

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SAC PARÇALARIN TASARIMINDA GERİ
YAYLANMA PARAMETRELERİNİN ETKİSİ**

Ali BAKİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Konstrüksiyon Programı

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Muharrem E. BOĞOÇLU

Mayıs, 2019

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SAC PARÇALARIN TASARIMINDA GERİ YAYLANMA
PARAMETRELERİNİN ETKİSİ

Ali BAKİ tarafından hazırlanan tez çalışması 08.05.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Dr. Öğr. Üyesi Muharrem Erdem BOĞOÇLU
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Muharrem Erdem BOĞOÇLU
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Berna BOLAT
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Serpil KURT
İstanbul Teknik Üniversitesi





Danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Muharrem Erdem BOĞOÇLU sorumluluğunda tarafımda hazırlanan Sac Parçaların Tasarımında Geri Yaylanma Parametrelerinin İncelenmesi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Ali BAKİ

İmza



TEŞEKKÜR

Kendisiyle çalışmaktan her zaman keyif aldığım, tezin ortaya çıkarılmasında ve sonuca ulaşmasında imkân tanıyan hocam Dr. Öğretim Üyesi Muharrem Erdem BOĞOÇLU göstermiş olduğu sabır ve desteği için teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim boyunca karşılaştığım sıkıntıları aşmam konusunda desteğini hiçbir zaman eksik etmeyen Yıldız Teknik Üniversitesi hocalarıma teşekkür ederim.

Tez jüri Başkanı Sayın Dr. Öğretim Üyesi Muharrem BOĞOÇLU ve tez jüri üyeleri Sayın Dr. Öğretim Üyesi Berna BOLAT ve Sayın Doç. Dr. Serpil KURT'a göstermiş oldukları ilgiden ve katkılarından ötürü teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, deney kalıplarının tasarımında ve kurulumunda desteklerini ve tecrübelerini esirgemeyen, kendisinden çok şey öğrendiğim, Toyotetsu Fabrikası Ar- Ge merkezi kalıp geliştirme müdürü Sayın Murat AYDOĞAN'a, Ar- Ge merkezi tasarım şefi Korhan YETİM ve diğer tasarım ve imalat teknik personeline teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak yüksek lisans eğitimim boyunca her koşulda yanımda olan, sabrını ve desteğini esirgemeyen aileme sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Ali BAKİ

SİMGE LİSTESİ.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
TABLO LİSTESİ	xvi
ÖZET.....	xviii
ABSTRACT	xx
1 GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.2 Tezin Amacı.....	4
1.3 Hipotez.....	6
2 GENEL BİLGİLER.....	7
2.1 Süzdürme Çubuğu Uygulaması.....	7
2.2 Şekil Verme Limit Diyagramı	7
2.3 Malzemenin Mekanik Davranışı	8
2.3.1 Plastik Anizotropi	9
2.3.2 Akma Kriterleri.....	11
3 ÇEKME PROSESİNDE GERİ YAYLANMA.....	18
3.1 Çekme Proses Süreci.....	18
3.2 Autoformda Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Çekme Proses Simülasyonu .	19
3.2.1 Araç Çubuklarının Yönetimi	19
3.2.2 Presleme Prosesinin Kurulumu	20
3.2.3 Hesaplamanın Yapılması	21
3.2.4 Değerlendirme.....	21
3.3 Geri Yaylanma Miktarı.....	22
3.4 Geri Yaylanma Azaltımı	23
4 GERİ YAYLANMA AZALTMA STRATEJİLERİ	25

4.1 Geri Yaylanma Telafisi.....	25
4.2 Yer Değiştirme Düzeltme Yöntemi.....	29
4.3 Spring Forward Yöntemi	32
4.4 Kontrol Yüzeyi Yöntemi.....	33
4.4.1 Kontrol Yüzey Algoritmasının Yapısı.....	35
4.4.2.3 Boyutlu Bezier Yüzey Algoritması	49
5 GERİ YAYLANMANIN SONLU ELEMANLAR ANALİZİ İLE TAHMİNİ.....	70
5.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi	71
5.1.1 Açık (Explicit) ve Kapalı (Implicit) Sonlu Elemanlar Yöntemi	71
5.2 Autoform Malzeme Modelleri.....	72
5.3 Birim Sistemi	73
5.4 Arka Araç Gövde Parçası_1	74
5.4.1 Kalıp Tasarımı ve Deneysel Çalışma.....	76
5.4.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi	79
5.4.3 Sonlu Elemanlar Simülasyon Çalışması Değerlendirilmesi ve Deneysel Karşılaştırma.....	84
5.4.4 Arka Araç Gövde Parçası_1 Malzeme Kalınlığının Geri yaylanma Davranışı Üzerindeki Etkisi.....	86
5.4.5 Elastisite Modülünün Geri Yaylanma Davranışı Üzerindeki Etkisi....	89
5.4.6 Tartışma	91
5.5 Arka Araç Gövde Parçası_2.....	91
5.5.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	98
5.5.2 Sonlu Elemanlar Simülasyon Çalışması Değerlendirilmesi ve Deneysel Karşılaştırma.....	104
5.5.3 Malzeme Kalınlığının Geri Yaylanma Davranışı Üzerindeki Etkisi ...	105
5.5.4 Elastisite Modülünün Geri Yaylanma Davranışı Üzerindeki Etkisi ...	107
5.5.5 Tartışma	109
5.6 Orta Direk Parçası.....	109
5.6.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Deneyler ile Doğrulama	114
5.6.2 Sonlu Elemanlar Simülasyon Çalışması Değerlendirilmesi ve Deneysel Karşılaştırma.....	118

5.6.3 Malzeme Kalınlığının Geri Yaylanma Davranışı Üzerindeki Etkisi ...	120
5.6.4 Elastisite Modülünün Geri Yaylanma Davranışı Üzerindeki Etkisi ...	123
5.6.5 Tartışma	125
5.7 Kapı Kolu Parçası	125
5.7.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	129
5.7.2 Sonlu Elemanlar Simülasyon Çalışması Değerlendirilmesi ve Deneysel Karşılaştırma.....	133
5.7.3 Malzeme Kalınlığının Geri Yaylanma Davranışı Üzerindeki Etkisi...	135
5.7.4 Elastisite Modülünün Geri Yaylanma Davranışı Üzerindeki Etkisi...	137
5.7.5 Tartışma	139
5.8 Zemin Yan Üye Parçası	139
5.8.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	143
5.8.2 Sonlu Elemanlar Simülasyon Çalışması Değerlendirilmesi ve Deneysel Karşılaştırma.....	146
5.8.3 Malzeme Kalınlığının Geri Yaylanma Davranışı Üzerindeki Etkisi...	148
5.8.4 Elastisite Modülünün Geri Yaylanma Davranışı Üzerindeki Etkisi...	150
6 SONUÇLAR VE ÖNERİLER	152
KAYNAKÇA.....	155
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR.....	159

SİMGELİSTESİ

E	Elastiklik Modülü
r	Gerinim Oranı
R	Normal Anizotropi ve Anizotropinin Değeri
t	Sac Kalınlığı
ϵ	Gerinim
ϵ_p	Plastik Gerinim
$\dot{\epsilon}$	Gerinim Artış Oranı
ϵ_0	Akma Gerilmesine Karşılık Gelen Gerinim
σ	Gerilme
σ_y	Akma Gerilmesi
ν	Poisson Oranı
m	Akma Gerilmesi Kriterinin Derecesi
S_{ij}	Deviatorik Gerime Tensörü
A	YLD2000 Malzeme Modelinin Katsayıları
σ_{pl}	Eşdeğer Plastik Gerinimi
Q	Akma Yüzeyinin Maksimum Şekil Değıştirmesini
P	Düğüm
R	Yarıçap
h	Yükseklik

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	Farklı Dayanıma Sahip Çeliklerin Örnek Bir Araçta Kullanım Yerleri	1
Şekil 2.1	Süzdürme Çubuğu Uygulaması	7
Şekil 4.1	Manuel Geri Yaylanma Telafisi	26
Şekil 4.2	Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Geri Yaylanma Telafisi	26
Şekil 4.3	Tamamıyla Otomatik Geri Yaylanma Telafisi	27
Şekil 4.4	Spring Forward Yöntemiyle Birinci İterasyon	29
Şekil 4.5	Düğüm ve Sürekli Modifikasyon.....	31
Şekil 4.6	Spring Forward Yöntemi ile Birinci İterasyon.....	33
Şekil 4.7	Ürün ve Kontrol Yüzeyi	35
Şekil 4.8	Kontrol Yüzeyi ve Yer Değiştirme Yöntemi	36
Şekil 4.9	Kontrol Yüzeyi Şekil Değişikliği	36
Şekil 4.10	Kontrol Yüzeyi İterasyonları.....	38
Şekil 4.11	Silindirik Yüzey(sol) ve Bezier Yüzey (sağ).....	40
Şekil 4.12	Dönüşüm Yüzeyinin Hesaplanması	41
Şekil 4.13	Mesh Değişiklik Prensibi	43
Şekil 4.14	Tek Bükülmüş Kontrol Yüzeyi.....	44
Şekil 4.15	Tek Yönlü Yansıma	45
Şekil 4.16	Curve Uydurma	46
Şekil 4.17	Yüzeyler Arasındaki Mesafenin Belirlenmesi (solda) ve Bir Dönüşüm Yüzeyinin Oluşturulması (sağda).....	47
Şekil 4.18	Mesh Modifikasyonu Prensibi	48
Şekil 4.19	Gerçek Bir Ürünün Tahmini	48
Şekil 4.20	DC Yapısal Parçanın Algoritma ile Aşırı Yüklenmesi	49
Şekil 4.21	Kuadratik Bir Bezier Yüzeyi ile kuadratik.....	50
Şekil 4.22	Kuadratik Bezier Eğrisi için Üç Bernstein Karıştırma Fonksiyonu .	51
Şekil 4.23	Sıfır Olmayan Doğrusal B-spline Karıştırma Fonksiyonları	53
Şekil 4.24	Kuadratik Bir Yüzeyin Doğrusal Olarak Deformasyon Olasılıkları	54
Şekil 4.25	Kuadratik Yüzeye Göre Doğrusal, Temel Noktaları ve Yönleri.....	54
Şkil 4.26	Sınırlayıcı Kutu ve Sistem	56
Şekil 4.27	Geri Yaylanma Yüzeyi İçin Normal Yer Değiştirme	57
Şekil 4.28	Dönüşüm Yüzeyinin Yapımı	58

Şekil 4.29	Kontrol Yüzeyleri ile Ağ Değişikliği	59
Şekil 4.30	Veri Enterpolasyonu.....	60
Şekil 4.31	Normal (sol) ve Uzatılmış Nokta Projeksiyonu (sağ).....	62
Şekil 4.32	Nokta Projeksiyonu İçin İyi Bir Başlangıç Değeri Bulma.....	63
Şekil 4.33	Sabit Yön Ayarlı Bir İşlevi En Aza İndirme	64
Şekil 4.34	Referans Yüzeyinin Geliştirilmesi ve Yeniden Düzeltilmesi	65
Şekil 4.35	Yüzey Düzeltme. Orijinal Yüzeyi (solda), u Yönünde (ortada) ve Her İki Yönde (sağda) Düzeltme Netliğinde Değiştirin.....	66
Şekil 4.36	Yüzey Düzeltme. Orijinal Yüzeyi (solda), u Yönünde (ortada) ve Her İki Yönde (sağda) Düzeltme Netliğinde Değiştirin.....	67
Şekil 4.37	Kuadratik (düz çizgi), Kübik (kesikli) ve 4. Derece (noktalı) Eğri Uydurma.....	68
Şekil 5.1	Arka Araç Gövde Parçası_1 Parça Cad Datası	74
Şekil 5.2	Arka Araç Gövde Parçası_1 İçin Oluşturulan Çekme Prosesi Yüzeyleri.....	75
Şekil 5.3	Arka Araç Gövde Parçası_1 İçin Kesme ve Delme Hatları	75
Şekil 5.4	Arka Araç Gövde Parçası_1 İçin Kulak Büküm Hatları.....	76
Şekil 5.5	Arka Araç Gövde Parçası_1	76
Şekil 5.6	Arka Araç Gövde Parçası_1 Çekme Prosesi Alt ve Üst Kalıp.....	77
Şekil 5.7	Arka Araç Gövde Parçası_1 Kesme Prosesi Alt ve Üst Kalıp	77
Şekil 5.8	Arka Araç Gövde Parçası_1 Bükme Prosesi Alt ve Üst Kalıp.....	78
Şekil 5.9	Arka Araç Gövde Parçası_1 için Sac Malzemenin Boyutları	78
Şekil 5.10	Arka Araç Gövde Parçası_1 için Çekme Prosesi Simülasyonu	80
Şekil 5.11	Arka Araç Gövde Parçası_1 için Kesme Prosesi Simülasyonu.....	80
Şekil 5.12	Arka Araç Gövde Parçası_1 için bükme Prosesi Simülasyonu	81
Şekil 5.13	Arka Araç Gövde Parçası_1 için Tasarlanan Süzdürme Çubuğu .	81
Şekil 5.14	Arka Araç Gövde Parçası_1 için Süzdürme Çubuğu Yarıçapları..	82
Şekil 5.15	Arka Araç Gövde Parçası_1 için Süzdürme Çubuğu Kullanılmadan Yapılan Geri Yaylanma Analizi.....	82
Şekil 5.16	Arka Araç Gövde Parçası_1 için Süzdürme Çubuğu Yarıçapı 4 Olacak Şekilde Yapılan Geri Yaylanma Analizi	83
Şekil 5.17	Arka Araç Gövde Parçası_1 için Süzdürme Çubuğu Yarıçapı 7.5 Olacak Şekilde Yapılan Geri Yaylanma Analizi	83
Şekil 5.18	Arka Araç Gövde Parçası_1 için Sonlu Elemanlar Analizi İçin Yapılan Ölçüm Bölgeleri	83
Şekil 5.19	Arka Araç Gövde Parçası_1 için Reel Ortamda Üretimi Yapılan Parçanın Cad Data ile Karşılaştırılması	85

