlanırsa) için ölçek faktörünü tanımlayan yük eğrisi numarası (Bu eğriyi girmek zorunlu değildir)
EA, COE	Efektif gerinime bağlı elastisite modülü değişimini tanımlayan katsayılar. EA, E ^A katsayısı ve COE, ζ katsayısıdır.

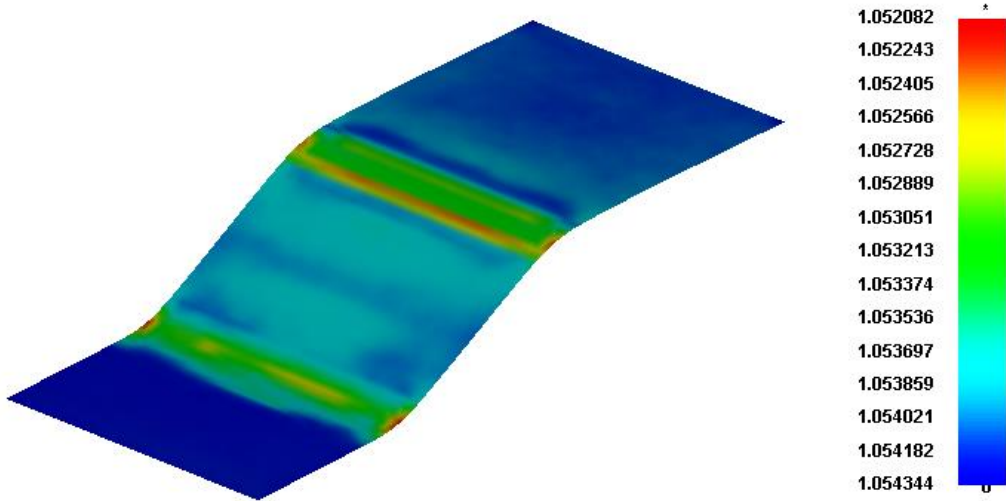
***MAT_KINEMATIC_HARDENING_TRANSVERSELY_ANISOTROPIC (MAT_125)
(Yoshida)**

MID	Malzeme tanımı.
RO	Kütle yoğunluğu
E	Elastisite modülü
PR	Poisson oranı
R	Anizotropik pekleşme parametresi.
CB	B verilen denklemlerle hesaplanır.
Y	Plastisite modelinde tanımlanan pekleşme parametresi
SC	C verilen denklemlerle hesaplanır
K	Plastisite modelinde tanımlanan pekleşme parametresi
RSAT	Plastisite modelinde tanımlanan pekleşme parametresi
SB	b verilen denklemlerle hesaplanır.
H	Deformasyon pekleşmesi duranlığı ile ilişkili anizotropik parametre
EA	Elastisite modülü değişimini kontrol eden değişken, modeldeki E ^A katsayısı.
COE	Elastisite modülü değişimini kontrol eden değişken, modeldeki ζ katsayısı.

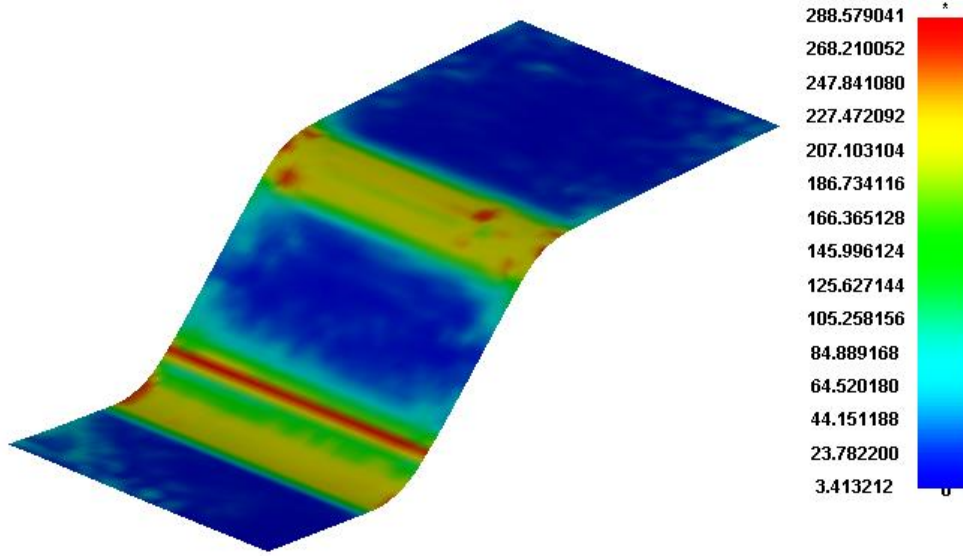
EK D: Uygulama Örnekleri İçin Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları



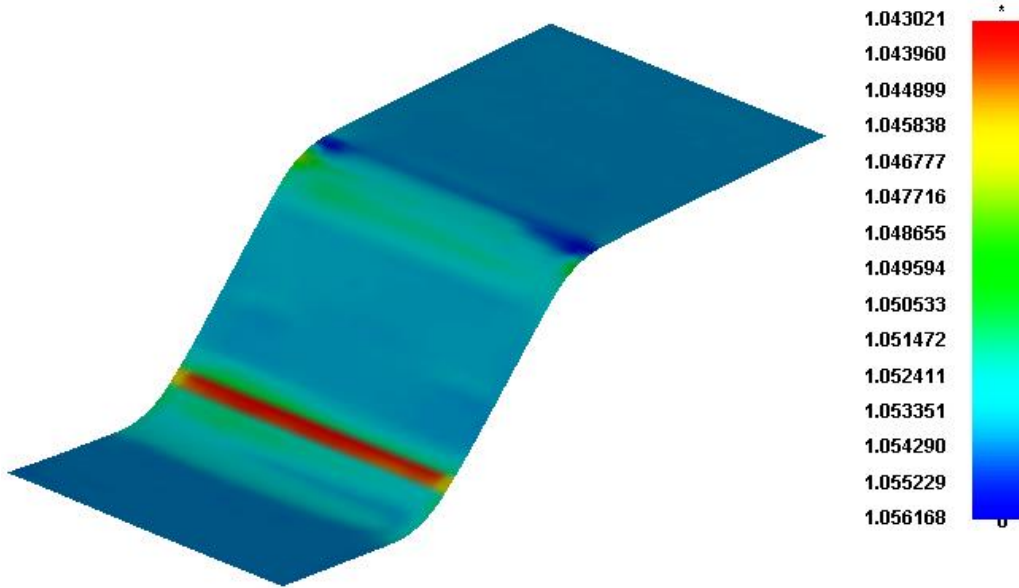
Şekil D.1. Açılı kanal çekme prosesi referans kalıp geri esneme yüzeyi von Mises gerilme dağılımı