Şekil 5.20	Arka Araç Gövde Parçası_1 için Reel Ortamda Üretimi Yapılan Parçanın Cad Data ile Karşılaştırılması	85
Şekil 5.21	Arka Araç Gövde Parçası_1 için Malzeme Kalınlığı 0.8 mm ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi	87
Şekil 5.22	Arka Araç Gövde Parçası_1 için Malzeme Kalınlığı 1.2 mm ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi	87
Şekil 5.23	Arka Araç Gövde Parçası_1 için Malzeme Kalınlığı 1.6 mm ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi	88
Şekil 5.24	Arka Araç Gövde Parçası_1 için Malzeme Kalınlığı 2.0 mm ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi	88
Şekil 5.25	Arka Araç Gövde Parçası_1 için Malzeme Kalınlığı 2.4 mm ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi	88
Şekil 5.26	Arka Araç Gövde Parçası_1 için Elastiste Modülü 210000 Mpa ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi	89
Şekil 5.27	Arka Araç Gövde Parçası_1 için Elastiste Modülü 215000 Mpa ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi	90
Şekil 5.28	Arka Araç Gövde Parçası_1 için Elastiste Modülü 220000 Mpa ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi	90
Şekil 5.29	Arka Araç Gövde Parçası_1 için Elastiste Modülü 2250000 Mpa ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi	90
Şekil 5.30	Arka Araç Gövde Parçası_1 için Elastiste modülü 230000 Mpa ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi	91
Şekil 5.31	Arka Araç Gövde Parçası_2	92
Şekil 5.32	Arka Araç Gövde Parçası_2 Cad Datası	92
Şekil 5.33	Arka Araç Gövde Parçası_2 için Oluşturulan Çekme Prosesi Yüzeyi	93
Şekil 5.34	Arka Araç Gövde Parçası_2 için Kesme ve Delme Hatları	93
Şekil 5.35	Arka Araç Gövde Parçası_2 için Kulak Büküm Hatları.....	93
Şekil 5.36	Arka Araç Gövde Parçası_2 için Delme-Kamlı Delme Hatları.....	94
Şekil 5.37	Arka Araç Gövde Parçası_2 için Kamlı Büküm Hatları.....	94
Şekil 5.38	Arka Araç Gövde Parçası_2 için Çekme Prosesi Alt ve Üst Kalıp...	95
Şekil 5.39	Arka Araç Gövde Parçası_2 için Kesme ve Delme Prosesi Alt ve Üst Kalıp	95
Şekil 5.40	Arka Araç Gövde Parçası_2 için Bükme Prosesi Alt ve Üst Kalıp...	96
Şekil 5.41	Arka Araç Gövde Parçası_2 için Delme Prosesi Alt ve Üst Kalıp....	96
Şekil 5.42	Arka Araç Gövde Parçası_2 için Delme-Kamlı Delme Prosesi Alt ve Üst Kalıp.....	97
Şekil 5.43	Arka Araç Gövde Parçası_2 için Kamlı Bükme Prosesi Alt ve Üst Kalıp	97

Şekil 5.44	Arka Araç Gövde Parçası_2 için Sac Malzemenin Boyutları.....	98
Şekil 5.45	Arka Araç Gövde Parçası_2 için Çekme Prosesi Simülasyonu	99
Şekil 5.46	Arka Araç Gövde Parçası_2 için Kesme ve Delme Prosesi Simülasyonu	99
Şekil 5.47	Arka Araç Gövde Parçası_2 için Bükme Prosesi Simülasyonu.....	99
Şekil 5.48	Arka Araç Gövde Parçası_2 için Delme-Kamlı Delme Prosesi Simülasyonu	100
Şekil 5.49	Arka Araç Gövde Parçası_2 için Kamlı Bükme Prosesi Simülasyonu	100
Şekil 5.50	Arka Araç Gövde Parçası_2 için Süzdürme Çubuğu.....	101
Şekil 5.51	Arka Araç Gövde Parçası_2 için Süzdürme Çubuğu Yarıçapları...	101
Şekil 5.52	Arka Araç Gövde Parçası_2 için Süzdürme Çubuğu Kullanılmadan Yapılan Geri Yaylanma Analizi	102
Şekil 5.53	Arka Araç Gövde Parçası_2 için Süzdürme Çubuğu Yarıçapı 3 Olacak Şekilde Yapılan Geri Yaylanma Analizi.....	102
Şekil 5.54	Arka Araç Gövde Parçası_2 için Süzdürme Çubuğu Yarıçapı 4 Olacak Şekilde Yapılan Geri Yaylanma Analizi.....	102
Şekil 5.55	Arka Araç Gövde Parçası_2 için Süzdürme Çubuğu Yarıçapı 7 Olacak Şekilde Yapılan Geri Yaylanma Analizi.....	102
Şekil 5.56	Arka Araç Gövde Parçası_2 için Sonlu Elemanlar Analizi için Yapılan Ölçüm Bölgeleri.....	103
Şekil 5.57	Arka Araç Gövde Parçası_2 için Reel Ortamda Üretimi Yapılan Parçanın Cad Data ile Karşılaştırılması	104
Şekil 5.58	Arka Araç Gövde Parçası_2 için Malzeme Kalınlığı 0.5 mm ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi	106
Şekil 5.59	Arka Araç Gövde Parçası_2 için Malzeme Kalınlığı 0.9 mm ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi	106
Şekil 5.60	Arka Araç Gövde Parçası_2 için Malzeme Kalınlığı 1.3 mm ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi	106
Şekil 5.61	Arka Araç Gövde Parçası_2 için Malzeme Kalınlığı 1.8 mm ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi	107
Şekil 5.62	Arka Araç Gövde Parçası_2 için Malzeme Kalınlığı 2.2 mm ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi	107
Şekil 5.63	Arka Araç Gövde Parçası_2 için Elastite Modülü 206000 Mpa ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi	108
Şekil 5.64	Arka Araç Gövde Parçası_2 için Elastite Modülü 210000 Mpa ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi	108
Şekil 5.65	Arka Araç Gövde Parçası_2 için Elastite Modülü 215000 Mpa ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi	108

Şekil 5.66	Arka Araç Gövde Parçası_2 için Elastiste Modülü 220000 Mpa ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi	108
Şekil 5.67	Arka Araç Gövde Parçası_2 için Elastiste Modülü 225000 Mpa ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi	109
Şekil 5.68	Orta Direk Parçası.....	110
Şekil 5.69	Orta Direk Parçası için Oluşturulan Form Prosesi Yüzeyi	110
Şekil 5.70	Orta Direk Parçası için Oluşturulan Kesme ve Delme Hatları	111
Şekil 5.71	Orta Direk Parçası için Oluşturulan Büküm Yüzeyi	111
Şekil 5.72	Orta Direk Parçası için Oluşturulan Delme-Kamlı Delme-Kamlı Kesme Hataları	111
Şekil 5.73	Orta Direk Parçası için Form Prosesi Alt ve Üst Kalıp	112
Şekil 5.74	Orta Direk Parçası için Delme-Kesme Prosesi Alt ve Üst Kalıp	112
Şekil 5.75	Orta Direk Parçası için Bükme Prosesi Alt ve Üst Kalıp	113
Şekil 5.76	Orta Direk Parçası için Delme-Kamlı Delme ve Kamlı Kesme Prosesi Alt ve Üst Kalıp	113
Şekil 5.77	Orta Direk Parçası için Sac Malzemenin Boyutları	114
Şekil 5.78	Orta Direk Parçası için Form Prosesi Simülasyonu	115
Şekil 5.79	Orta Direk Parçası için Kesme ve Delme Prosesi Simülasyonu.....	115
Şekil 5.80	Orta Direk Parçası için Bükme Prosesi Simülasyonu	115
Şekil 5.81	Orta Direk Parçası için Kamlı Kesme, Delme ve Kamlı Delme Prosesi simülasyonu	116
Şekil 5.82	Orta Direk Parçası için Parçada Tolerans Dışında Kalan Bölgelerin Geri Yaylanma Yüzeyleri.....	116
Şekil 5.83	Orta Direk Parçası için Geri Yaylanma Telafi Yüzeyi ile Referans Yüzeyin Gom Inspect Programında Karşılaştırılması	117
Şekil 5.84	Orta Direk Parçası için Yer Değiştirme Yöntemi Uygulandıktan Sonra Geri Yaylanma Yüzeyleri	117
Şekil 5.85	Orta Direk Parçası için Sonlu Elemanlar Analizi için Yapılan Ölçüm Bölgeleri	118
Şekil 5.86	Orta Direk Parçası için Reel Ortamda Üretimi Yapılan Parçanın Cad Data ile Karşılaştırılması	119
Şekil 5.87	Orta Direk Parçası için Malzeme Kalınlığı 0.6 mm ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi.....	121
Şekil 5.88	Orta Direk Parçası için Malzeme Kalınlığı 1 mm ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi.....	121
Şekil 5.89	Orta Direk Parçası için Malzeme Kalınlığı 1.4 mm ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi.....	121

Şekil 5.90	Orta Direk Parçası için Malzeme Kalınlığı 1.8 mm ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi.....	122
Şekil 5.91	Orta Direk Parçası için Malzeme Kalınlığı 2.2 mm ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi.....	122
Şekil 5.92	Orta Direk Parçası için Elastiste Modülü 206000 Mpa ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi	123
Şekil 5.93	Orta Direk Parçası için Elastiste Modülü 210000 Mpa ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi	123
Şekil 5.94	Orta Direk Parçası için Elastiste Modülü 215000 Mpa ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi	124
Şekil 5.95	Orta Direk Parçası için Elastiste Modülü 220000 Mpa ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi	124
Şekil 5.96	Orta Direk Parçası için Elastiste Modülü 225000 Mpa ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi	124
Şekil 5.97	Kapı Kolu Parçası	125
Şekil 5.98	Kapı Kolu Parçası Çekme Prosesi Yüzeyi	126
Şekil 5.99	Kapı Kolu Parçası için Oluşturulan Kesme ve Delme Hatları	126
Şekil 5.100	Kapı Kolu Parçası için Kesme ve Delme Hatları.....	126
Şekil 5.101	Kapı Kolu Parçası için Bükme Hattı.....	126
Şekil 5.102	Kapı Kolu Parçası için Çekme Prosesi Alt ve Üst Kalıp.....	127
Şekil 5.103	Kapı Kolu Parçası 1. Kesme-Delme Prosesi Alt ve Üst Kalıp.....	127
Şekil 5.104	Kapı Kolu Parçası 2. Kesme-Delme Prosesi Alt ve Üst Kalıp.....	128
Şekil 5.105	Kapı Kolu Parçası Bükme Prosesi Alt ve Üst Kalıp	128
Şekil 5.106	Kapı Kolu Parçası Sac Malzeme Boyutları	129
Şekil 5.107	Kapı Kolu Parçası Çekme Prosesi Simülasyonu	130
Şekil 5.108	Kapı Kolu Parçası 1.ve 2. Kesme ve Delme Prosesi Simülasyonu.....	130
Şekil 5.109	Kapı Kolu Parçası Bükme Prosesi Simülasyonu	130
Şekil 5.110	Kapı Kolu Parçası için Parçada Tolerans Dışında Kalan Bölgelerin Geri Yaylanma Yüzeyleri.....	131
Şekil 5.111	Kapı Kolu Parçası için Geri Yaylanma Telafi Yüzeyi ile Referans Yüzeyin.....	131
Şekil 5.112	Kapı Kolu Parçası için Yer Değiştirme Yöntemi Uygulandıktan Sonra Geri Yaylanma Yüzeyleri	132
Şekil 5.113	Kapı Kolu Parçası için Sonlu Elemanlar Analizi için Yapılan Ölçüm Bölgeleri	132
Şekil 5.114	Kapı Kolu Parçası için Reel Ortamda Üretimi Yapılan Parçanın Cad Data ile Karşılaştırılması.....	134

Şekil 5.115	Kapı Kolu Parçası için Malzeme Kalınlığı 1.6 mm ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi.....	135
Şekil 5.116	Kapı Kolu Parçası için Malzeme Kalınlığı 2 mm ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi.....	135
Şekil 5.117	Kapı Kolu Parçası için Malzeme Kalınlığı 2.4 mm ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi.....	136
Şekil 5.118	Kapı Kolu Parçası için Malzeme Kalınlığı 2.8 mm ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi.....	136
Şekil 5.119	Kapı Kolu Parçası için Malzeme Kalınlığı 3.2 mm ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi.....	136
Şekil 5.120	Kapı Kolu Parçası için Elastiste Modülü 210000 Mpa ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi	137
Şekil 5.121	Kapı Kolu Parçası için Elastiste Modülü 215000 Mpa ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi	137
Şekil 5.122	Kapı Kolu Parçası için Elastiste Modülü 220000 Mpa ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi	138
Şekil 5.123	Kapı Kolu Parçası için Elastiste Modülü 225000 Mpa ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi	138
Şekil 5.124	Kapı Kolu Parçası için Elastiste Modülü 230000 Mpa ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi	138
Şekil 5.125	Zemin Üye Parçası.....	139
Şekil 5.126	Zemin Üye Parçası Cad Datası	139
Şekil 5.127	Zemin Üye Parçası için Kesme ve Delme Hatları.....	140
Şekil 5.128	Zemin Üye Parçası için Bükme Hatları.....	140
Şekil 5.129	Zemin Üye Parçası için Kamlı Bükme Hatları.....	140
Şekil 5.130	Zemin Üye Parçası için Delme-Kamlı Delme ve Ayırma Hatları...	140
Şekil 5.131	Zemin Üye Parçası için Kesme-Delme Kalıbı	141
Şekil 5.132	Zemin Üye Parçası için Form-Bükme Kalıbı	141
Şekil 5.133	Zemin Üye Parçası için Kamlı Bükme Kalıbı.....	142
Şekil 5.134	Zemin Üye Parçası için Delme-Kamlı Delme-Ayırma Kalıbı.....	142
Şekil 5.135	Zemin Üye Parçası için Sac Malzemenin Boyutları.....	143
Şekil 5.136	Zemin Üye Parçası için Kesme-Delme Prosesi Simülasyonu	144
Şekil 5.137	Zemin Üye Parçası için Form-Bükme Prosesi Simülasyonu	144
Şekil 5.138	Zemin Üye Parçası için Kamlı Bükme Prosesi Simülasyonu.....	144
Şekil 5.139	Zemin Üye Parçası için Geri Yaylanma Simülasyon Sonuçları.....	145
Şekil 5.140	Zemin Üye Parçası için Sonlu Elemanlar Analizi Yapılan Ölçüm Bölgeleri	145

Şekil 5.141	Zemin Üye Parçası için Reel Ortamda Üretimi Yapılan Parçanın Cad Data ile Karşılaştırılması.....	146
Şekil 5.142	Zemin Üye Parçası için Malzeme Kalınlığı 1.6 mm ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi.....	148
Şekil 5.143	Zemin Üye Parçası için Malzeme Kalınlığı 2 mm ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi.....	148
Şekil 5.144	Zemin Üye Parçası için Malzeme Kalınlığı 2.4 mm ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi.....	149
Şekil 5.145	Zemin Üye Parçası için Malzeme Kalınlığı 2.8 mm ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi.....	149
Şekil 5.146	Zemin Üye Parçası için Malzeme Kalınlığı 3.2 mm ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi.....	149
Şekil 5.147	Zemin Üye Parçası için Elastiste Modülü 206000 Mpa ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi	150
Şekil 5.148	Zemin Üye Parçası için Elastiste Modülü 210000 Mpa ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi	150
Şekil 5.149	Zemin Üye Parçası için Elastiste Modülü 215000 Mpa ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi	150
Şekil 5.150	Zemin Üye Parçası için Elastiste Modülü 220000 Mpa ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi	151
Şekil 5.151	Zemin Üye Parçası için Elastiste Modülü 225000 Mpa ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi	151

TABLO LİSTESİ

Tablo 5.1	Sonlu Elemanlar Analizlerinde Kullanılan Malzeme Modelleri....	73
Tablo 5.2	Autoform Analizlerinde Kullanılan Uyumlu Birim Sistemi.....	73
Tablo 5.3	SCGA270C-45 Sac Malzemenin Özellikleri.....	79
Tablo 5.4	Arka Araç Gövde Parçası_1 için Sonlu Elemanlar Simülasyon Sonuçlarının Ortalamasını mm Cinsinden İfade Eden Temsili Yüzeye Ait Geri Yaylanma Sonuçları.....	84
Tablo 5.5	Arka Araç Gövde Parçası_1 için Geri Yaylanma Sonlu Elemanlar Simülasyon Sonuçlarının Reel Ortamda Üretimi Yapılan Parça ile Karşılaştırılması	86
Tablo 5.6	Arka Araç Gövde Parçası_1 için Malzeme Kalınlığının Geri Yaylanma Sonuçlarına Etkisi	89
Tablo 5.7	Arka Araç Gövde Parçası_1 için Elastisite Modülünün Geri Yaylanma Sonuçlarına Etkisi	91
Tablo 5.8	SPC270C_C-055 Sac Malzemenin Özellikleri.....	98
Tablo 5.9	Arka Araç Gövde Parçası_2 için Sonlu Elemanlar Simülasyon Sonuçlarının Ortalamasını mm Cinsinden İfade Eden Temsili Yüzeye Ait Geri Yaylanma Sonuçları.....	103
Tablo 5.10	Arka Araç Gövde Parçası_2 için Geri Yaylanma Sonlu Elemanlar Simülasyon Sonuçlarının Reel Ortamda Üretimi Yapılan Parça ile Karşılaştırılması	105
Tablo 5.11	Arka Araç Gövde Parçası_2 için Malzeme Kalınlığının Geri Yaylanma Sonuçlarına Etkisi	107
Tablo 5.12	Arka Araç Gövde Parçası_2 için Elastisite Modülünün Geri Yaylanma Sonuçlarına Etkisi	109
Tablo 5.13	SPC440_C_100 Sac Malzemenin Özellikleri.....	114
Tablo 5.14	Orta Direk Parçası için Sonlu Elemanlar Simülasyon Sonuçlarının Ortalamasını mm Cinsinden İfade Eden Temsili Yüzeye Ait Geri Yaylanma Sonuçları.....	118
Tablo 5.15	Orta Direk Parçası için Geri Yaylanma Sonlu Elemanlar Simülasyon Sonuçlarının Reel Ortamda Üretimi Yapılan Parça ile Karşılaştırılması	119
Tablo 5.16	Arka Araç Gövde Parçası_2 için Malzeme Kalınlığının Geri Yaylanma Sonuçlarına Etkisi	122
Tablo 5.17	Orta Direk Parçası için Elastisite Modülünün Geri Yaylanma Sonuçlarına Etkisi.....	125
Tablo 5.18	SCGA980DUB-45 Sac Malzemenin Özellikleri.....	129

Tablo 5.19	Kapı Kolu Parçası için Sonlu Elemanlar Simülasyon Sonuçlarının Ortalamasını mm Cinsinden İfade Eden Temsili Yüzeye Ait Geri Yaylanma Sonuçları.....	133
Tablo 5.20	Kapı Kolu Parçası için Geri Yaylanma Sonlu Elemanlar Simülasyon Sonuçlarının Reel Ortamda Üretimi Yapılan Parça ile Karşılaştırılması	134
Tablo 5.21	Kapı Kolu Parçası için Malzeme Kalınlığının Geri Yaylanma Sonuçlarına Etkisi.....	137
Tablo 5.22	Kapı Kolu Parçası için Elastisite Modülünün Geri Yaylanma Sonuçlarına Etkisi.....	138
Tablo 5.23	SCGA590DU-45 Sac Malzemenin Özellikleri.....	143
Tablo 5.24	Zemin Üye Parçası için Sonlu Elemanlar Simülasyon Sonuçlarının Ortalamasını mm Cinsinden İfade Eden Temsili Yüzeye Ait Geri Yaylanma Sonuçları.....	146
Tablo 5.25	Zemin Üye Parçası için Geri Yaylanma Sonlu Elemanlar Simülasyon Sonuçlarının Reel Ortamda Üretimi Yapılan Parça ile Karşılaştırılması	147
Tablo 5.26	Zemin Üye Parçası için Malzeme Kalınlığının Geri Yaylanma Sonuçlarına Etkisi.....	149
Tablo 5.27	Zemin Üye Parçası için Elastisite Modülünün Geri Yaylanma Sonuçlarına Etkisi.....	151

Sac Parçaların Tasarımında Geri Yaylanma Parametrelerinin Etkisi

Ali BAKİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Muharrem Erdem BOĞOÇLU

Otomotiv endüstrisindeki birçok ürün çekme prosesi işlemiyle üretilmektedir. Araçlar şekillendirme aşamasından sonra serbest bırakıldıklarında, iç gerilmelerin etkisiyle ürün geri yaylanmaya maruz kalır. Sac metal ürünler için geometrik toleranslar sıkı olabileceğinden, bu şekil sapması kabul edilemez. Çoğu durumda malzemelerin geri yaylanma telafisine ihtiyaç duyulmaktadır. Çekme prosesinin araçları değiştirilerek ürün geometrik olarak doğrulanır. Sektörde, prototip ürünlerin üretilmesi ve araçları manuel olarak yeniden tasarlamak maliyetli ve zaman alıcı bir süreçtir.

Geri yaylanma problemlerini değerlendirmek için ana faktörler sadece geometrik doğruluk değil, aynı zamanda montaj kuvvetleridir. Bazı durumlarda, ürün montaj sırasında doğru şekle bükülebilir. Bazı ürünler için bu kuvvetler çok yüksek veya montajlanan bu ürünün şekli kabul edilemez. Bunun telafisi için öncelikle parçanın geri yaylanma problemini çözmektir. Çekme prosesi işlemi çeşitli şekillerde kalıp boşluğuna malzeme akışını etkilemek suretiyle optimize edilebilir. Parça' da yapıyı yeniden tasarlamak da etkili olabilir.

Ürün tasarımı optimize edilse ve çekme prosesi işlemi dikkatli bir şekilde yapılırsa dahi geri yaylanma telafisi birçok ürünün geometrik doğruluğunu iyileştirmek için uygulanmalıdır. Sektörde geri yaylanma kompanizasyon işlemini hızlandırmak için şu anda bile endüstride test edilen gerçek prototip araçların yerine sonlu elemanlar hesaplamaları kullanılmaktadır. Çeşitli geri yaylanma telafi algoritmaları raporlanmış ve bilimsel literatürde test edilmiştir.

Bu çalışmada, 5 farklı geometri ve kalınlığa sahip 270 MPa, 440 MPa, 590 MPa ve 980 MPa çekme mukavemet değerine sahip araç gövde parçasının çekme ve form prosesi süreci sonunda geri yaylanma davranışları incelenmiş ve geri yaylanma telafi algoritması uygulanmıştır. Sonlu elemanlar programında uygulanan geri yaylanma telafi algoritması sonucunda kalıp tasarım parametreleri dikkate

alınarak kalıp tasarımı yapılmıştır. Testler ve değerlendirmeler bölümünde sayısal ve deneysel veriler incelenmiş karşılaştırmalar yapılmıştır. Aynı zamanda 5 farklı parçanın malzeme kalınlığı ve elastisite modülünün geri yaylanmaya etkileri incelenmiştir. Tartışma bölümünde ise 270 MPa, 440 MPa, 590 MPa ve 980 MPa çekme mukavemet değerine sahip malzemelerin geri yaylanma davranışlarının yorumu yapılmıştır. Bu çalışmada geri yaylanma telafisi için kontrol yüzeyi algoritması ve yer değiştirme yöntemi geliştirilmiştir.

Parametrelerin sınırlı kurulumlu bir yüzeyi, çekme prosesi araçlarını değiştirmek, istenilen ürün şekli ve çekme prosesi ürününü değerlendirme ve kıyaslamada kullanılır. Parça yapısında yer değiştirme yönteminin fikri araçların geometrisini telafi fonksiyonu olarak kullanılan negative faktör ile çarpma çekme prosesi ürünü ile istenilen şekil arasında kullanılan bir yöntemdir. Kontrol yüzeyi ile, yer değiştirme yöntemi telafi için tekrar kullanılır. Kontrol yüzeyi şekil değişikliklerinin bükme, burulma gibi sadece sınırlı kurulumlu bir yüzeyine izin verir. Aynı zamanda, bu yöntemin avantajları geometri değişikliklerinin cad sistemli uygulanabilmesi ve algoritmaların manuel olarak kontrol edilebilmesidir.

CAD dosyalarındaki düzgün ve sürekli geometri tanımlaması, çekme prosesi araçlarını üreten işleme robotu işleme kodunun yönetimi için gereklidir. Dolayısıyla, algoritmayı kullanışlı kılmak için takım kafeslerine uygulanan geometri modifikasyonunun CAD verilerine uygulanması gerekir. CAD dosyaları ve kafesleri birbiriyle uyumlu olmayan bir tanımlamaya sahip oldukları için kalıp yüzeyi işlemleri uygun olmayabilir.

Sonlu elemanlar çekme prosesi simülasyonları ve geri esneme kompanzasyon algoritması ile çekme proses işleminin proses kurulumu gelecekte önemli ölçüde daha hızlı hale gelecektir.

Anahtar Kelimeler: geri yaylanma, geri yaylanma telafi algoritması, sonlu elemanlar analizi, çekme prosesi

Effect of Springback Parameters in the Design of Sheet Parts

Ali BAKİ

Department of Mechanical Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Assist. Prof. Muharrem Erdem BOĞOÇLU

Many products in the automotive industry are produced with the drawing process. When the tools are released after the forming stage, the product springs back due to the action of internal stresses. Because the geometric tolerances can be tight for sheet metal products, this shape deviation can be unacceptable. In many cases springback compensation is needed: the tools of the drawing process are changed so, that the product becomes geometrically accurate. In the industry, this is currently a costly and time consuming process of producing prototype products and redesigning the tools manually.

To evaluate springback problems, the main factors are not only the geometrical accuracy but also the assembly forces; In some cases, the product can be bent back into the right shape during assembly. For some products, these forces are too high, or the shape of the assembled product may be unacceptable. Then, the first goal is to reduce springback. The drawing process can be optimised in various ways, mainly by influencing the material flow into the die cavity. Redesigning the structure of the product can be effective as well.

Even when the product design has been optimised, and the drawing process has been set up carefully, springback compensation has to be carried out to improve the geometrical accuracy of many products. To speed up the manual springback compensation process, the use of finite elements calculations instead of real prototype tools is currently tested in the industry. Several completely automatic springback compensation algorithms have been reported and tested in scientific literature.