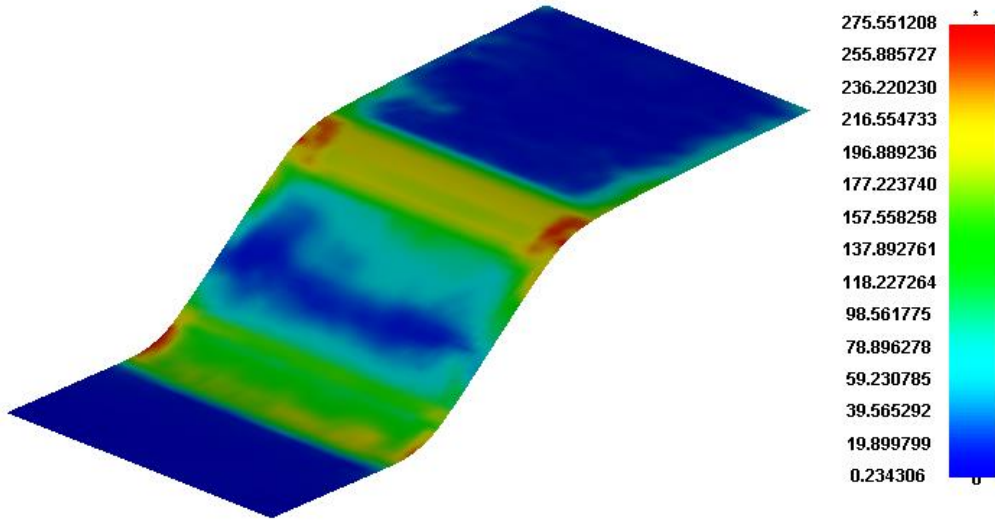
Şekil D.2. Açılı kanal çekme prosesi referans kalıp kalınlık geri esneme yüzeyi dağılımı



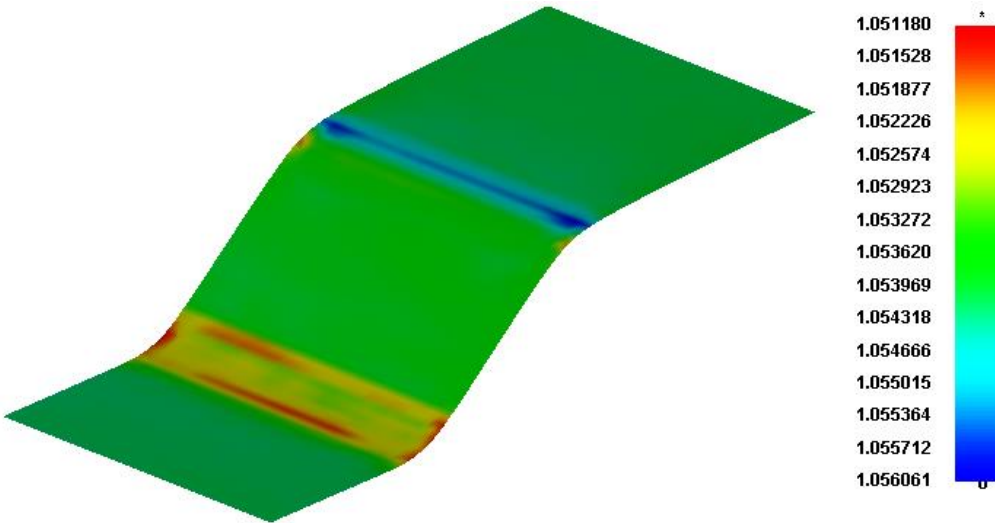
Şekil D.3. Açılı kanal çekme prosesi ortalama telafi faktörü ile elde edilen telafilı kalıp geri esneme yüzeyi von Mises gerilme dağılımı



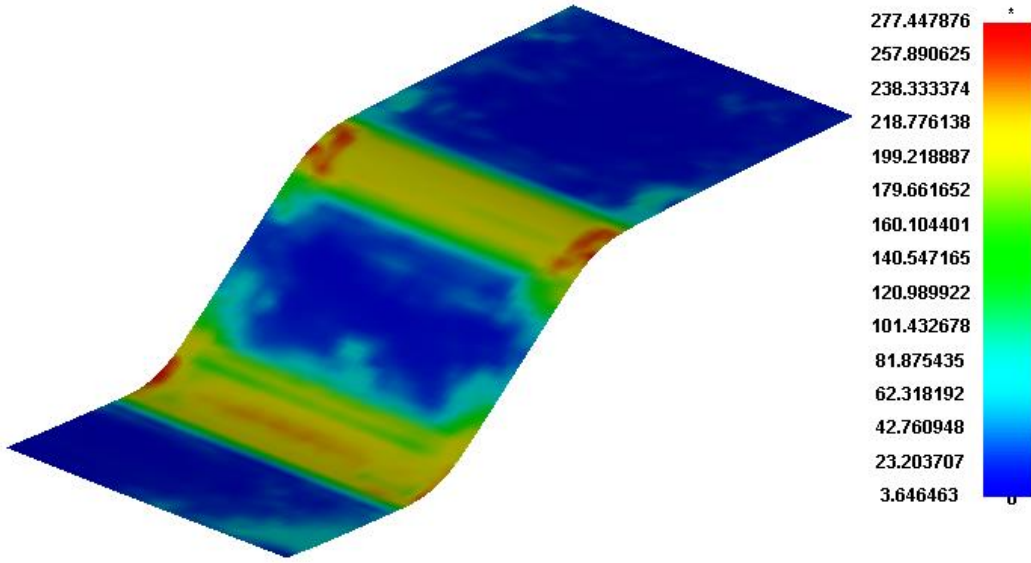
Şekil D.4. Açılı kanal çekme prosesi ortalama telafi faktörü ile elde edilen telafilı kalıp geri esneme yüzeyi kalınlık dağılımı



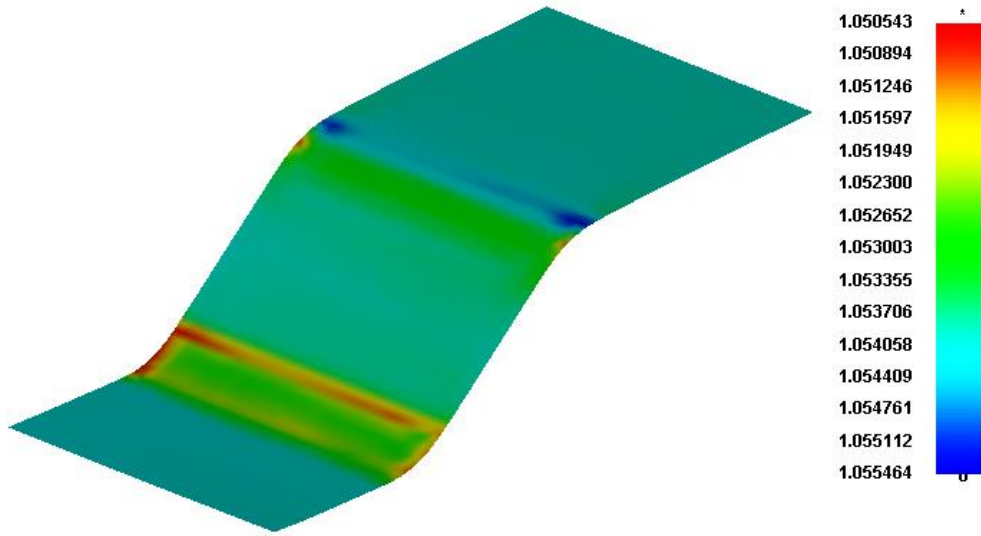
Şekil D.5. Açılı kanal çekme prosesi dağılım telafi faktörü ile elde edilen telafili kalıp geri esneme yüzeyi von Mises gerilme dağılımı