In this study, At the end of the form and drawing process, the springback behaviors of the vehicle body part with the tensile strength values of 270 MPa, 440 MPa, 590 MPa and 980 MPa with 5 different geometry and thickness were examined and the springback compensation algorithm was applied. As a result of the back-spring compensation algorithm applied in the finite element program, the die

design is made considering the die design parameters. In the tests and evaluations, numerical and experimental data were examined and compared. At the same time, the material thicknesses of the five different parts and the effects of the elasticity modulus on the springback were investigated. In the discussion section, the springback behaviors of materials with tensile strength values of 270 MPa, 440 MPa, 590 MPa and 980 MPa were interpreted. In this study, the control surface algorithm and displacement method were developed for springback compensation.

A limited set of parameters is used to change the drawing process tools, to compare and evaluate the desired product shape and the drawing process product. The method of displacement in the square structure is a method used between the drawing process product and the desired shape with the negative factor used as the compensation function. With the control surface, the displacement method is reused to compensate. The control surface allows only a limited surface area of the shape changes, such as bending, torsion. The advantage of this method is that the geometry change can be implemented with CAD system and the algorithms can be controlled manually.

Proper and continuous geometry definition in CAD files is required for the management of the machining robot machining code that generates the drawing process tools. Therefore, in order to make the algorithm useful, the geometry modification applied to the tool cages must be applied to CAD data. Since CAD files and meshes have a definition that is not compatible with each other, the surface of the die surface may not be suitable.

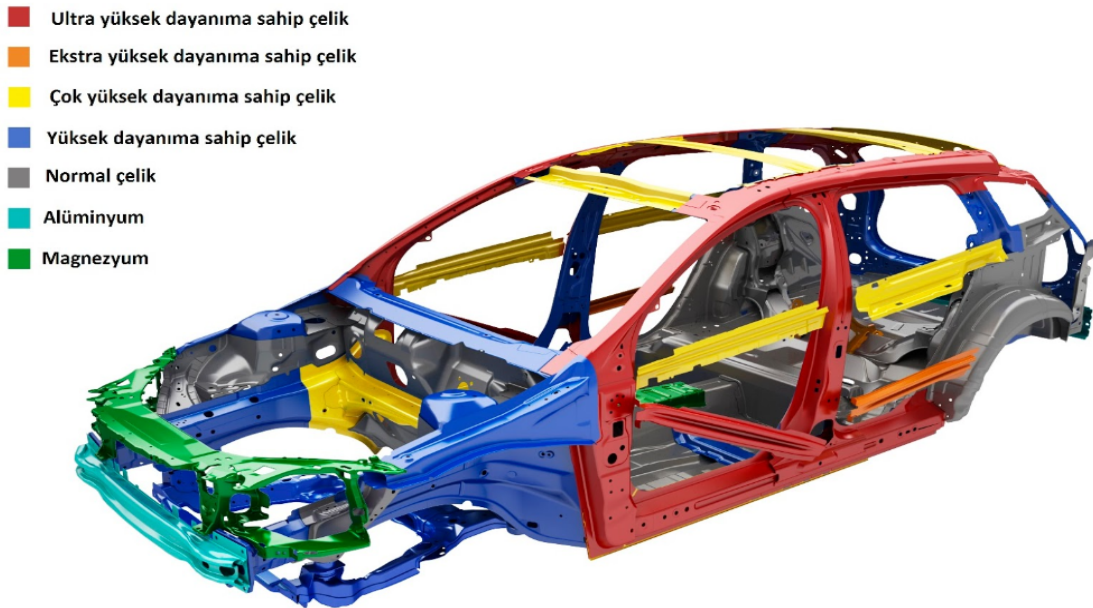
With the finite element drawing simulation and the springback compensation algorithm, the process setup of the drawing process will become significantly faster in the future.

Keywords: springback, springback compensation algorithm, finite element analysis, drawing proc

1.1 Literatür Özeti

Çekme prosesi, otomotiv endüstrisinde en yaygın üretim süreçlerinden biridir. Çekme prosesi ile üretilmiş ürünler, kapı panelleri, motor kaputları ve yan darbe koruma barları gibi otomobil gövdesinin yapısal parçalarıdır. Bu ürünler için geometrik toleranslar sıkıdır ve araçlar pahalıdır. Bu nedenle, doğru proses planlaması önemlidir.

Çekme prosesi simülasyonlarında büyük gelişmeler olmuştur ve artık nihai ürünün şekli, iç gerilimleri ve proses kuvvetlerini tahmin edebiliyoruz. Şekillendirme aşamasından sonra kuvvetlerin çekilmesi üzerine, ürün iç gerilimler nedeniyle geri yaylanır. Araba gövdesi panelleri için bu geri yaylanma deformasyonları birkaç milimetreye kadar büyük olabilir. Hafif ürünler için kullanılan yüksek mukavemetli çelikler ve alüminyumun, özellikle yüksek gerilme deformasyonlarına sahip olduğu bilinmektedir. Şekil 1.1’de gösterildiği gibi, bu yüksek mukavemetli çelikler, modern otomobillerin gövde bölümlerinin %60’ından fazlasında zaten kullanılmaktadır.



Şekil 1.1 Farklı Dayanıma Sahip Çeliklerin Örnek Bir Araçta Kullanım Yerleri

Ürün şekil gerekliliklerini karşılamadığında, çekme prosesi araçları manuel olarak yeniden tasarlandığından, geri esneme nedeniyle oluşan şekil sapmaları telafi edilir. Bu, karmaşık ve pahalı bir işlemdir, çünkü geri yaylanma oldukça büyük olabilir. Geri yaylanma sorunu da her ürün için farklıdır. Artık, imalat araçları, bir prototip ürün hazırlama, ölçme, CAD verilerini değiştirme ve presleme araçlarını yeniden işleme bir deneme yanılma işlemidir. Bu işlem için, çok fazla geliştirme süresi ve mühendislik deneyimi gereklidir.

Geri yaylanma aslında, ancak münhasıran değil, elastik bir deformasyondur. Tabii ki, elastik deformasyon nispeten kolayca hesaplanabilir, ancak geri yaylanmanın hesaplanması, çekme proses aşamasından sonra dahili gerilmelere oldukça bağımlı olduğu için sorunludur. Sonlu elemanlar hesaplamalarında iç gerilmelerin öngörülebilirliği zayıftır. Bu kısmen gerçekçi sürtünme ve bağlantı algoritmaları eksikliği nedeniyle oluşur. Çekme proses süreçlerinde geri yaylanma etkilerinin hesabı, Autoform ve çeşitli ticari sonlu elemanlar yazılım paketleri için uygulanmıştır. Artık bu sonuçları, araçların CAD dosyalarını doğrudan değiştirmek için kullanmak ve şekil değişikliğinin başarılı olup olmadığını kontrol etmek için yeni bir simülasyon yapmak mümkündür. Başka bir deyişle, sonlu elemanlar hesabı optimizasyon döngüsüne alınır.

Optimize edilmiş geometrik veriler, hemen takım üretiminde kullanılan NC kodunun temelini oluşturan yeni bir CAD dosyasına aktarılır. Bu şekilde, pahalı prototip testlerinden kaçınılabilir ve tasarım optimizasyonu fazı daha etkili, daha hızlı ve daha düşük maliyetli olacaktır.

Literatürde, geri yaylanmanın tahmini ve telafisine yönelik pek çok çalışma bulunmaktadır. Samuel vd. [1] U-kanal büküm problemini incelediği çalışmada, bulunmaktadır. Samuel vd. [1] U-kanal büküm problemini incelediği çalışmada, mekanik özelliklere sahip alüminyum malzemelerin geri yaylanma davranışlarını incelemişlerdir. Bu çalışmada, akma gerilmesi arttıkça geri yaylanmanın da arttığını gözlemişlerdir. Andersson [2] yaptığı çalışmada, farklı malzemelerin geri yaylanma davranışlarını incelemiş ve deneysel çalışmaları sonlu elemanlar yöntemiyle karşılaştırmıştır. Onipede ve Gomes [3] alüminyum malzemedeki anizotropinin geri yaylanma üzerindeki etkilerini, U-kanal büküm

problemi üzerinden incelemiştir. Yaptıkları çalışmada haddeleme yönünde geri yaylanmanın en az olduğunu göstermişlerdir. Zhang vd. [4] geliştirdikleri analitik modeli, Numisheet93'te (International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes) verilen U-kanal büküm problemine uygulamışlardır. Diğer bir analitik model Behrouzi vd. [5] tarafından, asimetrik büküm işlemi için sunulmuştur. Behrouzi vd. geri yaylanmadaki hatayı telafi etmek ve kalıp tasarımı için, hedef formu dikkate alan ters algoritma kullanmışlardır. Geleneksel analitik modellerden farklı olarak, Yi vd. [6] geri yaylanmanın tahmininde, altı farklı deformasyon bölgesi için artık diferansiyel gerinimi temel alarak analitik denklemler geliştirmişlerdir. Kalıp geometrisi, sacın mekanik özellikleri, yağlama, işlem parametreleri gibi birçok parametrenin fonksiyonu olan geri yaylanmanın analitik olarak belirlenmesi oldukça zordur. Geri yaylanma gibi lineer davranış göstermeyen bir sistemin modellenmesi ve kontrolü için, birçok araştırmacı yapay sinir ağları kullanmıştır. Ruffini ve Cao [7] alüminyum alaşımlı kanal büküm problemine, yapay sinir ağlarını uygulayarak değişken baskı plakası kuvveti altında, sacda hasar oluşmaksızın geri yaylanma miktarını azaltma çalışması gerçekleştirmişlerdir. Büküm öncesinde üzerinde delik bulunan sacın, "L" büküm operasyonu sonucunda oluşan geri yaylanmanın tahmini üzerinde yapılan çalışmada, Farsi ve Arezo [8] yapay sinir ağlarını kullanmışlardır. Bu çalışmada işlem parametreleri, baskı plakası kuvvetinin delik büyüklüğü de eğitim aşamasında girdi olarak kullanılmıştır. Analitik modeller zamandan ve maliyetten kazanç sağlamaktadır, ancak sadece basit geometrilere uygulanabilmektedir. Kalıp üretildikten sonra, nihai parçalar üzerinde deneyler yapmak ise maliyeti yüksek oranda artırıcı bir unsurdur. Günümüzde, geri yaylanmanın tahmininde sonlu elemanlar yöntemi yaygın bir şekilde. Ancak benzetim sonuçlarının yüksek oranda hata miktarına sahip olması, bu çalışmaların kalıp tasarımında doğrudan kullanılmasını engellemektedir [9-11]. Sonlu elemanlar analizlerinde ve analitik çözümlerde, malzeme modelini oluştururken, deformasyon sonucunda oluşan gerilme dağılımını hassas bir şekilde tanımlayabilmek için Bauschinger etkisi dikkate alınmalıdır. Böylece daha doğru benzetim sonuçları elde edilebilir. Gau ve Kinzel [12] deneysel çalışmaları dikkate Bauschiger etkisini dâhil ettikleri pekleşme modelini oluşturmuşlardır. Fırat, [13]

kinematik pekleşme modeline dayanan açık formülasyonlu sonlu elemanlar analizini kullandığı çalışmada, deneysel sonuçlar dikkate alındığında, kinematik pekleşme modeli ile izotropik pekleşme modeline göre dört kat daha gelişmiş sonuçlar elde etmiştir. Liu vd. [14] basamak olarak artan değişken baskı plakası kuvvetini önerdikleri çalışmada yüksek baskı plakası kuvveti ile geri yaylanmanın etkili bir şekilde azaltıldığını göstermişlerdir. Gan ve Wagoner [16], geri yaylanma düzeltme yöntemi adını verdikleri yöntemde, geri yaylanma miktarını en aza indirecek kalıp geometrisinin elde edilmesini amaçlamışlardır. Bu yöntemde, geri yaylanmış parçanın ve hedef geometrinin yüzeyleri arasındaki fark ölçülüp, ardaki fark doğrudan dikkate alınarak kalıp geometrisinde yapılan değişiklikler ile hedef geometriye ulaşılabilmektedir. Ancak, karmaşık geometriye sahip yüzeylerde, çok fazla en yenileme (iterasyon) çalışması gerekmektedir. Chou ve Hung [15], geri yaylanma telafisi için kullanılan muhtelif tekniklerin ne kadar etkin olduğunu incelemişlerdir. Çifte büküm yönteminin en etkili yöntem olduğunu söylemişlerdir

1.2 Tezin Amacı

Bu tezin temel amacı, otomotiv endüstrisinde kullanılan çeşitli sertlik, kalınlık ve farklı geometrilere sahip çeliklerin, sac metal şekillendirme ve büküm operasyonları sonucunda oluşan geri yaylanma miktarının doğru ve hassas bir şekilde tahmin edilmesi ve telafi edilmesidir. Geri yaylanmanın belirlenmesi ve indirgenmesine yönelik olarak literatürde pek çok çalışma yapılmıştır. Ancak, halen sonlu elemanlar modellerinin geliştirilme çalışmaları ve yeni malzeme modellerinin kullanımı araştırmacılar tarafından ilgiyle takip edilmektedir.

Tezin kapsamında, geri yaylanmanın tahmini için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Ancak sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçların tek başına kalıp tasarımında kullanılması doğru olmayacaktır. Bu doğrultuda, farklı geometri, farklı sertlik değerleri ve kalınlıklarına sahip malzemeler için farklı kalıplar tasarlanmış ve deney düzenekleri oluşturulmuştur. Kalıp tasarım aşamasında ve deneylerin gerçekleştirilmesinde Toyotetsu firması ile çalışılmıştır. Deneysel kalıpların tasarımlarının onaylanmasında tecrübeli Toyotetsu mühendislerinin uzun yıllara yayılan tecrübelerinden faydalanılmıştır.

Toyotetsu ile birlikte gerçekleştirilen deneyler, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır ve yöntemin doğruluğu belirlenmiştir. Sonlu elemanlar yönteminin hassasiyeti ve doğruluğu, gerçek fiziki koşulların ne kadar iyi benzetildiği ile doğrudan ilişkilidir. Ancak, kalıp hızı gibi birtakım fiziki parametrelerin gerçek değerleri, uzun hesaplama zamanlarına neden olacağından doğrudan kullanılmamaktadır.

Sonlu elemanlar modelleri ve ağ yapısı CatiaV5 tasarım ve Autoform sonlu elemanlar programında oluşturulmuştur. Sacın düzlemsel gerilme halinde olduğu kabul edilerek, sac kabuk elemanlar kullanılarak örülmüştür. Kalıp elemanları da yine kabuk elemanlar kullanılarak rijit olarak modellenmiştir.

SE yöntemi doğrulama çalışmalarında Hill48 anizotropik malzeme için geliştirilmiş olan akma kriteri kullanılmıştır. Farklı geometri, kalınlık ve malzeme çeşitleri kullanılarak geri yaylanmanın telafisine yönelik, öncelikli olarak parça geometrisinde ürün kontrol yüzeyi, yer değiştirme gibi yöntemler kullanılarak telafi yüzeyleri gerçekleştirilmiştir. Arka araç gövde parçası_1 ve 2 için tasarlanan en uygun süzdürme çubuğu yarıçapı kullanımı ile en iyi geri yaylanma telafi yüzeyi geliştirilmiştir. Kapı kolu parçası yüksek mukavemetli parça olduğu için oldukça fazla geri yaylanma elde edilmiş geri yaylanma telafisine yönelik yer değiştirme ve ürün kontrol yüzeyi yöntemi ile geri yaylanma miktarı azaltılmıştır. Aynı zamanda orta direk parçasında da geri yaylanma telafisine yönelik yer değiştirme yöntemi geri yaylanma miktarı azaltılmış için kullanılmıştır. En son olarak zemin üye parçasında yapılan sonlu elemanlar simülasyon sonuçlarına göre parça geometrisinde değişiklik yapmadan en iyi geri yaylanma telafi yüzeyi oluşturulmuştur. Elde edilen simülasyon sonuçları deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır. Her bir parça için malzeme kalınlığı ve elastisite modülünün değişiminin geri yaylanmaya etkisi grafiklerle incelenmiştir.

Aynı zamanda 5 farklı geometriye sahip parçaların Autoform (sonlu elemanlar programında) malzeme kalınlığı ve elastisite modülü değiştirilerek geri yaylanma davranışları incelenmiştir.

1.3 Hipotez

Tez 7 bölüm olarak derlenmiştir. Birinci bölümde çalışma hakkında genel bilgiler ve literatürde yapılan çalışmalar hakkında bilgiler sunulmuştur. Ayrıca tez çalışmalarının kapsamı ve içeriğine değinilmiştir.

İkinci bölümde tez kapsamında incelenen süzdürme çubuğu uygulaması, malzemenin şekil verilebilirliğinin ölçüldüğü şekil verme limit diyagramları ve malzemenin mekanik davranışı incelenmiştir.

Üçüncü bölümde, tez kapsamında incelenen çekme prosesi işlemleri, autoformda çekme prosesi ile sonlu elemanlar yöntemi, araç çubuklarının yönetimi, presleme prosesinin kurulumu, hesaplamasının yapılışı, geri yaylanma miktarı, geri yaylanmanın azaltımı hakkında genel bilgiler verilmiştir.

Dördüncü bölümde geri yaylanma azaltma stratejileri ve telafisi verilmiştir. Geri yaylanmanın azaltılabilmesi için çeşitli yöntemler örneklerle açıklanmıştır.

Beşinci bölümde ise farklı geometri, kalınlık ve malzemeler için tasarım süreci deneysel sonuçlar ve sonlu elemanlar yönteminin doğrulanma çalışmaları sunulmuştur. Tasarımları ve deneyleri tez çalışmaları dahilinde gerçekleştirilen deney kalıpları hakkında genel bilgiler verilmiştir. Doğrulama süresince, sayısal parametrelerin benzetim sonuçları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Aynı zamanda süzdürme çubuğunun geometrisine yönelik olarak parametrik çalışmalar yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, süzdürme çubuğu tasarımında yol gösterici olacaktır ve 5 farklı geometri, malzeme kalınlığı ve malzeme cinsine sahip parçaların kendi içinde malzemenin diğer özellikleri sabit tutularak malzeme kalınlığı ve elastisite modülü değiştirilmiş elde edilen geri yaylanma miktarları grafikler halinde verilmiştir.

Altıncı bölümde sonuçlar değerlendirilmiştir.

2.1 Süzdürme Çubuğu Uygulaması

Sac metal şekillendirme sürecinde saca uygulanan baskı plakası kuvveti pres kapasitesi karşılaştırıldığında pres kapasitesine göre oldukça fazla olabilmektedir. Süzdürme çubuğu uygulaması ile sac bölgesel sıkıştırılarak geri yaylanma miktarı azaltılır. Şekil 2.1’de süzdürme çubuğunun görseli yer almaktadır.

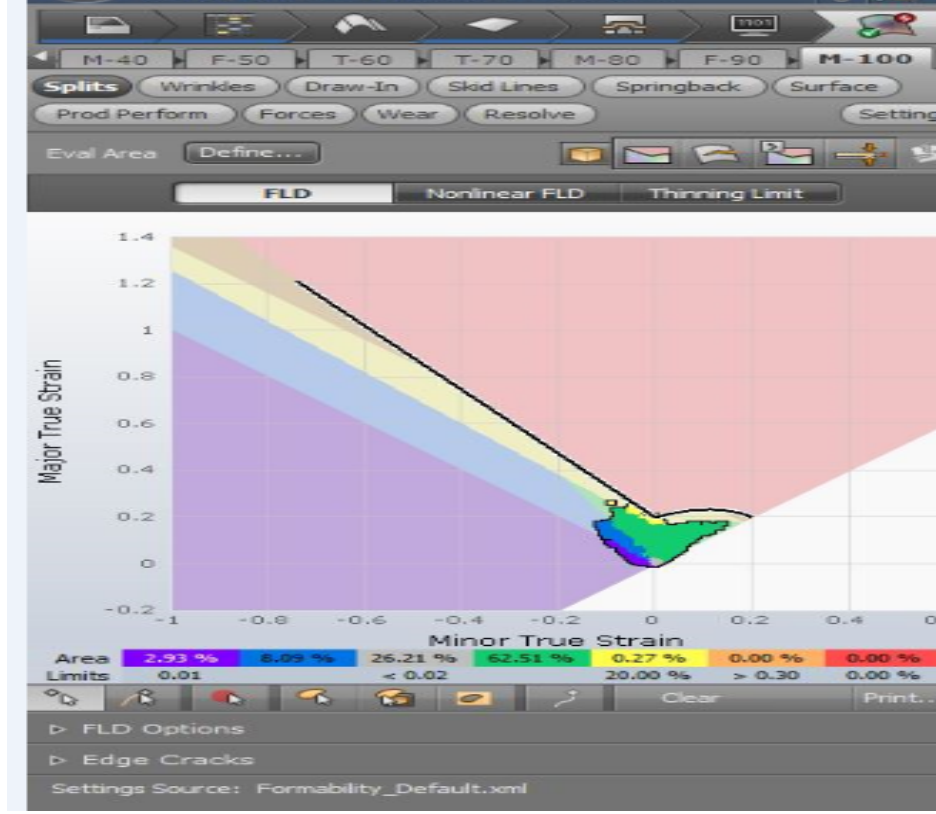


Şekil 2.1 Süzdürme Çubuğu Uygulaması

Süzdürme çubuğu, kalıp yüzeyi boyunca kağıt eksenine dik doğrultuda yer almaktadır. Bu uygulama ile sac sıkıştırılarak geri yaylanma miktarı azaltılmaktadır.

2.2 Şekil Verme Limit Diyagramı

Autoform şekil verme limit diyagramları ile sac metal şekillendirmenin kalitesel seviyesi gözlemlenebilir. Autoform benzetim sonuçlarında kullanılan şekil verme limit diyagramlarında malzeme kalınlığı, anizotropisi gibi özellikleri doğrudan kullanılmaktadır.



Şekil 2.2 Şekil Verme Limit Diyagramı

Autoform şekil verme limit diyagramları ile sac malzemenin şekil alırken malzemede meydana gelen çatlak ve yırtık oluşumu gözlemlenebilmektedir. Bu yöntem ile şekillendirme sürecinde sacda meydana gelen hasar oluşumlarının limitleri belirlenir. Sac malzemenin tasarımsal değişikliği ile uygun şekillendirme süreçleri belirlenir.

2.3 Malzemenin Mekanik Davranışı

Sac metal malzemedeki geri yaylanma miktarı, şekil verme işleminin kalitesi malzemenin özelliklerine bağlıdır. Tezin bu aşamasında şekil verme işlemini ve geri yaylanma miktarını doğrudan etkileyen mekanik özellikleri belirtilmiştir. Bu özellikler, sonlu elemanlar yönteminde malzemenin plastik davranışını etkilemede doğrudan kullanılmaktadır. Bununla birlikte malzemenin akma kriteri, malzemenin plastik davranışını karakterize etmede kullanmak için incelenmiştir.

2.3.1 Plastik Anizotropi

İzotropi teorik bir kabuldür. Sac malzemeler haddeleme ile üretildiğinden dolayı sac malzemelerde kusurlar yer almaktadır. Malzeme, haddeleme doğrultusunda uzayarak farklı doğrultularda özellikleri değişir. İzotropik malzemelerde malzeme doğrultusu, malzeme özelliklerinden bağımsızdır.

Şekil verme sürecinde, pekleşme sürecinde kristalleşmelerden dolayı haddeleme doğrultusunda değişiklikler gözlenir. Sonuç olarak malzemenin doğrultusuna bağlı olarak özellikleri değişir. Bu durum malzemenin anizotropisi olarak adlandırılır. Malzemenin koordinat sisteminin farklı yönlerde farklı özellikler mevcut ise bu malzeme anizotropiktir [18].

Haddeleme sonucunda üretilen sac malzemelerde düzlemsel ve normal olmak üzere iki farklı anizotropi mevcuttur. Eğer malzeme kendi düzlemi boyunca doğrultu yönüne bağlı olarak farklı mekanik özellikleri var ise malzeme düzlemsel anizotropi olarak adlandırılır.

Anizotropinin değeri, plastik gerinim oranı 'R' ile ifade edilir. 'R' genişlik yönündeki plastik gerinimin kalınlık yönündeki plastik gerinime oranıdır.

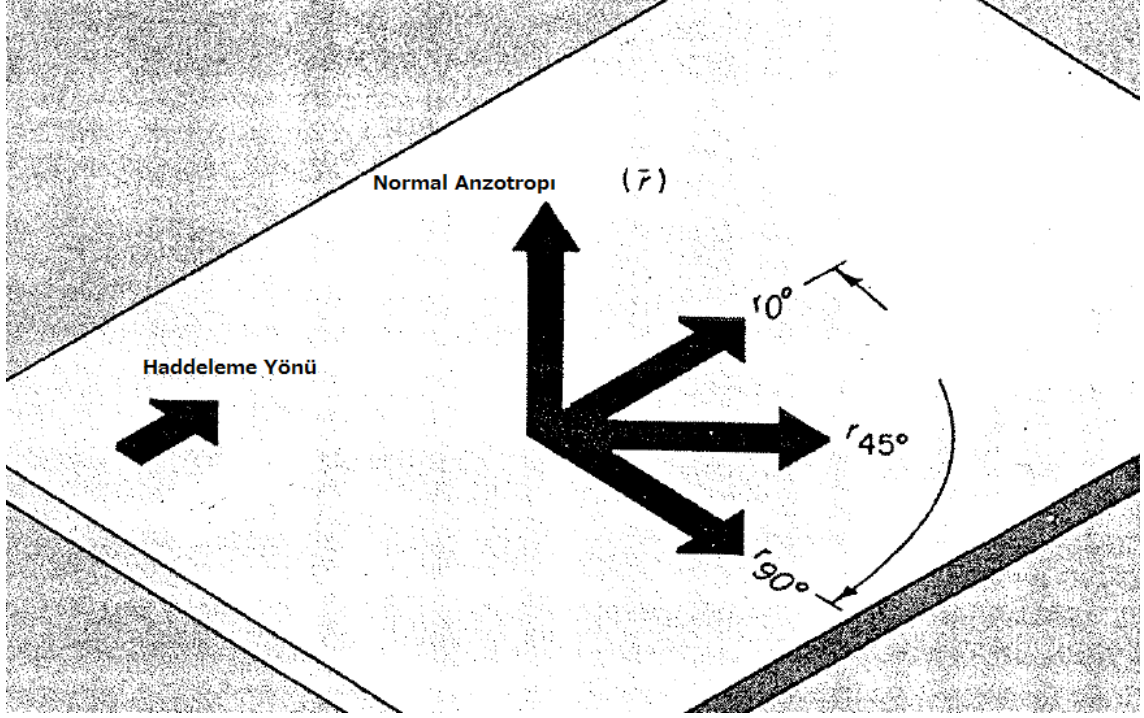
$$R = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} \quad (2.1)$$

Burada ε_w genişlik boyunca gerinim, ε_t kalınlık boyunca gerinimdir. ε_w ve ε_t değerleri aynı ise malzeme izotropik olarak adlandırılır. R değeri malzeme üzerindeki incelme direnci ile şekil verilebilirliğinin önemli bir göstergesidir.

Yüksek plastik gerinime bağlı olarak incelme direnci fazla iken düşük plastik gerinimde plastik şekil vermeye dayanıksızdır [19].

Sac malzemedeki tanımlanan diğer anizotropi ise normal anizotropidir. Kalınlık boyunca malzeme özelliklerinde değişim var ise normal anizotropi olarak adlandırılır [20].