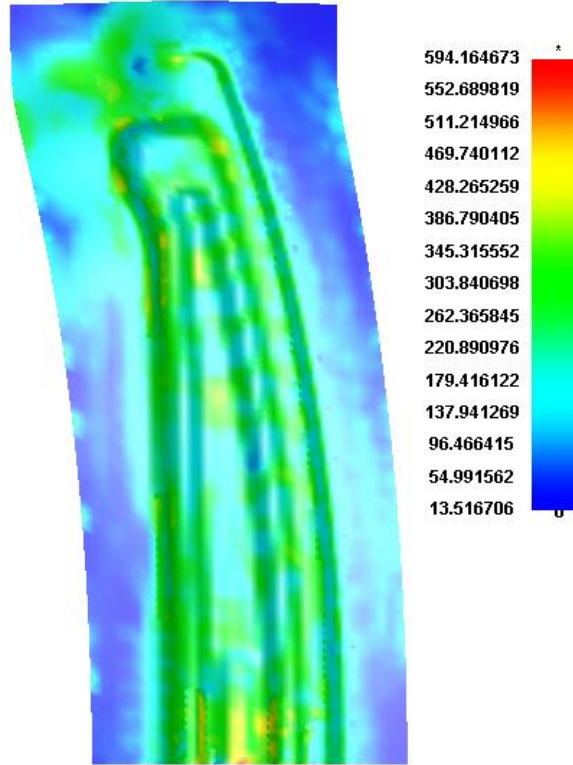
Şekil D.6. Açılı kanal çekme prosesi dağılım telafi faktörü ile elde edilen telafili kalıp geri esneme yüzeyi kalınlık dağılımı



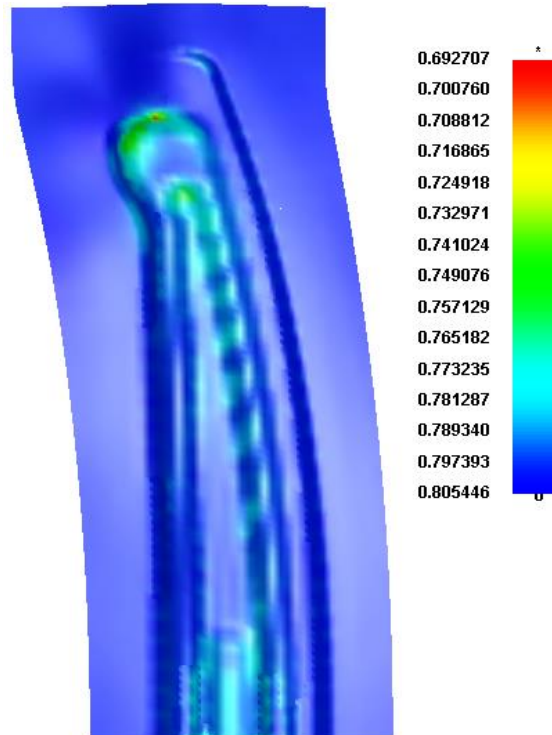
Şekil D.7. Açılı kanal çekme prosesi (-1) telafi faktörü ile elde edilen telafili kalıp geri esneme yüzeyi von Mises gerilme dağılımı



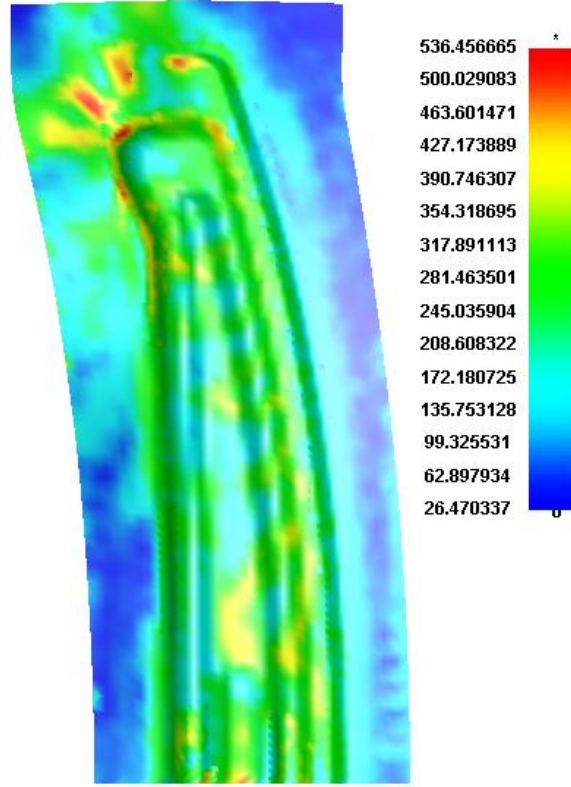
Şekil D.8. Açılı kanal çekme prosesi (-1) telafi faktörü ile elde edilen telafili kalıp geri esneme yüzeyi kalınlık dağılımı



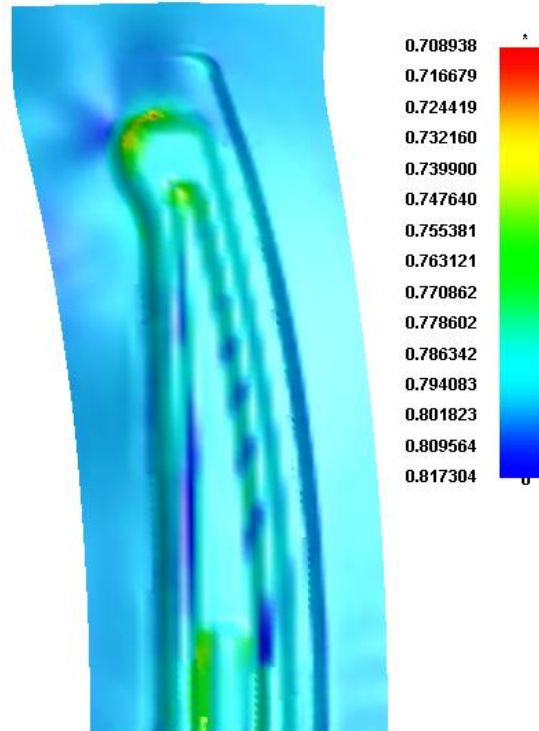
Şekil D.9. Tavan destek sacı formlama işlemi referans kalıp geri esneme yüzeyi von Mises gerilme dağılımı