Haddeleme sonucu üretilen malzemedeki yüzey boyunca farklı anizotropi değerlerine bağlı olarak üç farklı anizotropi mevcuttur. Bunlar R0 (paralel), R45 (diyagonal) ve R90 (transvers)'dir. Bu anizotropiler, çekme deneyi sonucunda tanımlanmıştır.



Şekil 2.3 Sac Malzeme Anizotrop Yönleri

Tek eksenli çekme deneyi sonucunda anizotropi değerleri elde edilir. Bu üç gerininin ortalaması ile normal anizotropi değerleri aşağıdaki formülle belirtilir.

$$R = \frac{R_0 + 2R_{45} + R_{90}}{4} \quad (2.2)$$

Gerinin oranları sayesinde kırışıklığın etkileri gözlemlenir. Parametreler, aşağıdaki formülle belirlenir [21].

$$\Delta r = \frac{R_0 - 2R_{45} + R_{90}}{4} \quad (2.3)$$

Δr artmasına bağlı olarak kırışıklık yüksekliğinde artış gözlemlenir. $\Delta r = 1$ ise kırışıklık görülmez. Şekil verme işlemine bağlı olarak geri yaylanma miktarı, anizotropi değerinden etkilenir.

Yukarıdaki özellikler dikkate alındığında malzeme parametresi önemli bir parametredir. Anizotropi, özellikle haddeleme gibi büyük plastik deformasyonların olduğu ön operasyonlarda meydana gelmektedir. Haddelemeden sonra sac şekillendirme sürecinde ikincil deformasyon meydana gelmektedir. Bu durum, akma gerilmesinin, akma geometrisinin değişim ve özellikle gerinin dağılımında önemli bir parametredir. [22].

2.3.2 Akma Kriterleri

Akma yüzeyinin geometrisi akma şartının belirlenmesinde önemli bir parametredir. Bu nedenle akma yüzeyi geometrisi için çeşitli akma kriterleri geliştirilmiştir.

2.3.2.1 Tresca Akma Kriteri

Tresca (1864) akma kriteri maksimum kayma gerilmesi kriteri olarak tanımlanmıştır. Bu kriter gere göre akma, kayma gerilmesi için kritik bir durum ile başlamaktadır.

Kriter, aşağıdaki formülle belirtilmektedir.

$$\text{En büyük } \{\sigma_1 - \sigma_2, \sigma_2 - \sigma_3, \sigma_1 - \sigma_3\} = \sigma$$

Burada $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ asal gerilmeler ve σ_y akma gerilmesidir.

2.3.2.2 Von-Mises Akma Kriteri

Von-Mises (1913) akma kriterinde üç eksenli yükleme koşuluna göre akma yüzeyi daire olarak tanımlanmıştır.

Aşağıdaki formülle ifade edilmiştir.

$$S_{ij} S_{ij} = \frac{2}{3} \sigma_y^2 \quad (2.4)$$

Burada S_{ij} deviatorik gerime tensörü ve σ_y akma gerilmesidir.

2.3.2.3 Hosford Akma Kriteri

Hershey (1954) ve Hosford (1972) polikristaller için elde edilmiş denklem 2.5'deki tanımlanmıştır. Formülasyon asal gerilmeler türünden yazılmıştır ve malzemenin kristal yapısına bağlı olarak değişen (hacim merkezli kübik (HMK) için $m=6$, yüzey merkezli kübik (YMK) için $m=8$) bir üstel değer olan m ile ifade edilmiştir [23].

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^m + (\sigma_2 - \sigma_3)^m + (\sigma_1 - \sigma_3)^m = 2\sigma_y^m \quad (2.5)$$

σ_y tek yönlü çekmedeki akma gerilmesidir. Denklem 2.5, $m=1$ değerini aldığı anda Tresca akma kriterine ve $m=2$ değerini aldığı anda von Mises akma kriterine indirgenmektedir.

2.3.2.4 Hill 48 Akma Kriteri

Hill 48 akma kriteri basit ortotropik anizotropi durumunu tanımlamaktadır. Bu akma kriterine göre karşılıklı dik olan üç simetri düzlemine göre her bir nokta mevcuttur. Bu üç düzlemin kesişimi, anizotropinin asal eksenleridir. Bu eksenler, kartezyen koordinatında referans eksenlerdir. Bauschinger etkisi ihmal edilip plastik potansiyeli ifade etmek için homojen küp şeklinde sonlu büyüklükteki bir eleman seçilebilir. Buna göre hidrostatik kuvvetlerin akma üzerinde etkisi yoktur. Hidrostatik kuvvetler hacim değişimine neden olmaktadır. Yapılan kabuller ışığında Hill48 akma kriteri aşağıdaki formu alır [24].

$$2f(\sigma_{ij})OF(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{zx}^2 + 2N\tau_{xy}^2 = 1 \quad (2.6)$$

Bu denklemde F, G, H, L, M, N anizotropi durumu belirleyen karakteristik parametrelerdir.

2.3.2.5 Barlat ve Lian Akma Kriteri

Barlat ve Lian'nın (1989) geliştirdikleri akma kriterinin başlangıç noktası Hosford'un izotropik malzemeler için oluşturduğu akma kriteridir (Denklem 2.8). Düzlemsel gerilme durumu için Hosford akma kriteri Kartezyen koordinatlarda aşağıdaki formülle yazılabilir.

$$f(\sigma_{ij}) = |K_1 + K_2|^m + |K_1 - K_2|^m + |2K_2|^m + \sigma_y^m = 0 \quad (2.7)$$

Denklemdeki, gerilme değişmezleri, K_1 ve K_2 şu şekilde ifade edilmektedir:

$$K_1 = \frac{1}{2}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \quad (2.8)$$

$$K_2 = \left[\frac{1}{4}(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + \sigma_{xy}^2 \right]^{1/2} \quad (2.9)$$

$$f(\sigma_{ij}) = a|K_1 + K_2|^m + b|K_1 - K_2|^m + c|2K_2|^m - \sigma_y^m = 0 \quad (2.10)$$

Bu denklemde sadece 2 terim birbirinden bağımsızdır. Çift eksenli eşit çekme gerilmesi durumunda, $\sigma_{xx} = \sigma_{yy}$, $\sigma_{xy} = 0$ ve $a=b$ olduğu açıkça görülmektedir [25].

2.3.2.6 YLD2000 Akma Kriteri

YLD2000 akma kriteri, Barlat vd. tarafından geliştirilen YLD96 [26] akma kriterinin sonlu elemanlar yöntemine, uygulanabilirliği zor olduğundan ve akma yüzeyinin konveks olduğu ispat edilemediğinden dolayı geliştirilmiştir [27]. Model sadece iki boyutlu gerilme hali için oluşturulmuştur.

YLD2000 akma kriterinde, akma yüzeyi sekiz parametre ile tanımlanmıştır. Akma yüzeyinin tanımlanması için gerekli olan bu parametreler, Barlat vd.'nin [26] yaptığı çalışmada, belirli bir plastik işe karşılık gelen akma gerilmesi kullanılarak bulunmuştur. Klasik yöntemde ise bu parametreler tam akma durumu için belirlenmektedir ve ortalama değerlerdir. Yukarıda sayılan nedenlerden ötürü, YLD 2000 akma kriteri diğer akma kriteri modellerine göre akma yüzeyini daha iyi ifade etmektedir.

YLD2000 akma kriteri, Hershey (1954) ve Hosford (1972) tarafından sunulan izotropik akma modelinin (Denklem 2.8) anizotropik malzemelere uyarlanmasıdır.

YLD2000 modeli için, akma şartı aşağıdaki ilişki ile açıklanmıştır:

$$\Phi = \Phi' + \Phi'' = 2\sigma_y^a \quad (2.11)$$

Bu denklemde,

$$\Phi' = |S_1 - S_2|^a \quad (2.12)$$

$$\Phi'' = |2S_2 + S_1|^a + |2S_1 + S_2|^a \quad (2.13)$$

Burada S_1 ve S_2 deviatorik gerilmenin asal değerleri, σ_y akma gerilmesi, a ise malzemenin kristal yapısına bağlı bir üsteldir. 2.12 ve 2.13 numaralı denklemlerde verilen izotropik fonksiyonlara lineer dönüşüm uygulanarak anizotropik özellikler eklenmiştir. 0° , 45° ve 90° lik yönlerde yapılacak olan çekme deneyi sonuçlarından, her üç yöndeki akma gerilmesi ve anizotropi değerleri belirlenir.

Çift eksenli çekme deneyi sonucunda çift eksenli (biaxial) akma gerilmesi belirlenir.

2.3.2.7 Bauschinger Etkisi

Basit çekme deneyi yaparken akma sınırından sonra bir noktada yük boşaltılıp tekrar ters yönde basılırsa, basma halindeki akma değerinin çekme halindeki akma değerinden daha düşük değerde olduğu görülür. 1881 yılında, J. Bauschinger metalin çekme deneyi sonrasında, basmaya maruz bırakıldığında akma gerilmesinde azalma olduğunu fark etmiştir. Bu etki gerilmenin sürekli şekilde bir düz - bir ters yönde değiştirildiği işlemlerde küçümsenmeyecek bir öneme sahiptir [28].

Çevrimsel yüklemelerde basma akma gerilmesi ve çekme akma gerilmesinin farklı olması iki mekanizma ile açıklanabilir. Gerilme-gerinim karakteristiği malzemenin mikroskobik düzeydeki gerilme dağılımına bağlıdır. Birinci mekanizmada malzeme deforme edildiğinde dislokasyonlar belirli bölgelerde yığılmaktadır. Yük kaldırıldıktan sonra yığılmış olan dislokasyonlar ters yönde harekete geçer. Dislokasyonların ters yöndeki hareketi, çekme durumuna göre daha kolay gerçekleşmektedir. Diğer bir mekanizma ise kaymadan kaynaklı olarak zıt yönlü dislokasyonların birbirini yok etmesidir. Sonuç olarak malzemenin basma durumundaki akma gerilmesi, çekme durumundakinden az olacaktır.

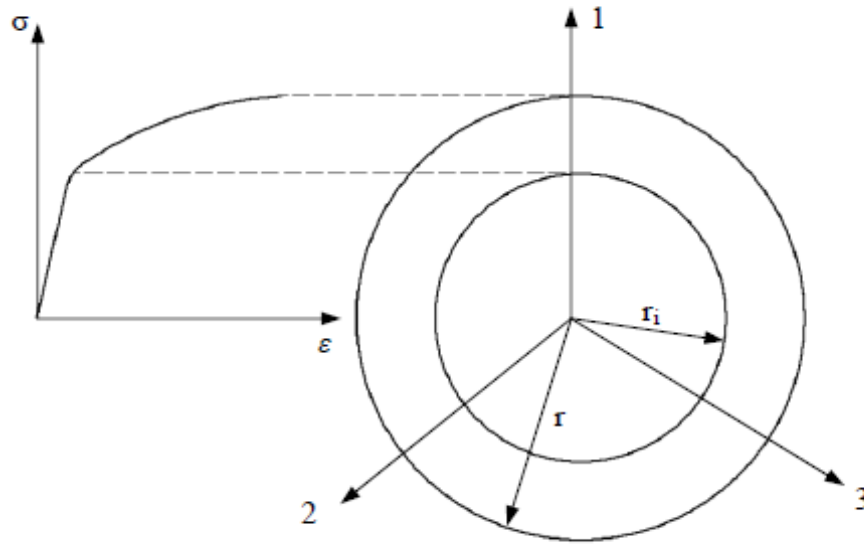
Çevrimsel yüklemelere maruz kalan parçaların plastik deformasyonunda Bauschinger etkisi dikkate alınmalıdır [29]. Gerdirerek büküm operasyonunda, sac metal bükülürken çekme ve basma olarak çevrimsel yüke maruz kalır. Gerdirerek büküm operasyonu sonucunda oluşan geri yaylanmanın doğru bir şekilde modellenebilmesi için Bauschinger etkisi hesaba katılmalıdır.

2.3.2.8 Pekleşme Modelleri

Elastik deformasyon boyunca malzemenin mekanik özelliklerinde bir değişim olmaz, ancak malzeme elastik limit sınırını geçecek şekilde yüklenip daha sonra yük kaldırılırsa malzemenin mukavemet özellikleri değişir. Bu olaya pekleşme denir. Pekleşme olayı ile akma yüzeyi değişim gösterir. Eğer yük altındaki

malzemede akma yüzeyinde herhangi bir değişim yoksa (elastik-mükemmel plastik malzemelerde olduğu gibi) pekleşme durumundan söz edilemez [30].

Pekleşme iki temel modda gerçekleşir: izotropik pekleşme ve kinematik pekleşme. İzotropik pekleşmede akma yüzeyinin merkezinin sabit kalarak, yüzeyin şeklinin değişmeden büyüdüğü kabulü yapılır (Şekil 2.5).