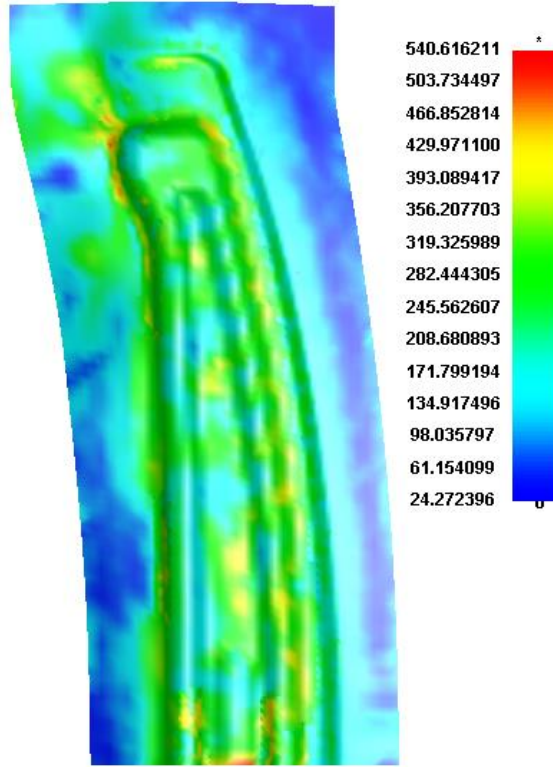
Şekil D.10. Tavan destek sacı formlama işlemi referans kalıp geri esneme yüzeyi kalınlık dağılımı



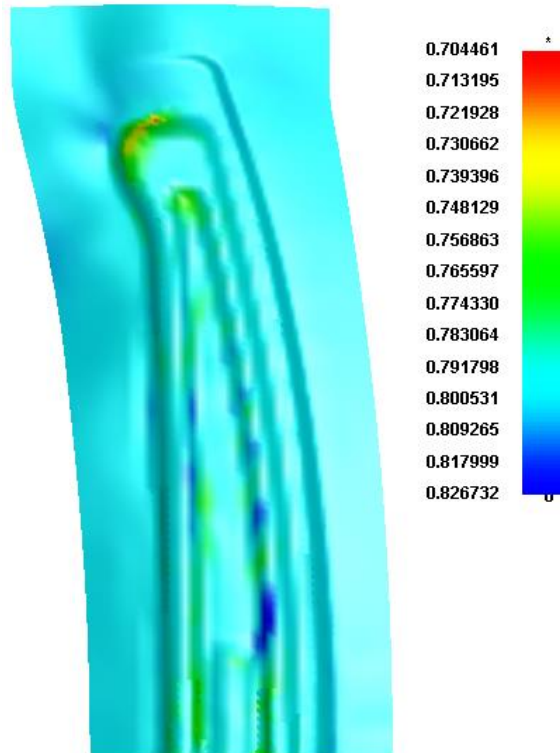
Şekil D.11. Tavan destek sacı formlama işlemi (-1) telafi faktörü ile elde edilen 1. iterasyon telafili kalıp geri esneme yüzeyi von Mises gerilme dağılımı



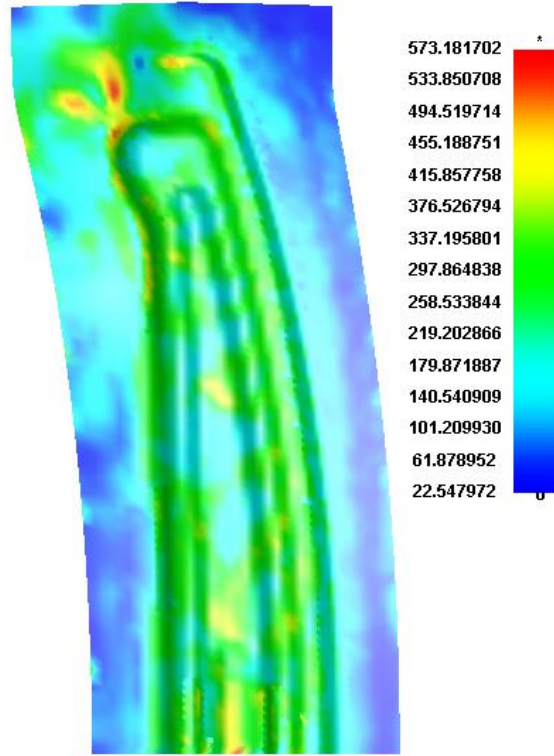
Şekil D.12. Tavan destek sacı formlama işlemi (-1) telafi faktörü ile elde edilen 1. iterasyon telafili kalıp geri esneme yüzeyi kalınlık dağılımı



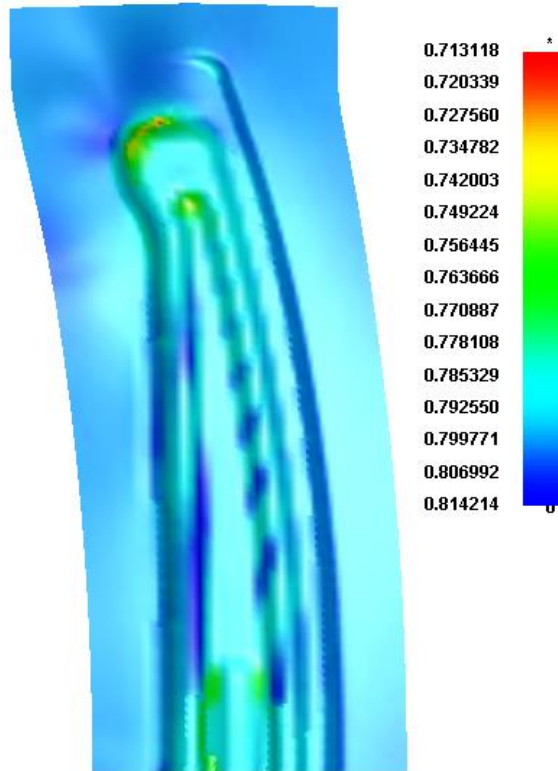
Şekil D.13. Tavan destek sacı formlama işlemi (-1) telafi faktörü ile elde edilen 2. iterasyon telafili kalıp geri esneme yüzeyi von Mises gerilme dağılımı



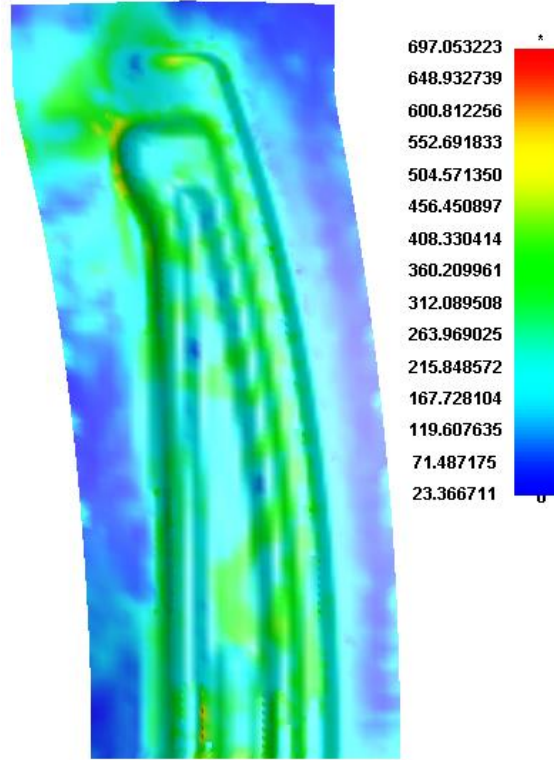
Şekil D.14. Tavan destek sacı formlama işlemi (-1) telafi faktörü ile elde edilen 2. iterasyon telafili kalıp geri esneme yüzeyi kalınlık dağılımı



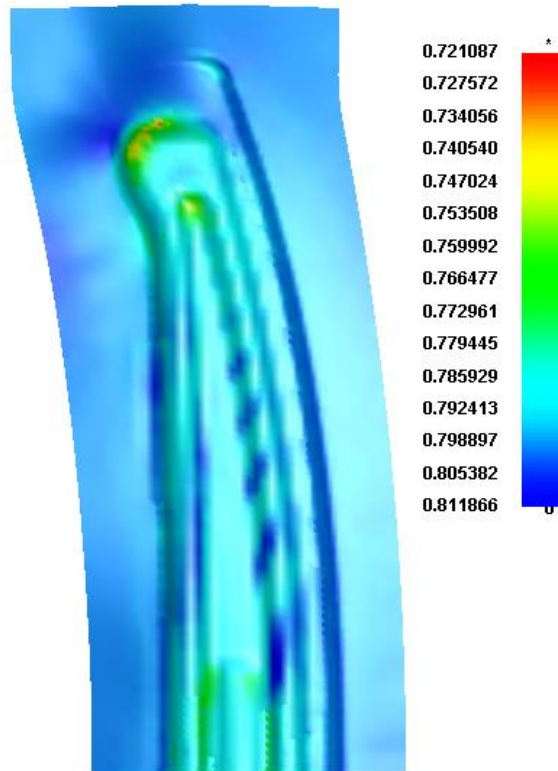
Şekil D.15. Tavan destek sacı formlama işlemi dağılım telafi faktörü ile elde edilen 1. iterasyon telafili kalıp geri esneme yüzeyi von Mises gerilme dağılımı



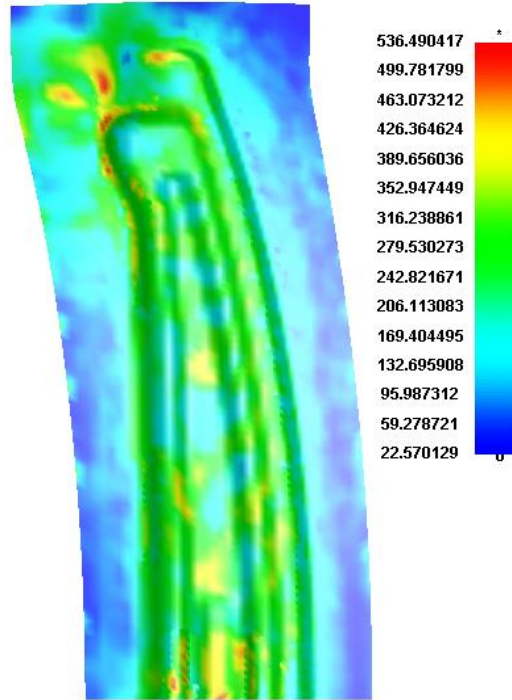
Şekil D.16. Tavan destek sacı formlama işlemi dağılım telafi faktörü ile elde edilen 1. iterasyon telafili kalıp geri esneme yüzeyi kalınlık dağılımı



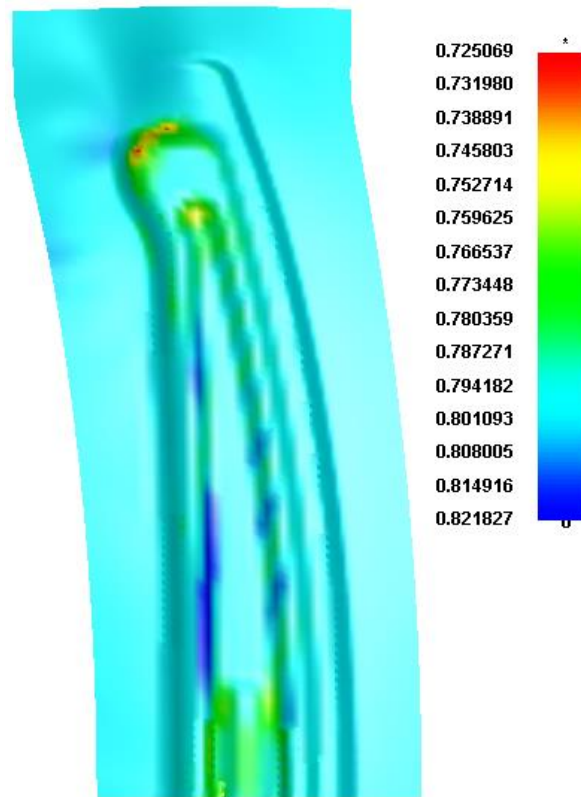
Şekil D.17. Tavan destek sacı formlama işlemi dağılım telafi faktörü ile elde edilen 2. iterasyon telafili kalıp geri esneme yüzeyi von Mises gerilme dağılımı



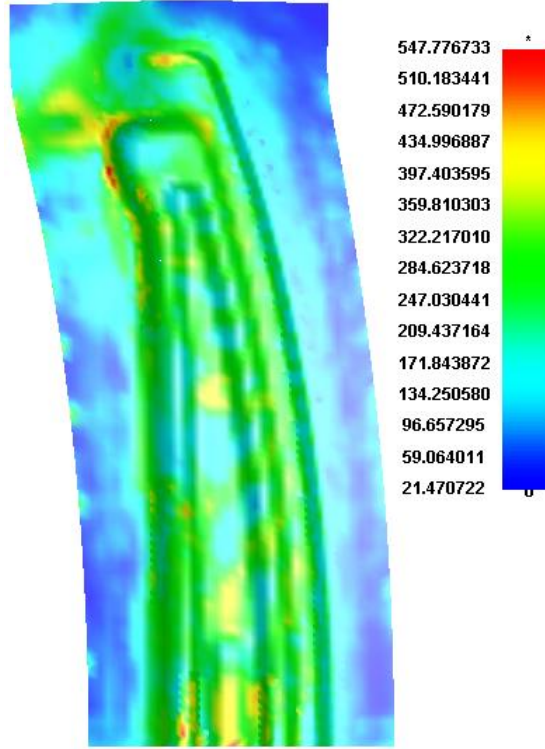
Şekil D.18. Tavan destek sacı formlama işlemi dağılım telafi faktörü ile elde edilen 2. iterasyon telafili kalıp geri esneme yüzeyi kalınlık dağılımı



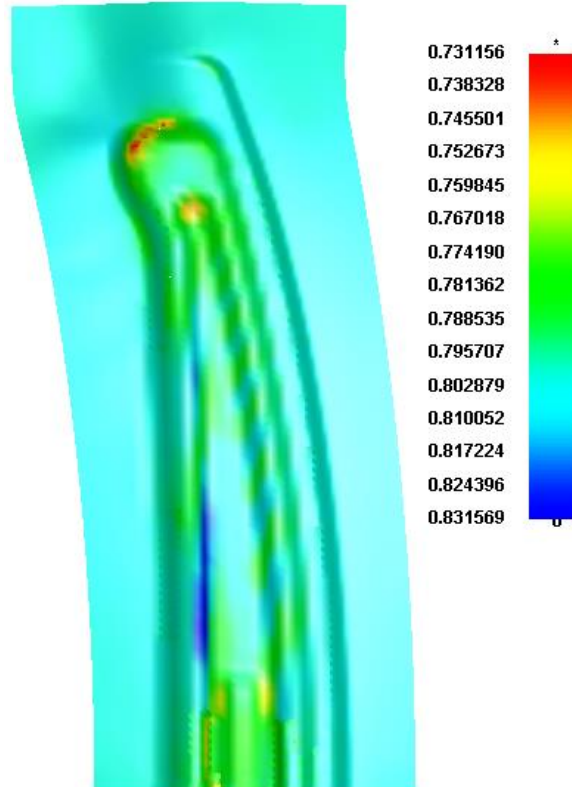
Şekil D.19. Tavan destek sacı formlama işlemi 3-D dağılım telafi faktörü ile elde edilen 1. iterasyon telafili kalıp geri esneme yüzeyi von Mises gerilme dağılımı