Şekil 2.4 İzotropik Pekleşme Modelinin Şematik Olarak Gösterilmesi

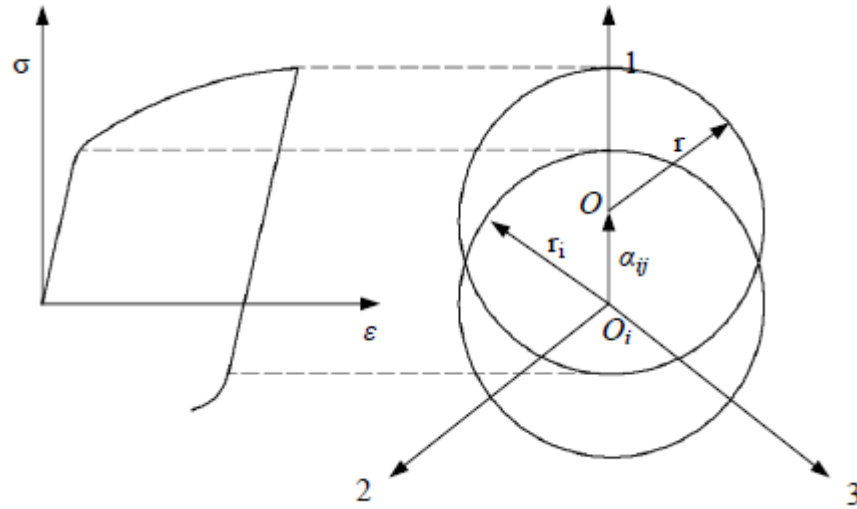
Akma başladıktan sonra gerilmenin artırılmasıyla pekleşme görülür. r_i yarıçapındaki ilk akma yüzeyi merkezi sabit kalacak şekilde büyür. 1, 2 ve 3 rakamları asal eksenleri ifade etmektedir. Gerilme 1 ekseninde doğrultusunda uygulanmıştır. İzotropik pekleşme modeline göre çekmedeki akma dayanımı basmadaki akma dayanımına eşittir.

İzotropik pekleşme matematiksel olarak şöyle ifade edilebilir [31].

$$\sigma^0 = \sigma_y + Q(1 + e^{-b\varepsilon_{pi}}) \quad (2.14)$$

Bu denklemde, G^0 eşdeğer gerilmeyi, G_y akma gerilmesini, ε^{pl} eşdeğer plastik gerinimi, Q akma yüzeyinin maksimum şekil değiştirmesini ve b hangi plastik gerinim durumunda akma yüzeyinin büyümeye başladığını ifade etmektedir.

İzotropik pekleşme modeli çevrimsel yüklemeye maruz kalmayan parçaların plastik deformasyonunda kullanılabilir. Ancak, yüklemenin bir düz bir ters değiştiği durumlarda kinematik pekleşme modeli kullanılmalıdır. İzotropik pekleşme modelinde Bauschinger etkisi dikkate alınmaz. Gerçekte, çevrimsel yüklemenin her adımında malzeme pekleşmeye uğrarlar. Bunun sonucunda, basmadaki ve çekmedeki akma gerilmeleri birbirinden farklı olur. Şekil 2.6'da da gösterildiği gibi, basmadaki akma gerilmesi, çekmedekinden daha düşüktür. Bu durum malzemenin yumuşaması olarak adlandırılır.



Şekil 2.5 Kinematik Pekleşme Modelinin Şematik Olarak Gösterilmesi

Akma başladıktan sonra gerilmenin artırılmasıyla pekleşme görülür. r_i yarıçapındaki ilk akma yüzeyi büyüklüğü sabit kalacak şekilde uygulanan gerilme doğrultusunda kayar. O_i yüzeyin ilk durumdaki merkezini ve O son durumdaki merkezini belirtmektedir. Akma yüzeyini ifade eden çemberin ilk yarıçapı r_i son yarıçapına eşittir. 1,2 ve 3 rakamları asal eksenleri ifade etmektedir. Gerilme 1 eksenine doğrultusunda uygulanmıştır. α_{ij} akma yüzeyinin ne kadar yer değiştirdiğini ifade eden tensördür. Kinematik pekleşme modeline göre çekmedeki akma dayanımı basmadaki akma dayanımından yüksektir.

α_{ij} geri gerilme (back stress) olarak bilinmektedir, simetrik bir tensördür. Kinematik pekleşmeyi Von Mises akma kriterine uygulayacak olursak,

$$\sqrt{\frac{3}{2}(\mathbf{S}_{\ddot{u}} - \mathbf{a}_{\ddot{u}})(\mathbf{S}_{\ddot{u}} - \mathbf{a}_{\ddot{u}})} - Y = 0 \quad (2.15)$$

elde edilir.

Kinematik pekleşme ve geri gerilme genel olarak şu şekilde ifade edilebilir,

$$f(\sigma_{\ddot{u}} - a_{\ddot{u}}) - k = 0 \quad (2.16)$$

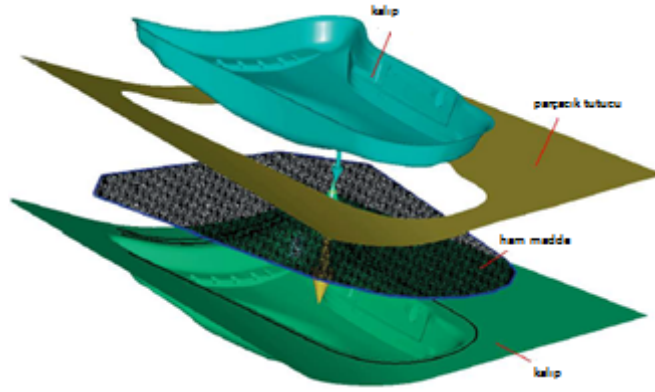
$$da_{\ddot{u}} = c d\bar{\epsilon}_{ij}^p \quad (2.17)$$

Burada $d\bar{\epsilon}_{ij}^p$ plastik gerinim artışıdır, c ise bir katsayıdır. Eğer c sabit bir sayı ise lineer kinematik pekleşme, eğer c malzemenin deformasyon geçmişine göre değişiyorsa lineer olmayan kinematik pekleşme durumu söz konusudur. Kinematik pekleşmede akma yüzeyinin şekli ve büyüklüğü değişmeden yer değiştirdiği kabulü yapılır.

ÇEKME PROSESİNDE GERİ YAYLANMA

3.1 Çekme Proses Süreci

Şekil 3.1’de gösterilen çekme proses işleminde, bir ürünün bir kalıba sıkıştırılarak şekil alma sürecini göstermektedir. Çekirdek, ürünün istenilen şeklini yansıtmaktadır. Blankholder (parça tutucu) çekirdek yüzeyini "offsetleyerek" üretiliyor. Levha, parçacık tutucu tarafından kalıba bastırılmıştır.



Şekil 3.1 Çekme Prosesi

Parçacık tutucu üretim sürecini kontrol etmek için şarttır. Parçacık tutucu üzerindeki kuvvet, kalıp üzerinde düz malzemenin akma yönünü ve dolayısıyla ürünün nasıl gerildiğini etkiler. Parçacık tutucu çok sıkıştırıldığında, düz malzeme kalıp boşluğuna akmaz ve malzeme sadece gerilir. Düz malzemenin yırtılmasına neden olabilir. Parçacık tutucu kuvveti çok küçük olduğunda, ürün esas olarak bükülme yoluyla oluşturulacaktır. Sonuç olarak, geri yaylanma etkileri daha büyük olacak ve hatta ürün kırışabilecektir. Aynı zamanda parçacık tutucudaki yağlama ve süzdürme çubukları kalıp üzerinde malzeme akışında kullanılır. Düz malzeme, kalıp, çekirdek ve parçacık tutucu arasındaki sürtünmeyi modellemek simülasyonun önemli bir parçasıdır. Sonunda ürün kalıptan çıktığında iç gerilmelerden ötürü geri yaylanacaktır.

Çekme prosesi işleminden sonra malzeme kesme ve bükme operasyonları da içerir. Örnek olarak bir araba kapı paneli öncelikle parça referansının istenilen

şekli verilmek zorundadır. Daha sonra fazla malzemenin etrafı kesilir ve bükme operasyonları gerçekleştirilir. Bu operasyonların her biri için geri yaylanma simülasyonlarının yapılması gerekmektedir.

3.2 Autoformda Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Çekme Proses Simülasyonu

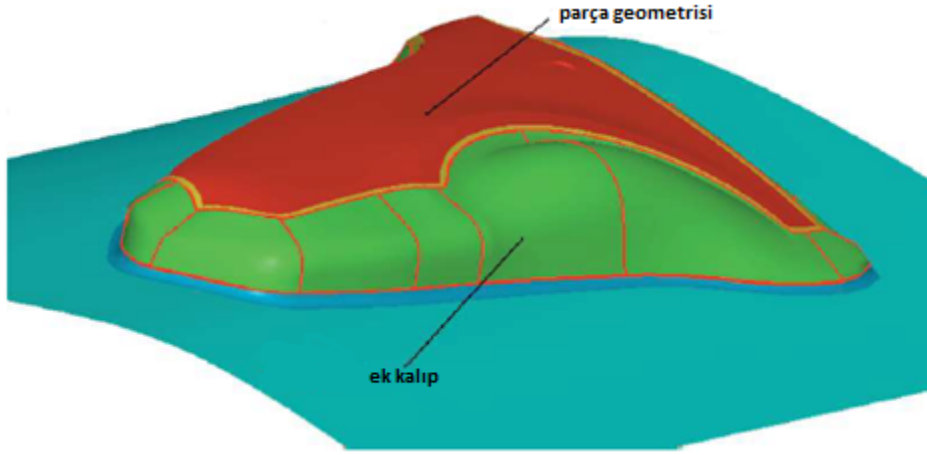
Günümüzde, Autoform çekme prosesi simülasyonlarında kullanılan en önemli programlardan biridir. Otomotiv endüstrisinde kullanılan çeşitli simülasyon programları vardır. Bu çalışmamızda Autoform programında çalışılmıştır. Çünkü otomatik olarak bazı araç yaratma fonksiyonlarına sahiptir.

Çekme proses simülasyonu 4 adımdan oluşmaktadır:

- CAD verilerinin bir sonlu elemanlar ağına dönüştürülmesi ve çekirdek, kalıp, parçacık tutucu ve açınım kafeslerinin oluşturulması
- Presleme sürecinin kurulumu
- Lineer olmayan sonlu elemanlar hesaplamasını uygulama
- Değerlendirme

3.2.1 Araç Çubuklarının Yönetimi

Ürünün geometrisi Cad dosyasında tanımlanmıştır. Çoğu düz ve formlu ürünler, yüzey gösterimi ile modellenir. Geometri daha sonra bir birleşik karmaşık yüzeyler kümesi olarak temsil edilir. Örnek bir sonlu elemanlar hesaplaması yapılırken, yüzeylerin bir dizi (kabuk) eleman ile yakınlaştırılması gerekir. Geometri modülü ile otomatik olarak bir ürün ağı oluşturabilir. Çekirdek oluşturmak için, geometri görselde gösterildiği gibi genişletilmiştir. Ürün eğrilerle bir yüzeye sabitlenir. Kalıp ekleri ve eğriler arasında bir algoritma hesaplanır. Kalıp ek ve ürün ağı, çekirdek formu olarak birleştirilir.

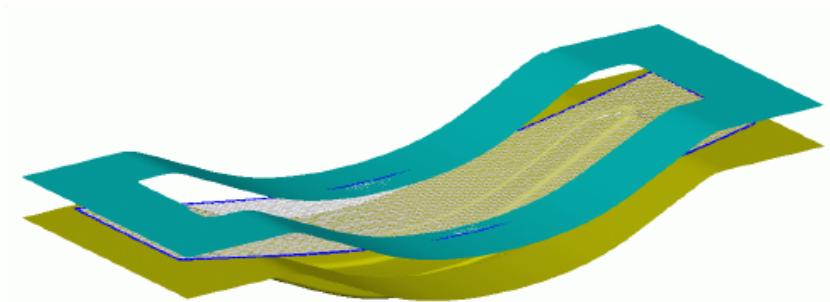


Şekil 3.2 Çekirdeğin Oluşturulması

Oluşturulan ağ, kalıp ağı olarak kullanmak için kopyalanır. Bu kalıp ağı, çekirdek ve kalıp arasında bir boşluk yaratmak için offsetlenen bir örgüdür. Bir blankholder kafes'i otomatik olarak oluşturulur. Son olarak, bir ağın düz malzemeden yaratılması gerekir. Bu araç kafesleri sonlu elemanlar hesaplaması ve telafi algoritması için hayati bir önem taşımaktadır.

3.2.2 Presleme Prosesinin Kurulumu

Bu bölümde, araçlar ve düz malzeme arasındaki etkileşimin tanımı verilmiştir. Normalde presleme süreci aşamalar halinde ayrılır. Önce düz malzeme, kalıp üzerine yerleştirilir, parçacık tutucu aşağı doğru hareket eder. Kalıp üzerinde düz malzeme preslenir. Aşağıdaki görselde gösterildiği gibi yeşil kalıbı, mavi parçacık tutucuyu ve şeffaf beyaz düz malzemeyi göstermektedir.



Şekil 3.3 Referans (Yeşil) ve Geri Yayla 1Şekil 3.3 Birinci Adım: Blankholder'ın Kapanması

İkinci aşamada ise çekirdek aşağıya doğru hareket eder ve ürünü oluşturur. Parçacık tutucu, çekirdek ve kalıp, ürünün geri yaylanmasına izin vererek

prosesini tamamlar. Bu adımların her biri için, farklı kafesler hareket edecek şekilde ayarlanabilir veya uzayda sabitlenebilir.