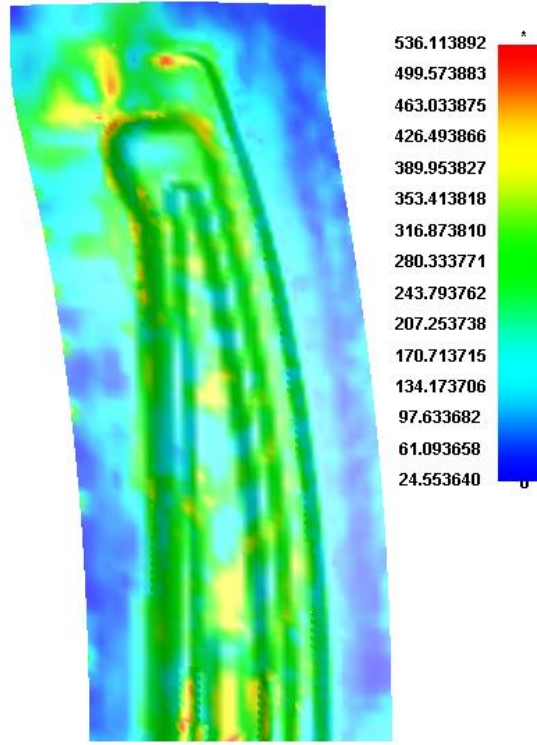
Şekil D.20. Tavan destek sacı formlama işlemi 3-D dağılım telafi faktörü ile elde edilen 1. iterasyon telafili kalıp geri esneme yüzeyi kalınlık dağılımı



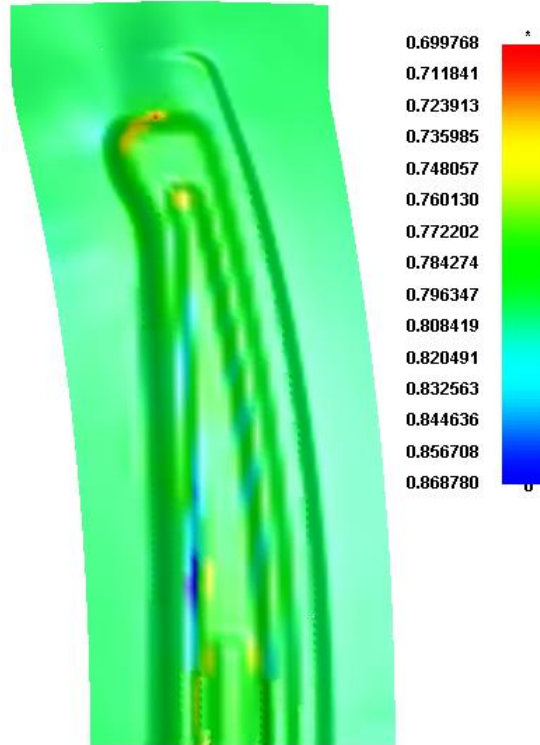
Şekil D.21. Tavan destek sacı formlama işlemi 3-D dağılım telafi faktörü ile elde edilen 2. iterasyon telafili kalıp geri esneme yüzeyi von Mises gerilme dağılımı



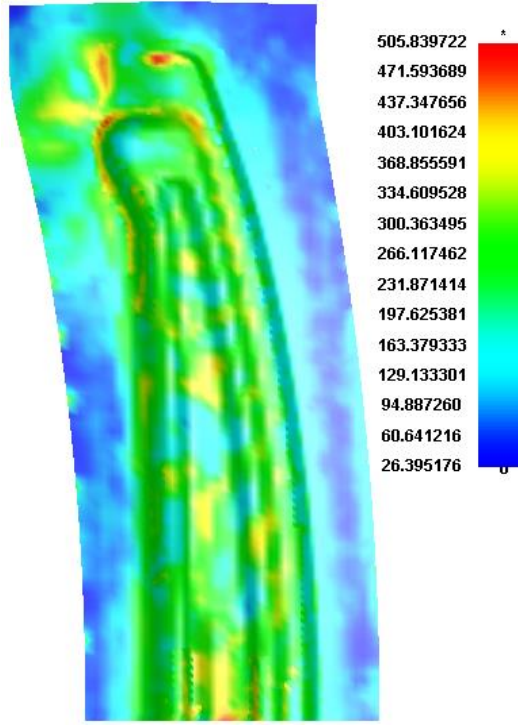
Şekil D.22. Tavan destek sacı formlama işlemi 3-D dağılım telafi faktörü ile elde edilen 2. iterasyon telafili kalıp geri esneme yüzeyi kalınlık dağılımı



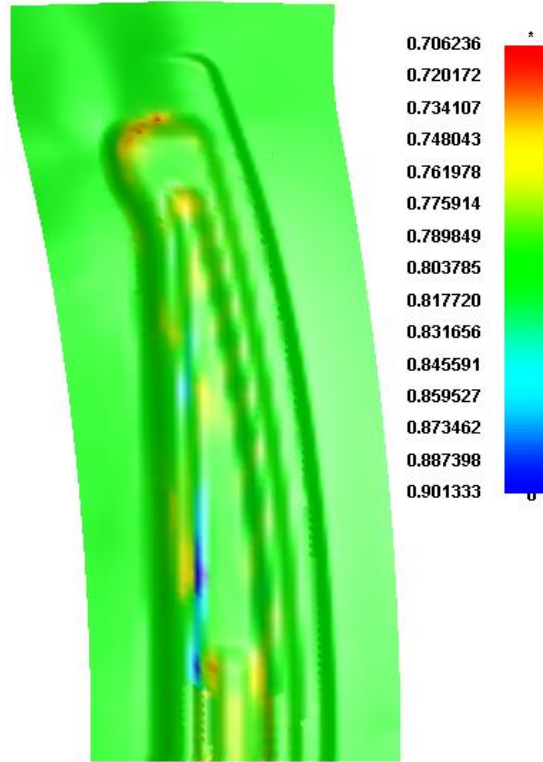
Şekil D.23. Tavan destek sacı formlama işlemi 3-D dağılım telafi faktörü ile elde edilen 3. iterasyon telafili kalıp geri esneme yüzeyi von Mises gerilme dağılımı



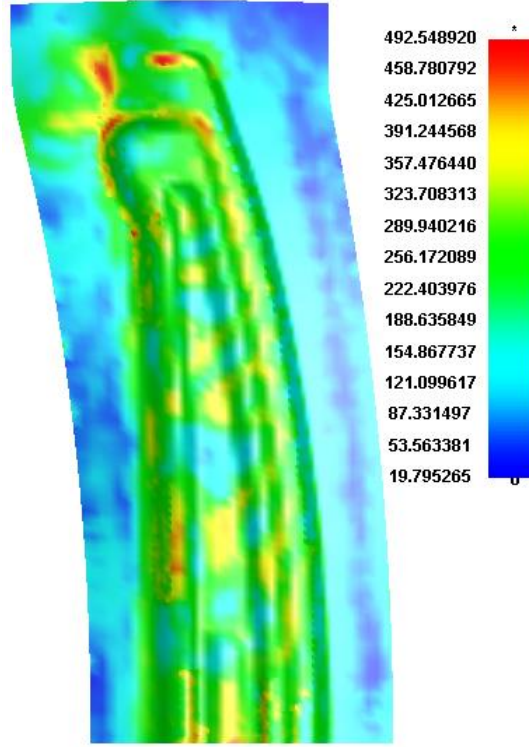
Şekil D.24. Tavan destek sacı formlama işlemi 3-D dağılım telafi faktörü ile elde edilen 3. iterasyon telafili kalıp geri esneme yüzeyi kalınlık dağılımı



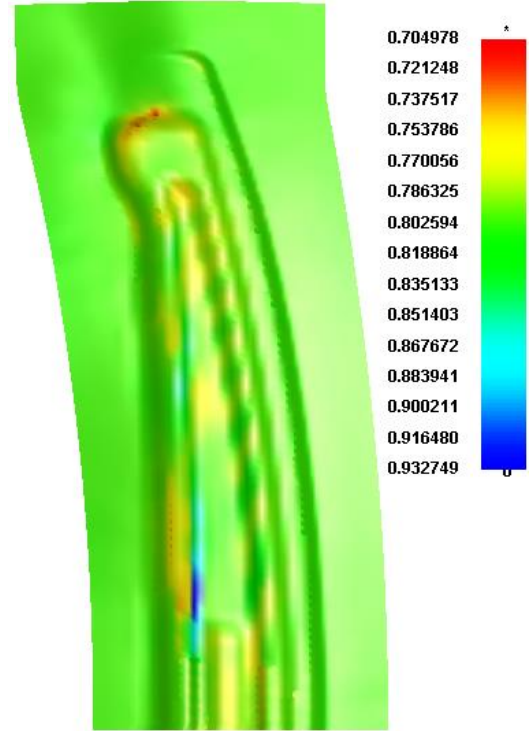
Şekil D.25. Tavan destek sacı formlama işlemi 3-D dağılım telafi faktörü ile elde edilen 4. iterasyon telafili kalıp geri esneme yüzeyi von Mises gerilme dağılımı



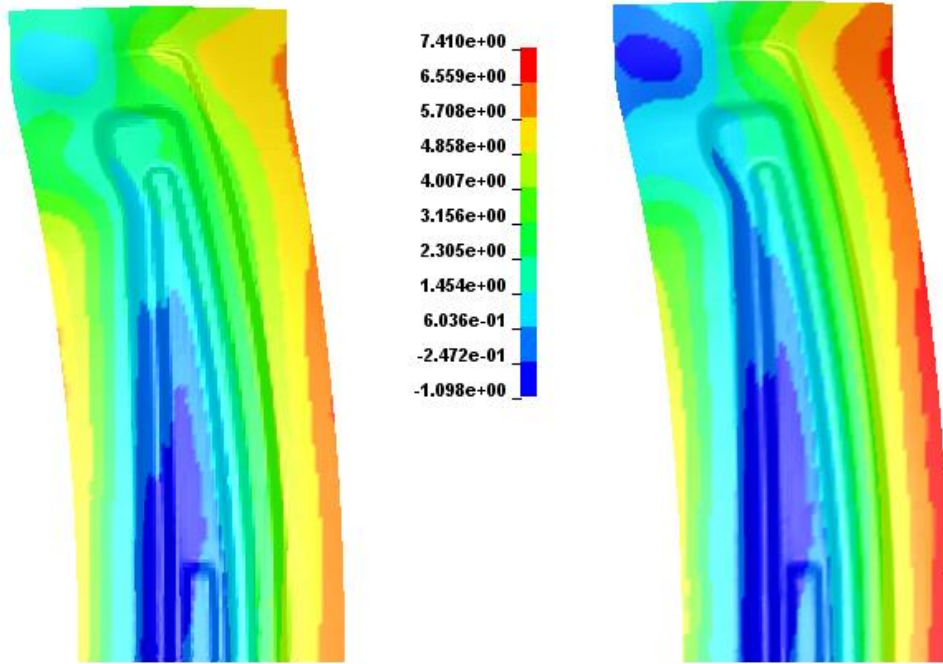
Şekil D.26. Tavan destek sacı formlama işlemi 3-D dağılım telafi faktörü ile elde edilen 4. iterasyon telafili kalıp geri esneme yüzeyi kalınlık dağılımı



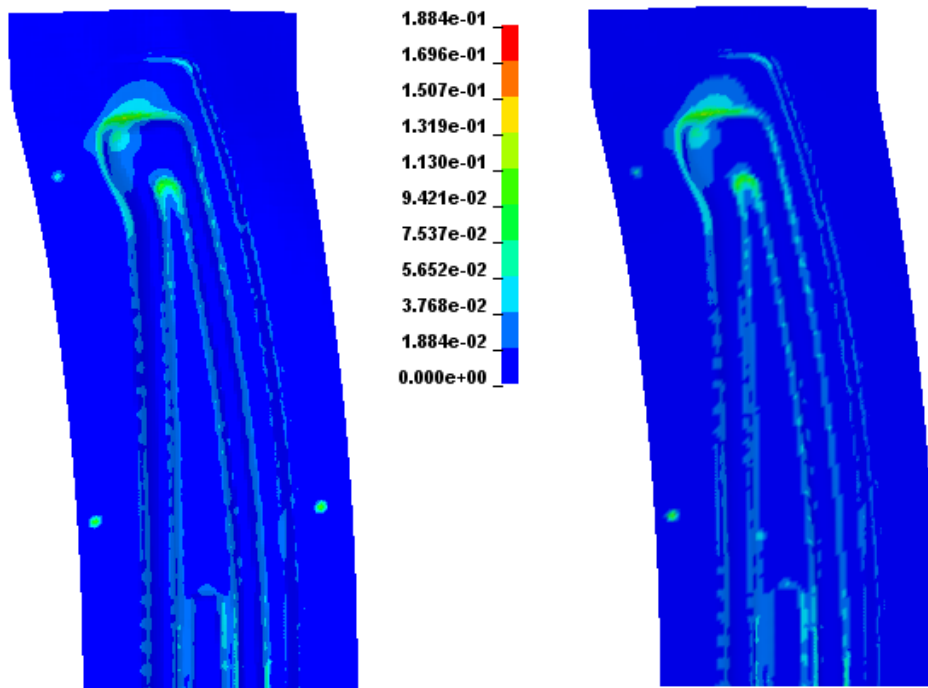
Şekil D.27. Tavan destek sacı formlama işlemi 3-D dağılım telafi faktörü ile elde edilen 5. iterasyon telafili kalıp geri esneme yüzeyi von Mises gerilme dağılımı



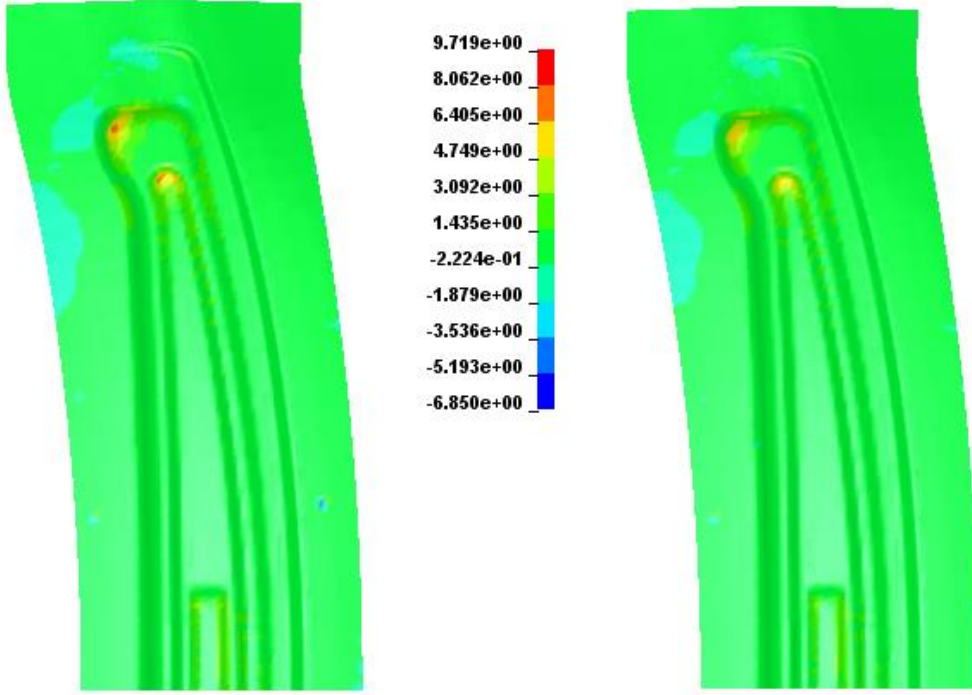
Şekil D.28. Tavan destek sacı formlama işlemi 3-D dağılım telafi faktörü ile elde edilen 5. iterasyon telafili kalıp geri esneme yüzeyi kalınlık dağılımı



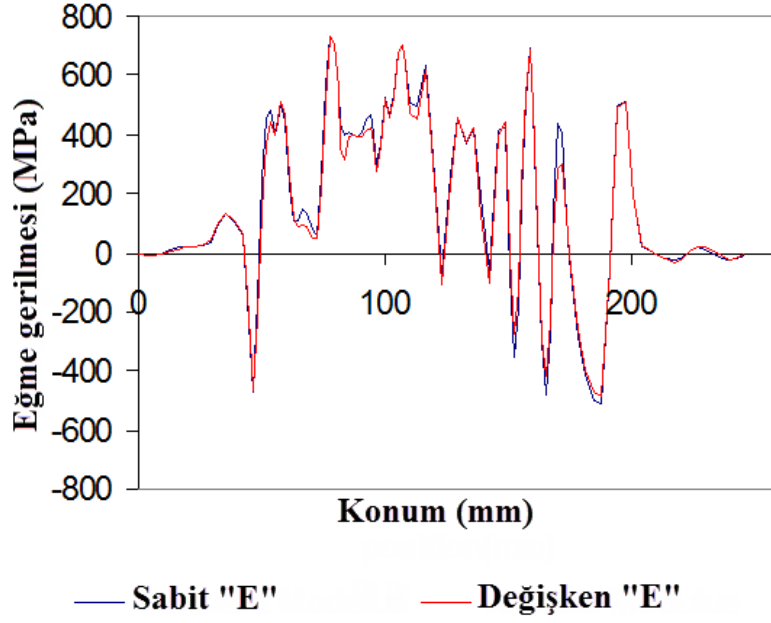
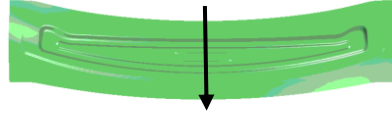
Şekil D.29. Tavan destek sacı formlama işleminde sabit (sol) ve değişken (sağ) elastisite modülü kullanılarak elde edilen geri esneme dağılımları



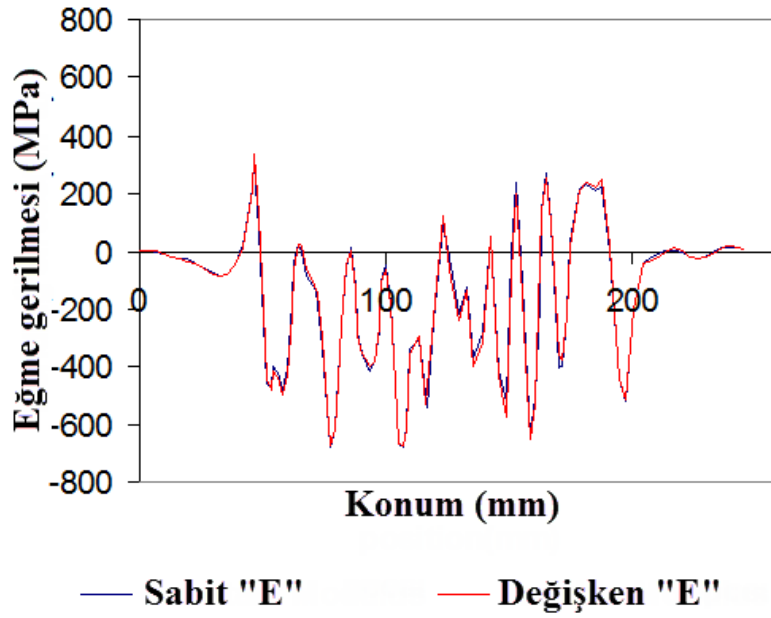
Şekil D.30. Tavan destek sacı formlama işleminde sabit (sol) ve değişken (sağ) elastisite modülü kullanılarak elde edilen plastik gerinim dağılımları



Şekil D.31. Tavan destek sacı formlama işleminde sabit (sol) ve değişken (sağ) elastisite modülü kullanılarak elde edilen (%) incelme miktarları



(a)



(b)

Şekil D.32. Tavan destek sacı formlama işleminde parçanın orta düzleminde (a) formlama ve (b) geri esneme adımları için eğme gerilmeleri

EK E: Tavan Destek Parçasına Ait Üretimi Yapılan Form Kalıpları ve Formlanmış Parça Geometrileri











ÖZGEÇMİŞ

Emre ESENER, 1986 yılında Tokat'ta dünyaya gelmiştir. 2004 yılında Tokat Anadolu Lisesi'nden mezun olduktan sonra, aynı yıl Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü'nde lisans öğrenimine başlamıştır. 2008 yılında Makine Mühendisliği Bölümü'nü başarıyla tamamlayıp, aynı yıl Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başlamıştır. 2010 yılında yüksek lisans öğrenimini başarıyla tamamlayıp aynı yıl içerisinde Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Makine Tasarım ve İmalat Bilim Dalı'nda doktora öğrenimine başlamıştır. Halen Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine ve İmalat Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.