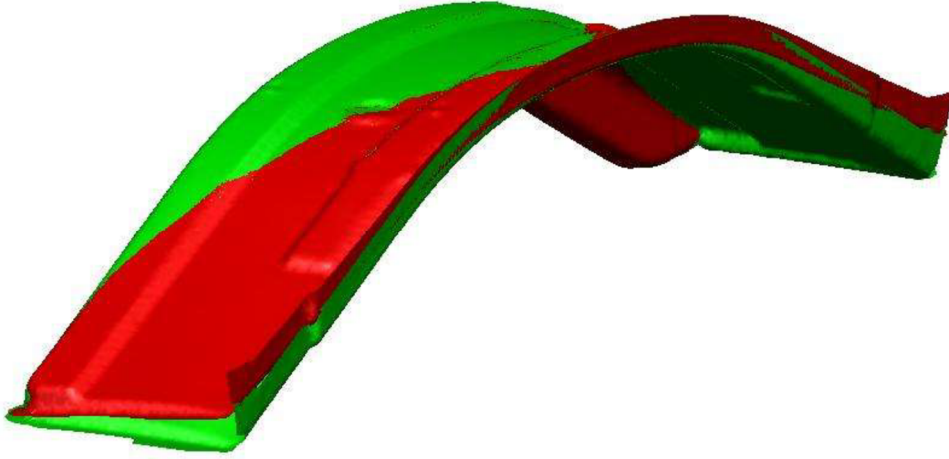
3.2.3 Hesaplamanın Yapılması

Derin çekme işlemi doğrusal olmayan bir sonlu elemanlar çözücü kullanılarak simüle edilir. Autoform presleme süreci, çekme prosesi ve parçacık tutucu kapaması için açık çözücüye ve geri yaylanma hesabı için üstü kapalı değişikliklere sahiptir. Hesaplama genellikle çok pahalıdır, bu yüzden gelişmiş algoritmalar prosesi hızlandırmak için kullanılır.

Açık sonlu elemanlar hesaplamaları için, zaman adımının boyutu (ve dolayısıyla hesaplama hızı) elemanların boyutu, yoğunluk ve elastik modülü gibi malzeme parametrelerine bağlıdır. Hesaplama süresinin kabul edilebilir sınırlar içinde tutulması için elemanların mümkün olduğunca geniş tutulması gerekir. Fakat, büyük öğeler, hassas ürün detaylarını doğru bir şekilde modelleyemez. Bu nedenle, uyarlanabilir ağ düzeltme kullanılır. Düz malzeme kafesi, hesaplama başlangıcında kaba olabilir ve gerektiğinde otomatik olarak düzeltilir. Bu nedenle, çekme prosesi hesabının nihai sonucu olan ağ ve düz malzemenin başlangıç ağı topolojik olarak benzer değildir. Son olarak, geri yaylanma hesaplaması gerçekleştirilir. Araçları serbest bırakarak, düz malzemenin geri yayılmasına izin verilir. Yine de katı parça modlarından sakınmak için düz malzemenin uzayda sabitlenmesi gerekir.

3.2.4 Değerlendirme

Sonlu elemanlar hesaplamasının sonuçları, proses sırasında herhangi bir zaman adımında saklanabilir, ancak geri yaylanma telafisinin son iki adımı en önemlileridir bunlar kapalı araçlarla deforme edilmiş düz malzeme ve geri yaylanma hesaplamasından sonraki düz malzemelerdir. 2 açınım malzemesi aşağıdaki görselde örnek olarak gösterilmiştir. Yeşil malzeme referans malzemeyi göstermektedir. Kırmızı malzeme ise geri yaylanmadan sonraki malzemeyi göstermektedir.



Şekil 3.4 Referans (Yeşil) ve Geri Yaylanmış Malzeme(kırmızı)

Optimizasyon algoritması belli bir zamanda bir çekme prosesi süreci için çalışarak geliştirilecektir. Çünkü her bir adımda geri yaylanma problemleri oluşmaktadır. Her bir sonlu elemanlar programında proses sonrası değişkenliklerin çeşitleri malzeme kalınlığı, iç gerilmeler ve yükler olarak gösterilebilir.

3.3 Geri Yaylanma Miktarı

Deforme olmuş düz malzeme ağırları ile geri yaylanmadan sonraki deforme olmuş düz malzeme ağırlarının karşılaştırılması önemsiz değildir. Gerçek proseste, ürün araçlar serbest bırakıldıklarında ürün artık sabit mekanik kısıtlamalar tarafından yerinde tutulamazlar. Şekillendirme işlemi tamamlandıktan sonra ürün, bir araba parçası gibi daha geniş montajda hızlandırılır. Geri yayılma hesaplaması sırasında, sınır şartları ayarlanmalıdır. Bu sınır koşulları, geri yaylanma şeklini de etkiler. Sınır koşullarını ayarlamak için temelde iki yol vardır:

Serbest geri yaylanma: Rijitliği sınırlamak için sadece asgari sınır şartları belirlenir. Düz malzeme geri yaylanmadan sonra serbestçe uzanıyormuş gibi davranır.

Montajlı geri yaylanma: Sınır koşulları, ürün son üründe yerine sabitlenmiş gibi ayarlanmıştır.

İkinci modül en önemlisidir, çünkü bu hesaplama dayanarak ürünün telafi ediliş edilmeyeceği ile ilgili bir karar verilebilir. İlk olarak, ürün şekli büyük şekil

bozulmaları için görsel olarak kontrol edilebilir. Özellikle otomobil gövde panelleri için geometrik toleranslar sıkı olabilir. Ürün düzensiz olarak ortaya çıktığı zaman, ürün üzerindeki ışık yansıması bozulabilir bunun için telafi ya da geri yaylanmanın azaltılması gereklidir. Kısıtlı düğümlerde hareket eden kuvvetler ayrıca önemli bir faktördür. Ürünü doğru şekilde itme kuvveti 30N'u geçtiğinde bu zaten araba gövde panelleri için kabul edilemez. Bunun için telafi ya da geri yaylanmanın azaltılması gereklidir. Pratik olarak %100 doğru ürün geometrisine ulaşamaz. Yani, eğer bağlantı kuvvetleri nispeten küçükse, ürünün montajdan sonra kendi geometrik tolerans gereksinimlerini karşılayıp karşılamadığını kontrol etmek çoğu durumda telafi yöntemi için tercih edilmez. Çoğu yapısal ürün genellikle çok serttir ve montaj sırada geriye doğru şekil değişikliğine uğramaz çünkü montajlı durumda yüksek iç gerilimler oluşacaktır.

Geometrik telafi gerektiğinde, geri yaylanma hesaplaması serbest geri yaylanma sınır koşulları ile uygulanmalıdır. Telafi algoritması montajdan önce geometri olarak doğru bir ürünü üretmek için araç setini bulmaya çalışacaktır. Serbest geri yaylanma sınır koşulları kullanıldığında şekilsel sapmalar aynı zamanda daha düzgün olacaktır.

3.4 Geri Yaylanma Azaltımı

Geri yaylanma telafisi gerçekleştirilmeden önce, öncelikle çekme proses işlemi en uygun duruma getirilmelidir. Geri yaylanma miktarını azaltmak için çeşitli yöntemler vardır ve en önemlileri bu paragrafta kısaca tartışılmaktadır. Geri yaylanmanın azaltılması konusundaki büyük miktardaki bilgi literatürde bulunabilir ve bu projenin bir parçası değildir.

Geri yaylanma azaltma, zaten tasarım aşamasında başlar. Nispeten düz bir yapıya göre bardak şeklindeki bir üründe geri yaylanma problemleri daha çok olacaktır. Kuvvetlendirici ek takviye kaburgalarının eklenmesi büyük ölçüde geri yaylanmayı azaltabilir. Aynı zamanda yapıdaki sac kalınlığını ya da yarıçapı değiştirerek ölçüsel durağanlık geliştirebilir.

Yapısal tasarım özelliklerinin eklenmesi veya değiştirilmesinin tasarımcı için bir görev olduğunu düşünüyoruz çünkü bilgisayar, yapının işlevsel gereksinimlerini

tamamen denetleyemez. Bu nedenle geri yaylanmayı azaltmanın en etkili yolu yapıyı yeniden tasarlamaktır.

Çekme prosesi sürecinin kendisi dikkatlice kurulmalı ve ayrıca optimize edilmesi gerekmektedir. Önceki paragrafta açıklandığı üzere, kalıp boşluğuna giren malzeme akışının geri yaylanma üzerinde büyük etkisi vardır. Malzeme akışı, düz malzemenin besleme yönünde gerilme davranışını tanımlar ve aşağıdaki etkenler tarafından kontrol edilebilir.

- parçacık tutucu kuvveti
- parçacık tutucu ve kalıp çelikleri arasındaki çekme prosesi blokları (drawbeads)
- yağlama
- kalıp eklentisinin tasarımı

Malzeme akışı, düz malzemeler ve kesmeler yaparak doğrudan kontrol edilebilir. Malzemenin mekanik gereksinimleri daha az sıkı ve daha uzun bir döngü süresi kabul edilebilir olduğunda sıcak presleme işlemi kullanılabilir.

GERİ YAYLANMA AZALTMA STRATEJİLERİ

Ürün tasarımı optimize edildiğinde ve çekme prosesi süreci dikkatli bir şekilde oluşturulduğunda bile birçok ürünün geometrik doğruluğunu geliştirmek için geri yaylanma telafisi yapılmalıdır. İlk bölümünde, telafi algoritmasının çerçevesi oluşturulmuştur. Geri yaylanma telafi algoritmasının şu anda endüstride nasıl gerçekleştiği araştırılmıştır. Şu anda en çok yapılan optimizasyonlar gerçek araç gereçler ile yapılan testlere dayanmaktadır. Sonlu elemanlar simülasyonları şu anda mevcuttur. Birinci testler, gerçek prototip araçların üretimi yerine optimizasyon döngüsündeki bu simülasyonları kullanmada uygulanır.

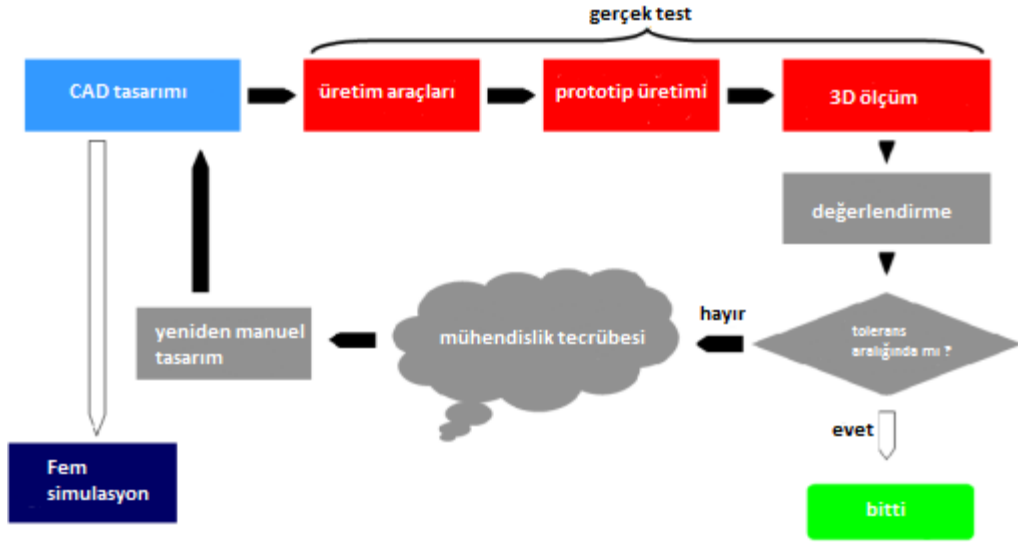
Ancak, bu projenin amacı tamamen araç şekil optimizasyonunu otomatik olarak gerçekleştirebilen bir algoritma geliştirmektir. İkinci kısımda ise literatürde test edilen ve uygulanan en önemli iki konuya odaklanılmıştır. İlk yöntem, çekme prosesi ürünü ile istenilen şekil arasındaki şekil sapmasının doğrudan azaltılması yöntemine dayanan yer değiştirme yöntemidir. İkinci yöntem, kontrol yüzeyi yöntemidir.

4.1 Geri Yaylanma Telafisi

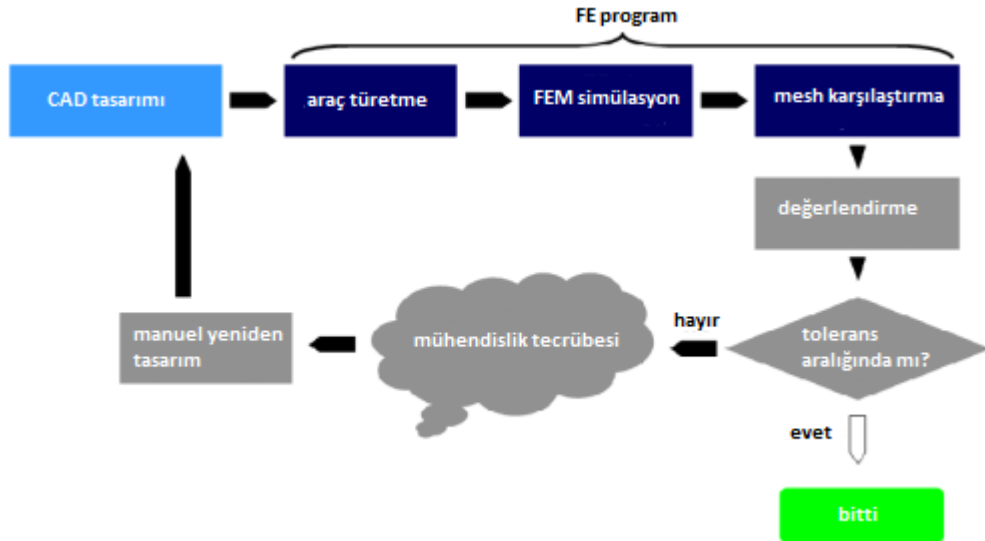
Ürün tasarımı bittiğinde ve geri yaylanmayı azaltmak için optimize edildiğinde, son adım aşırı bükme olarak adlandırılan araç geometrisinin geometrik optimizasyonudur. Aşırı bükme, araç geometrilerinin değiştirildiği anlamına gelir ki bu yüzden geri yaylanmadan sonra ürün istenilen şeklini yansıtır. Şu anda araçların türetildiği aşırı bükme şekillerini tanımlamak manuel bir iştir. Bu proses, görsel-4.1’de gösterilmiştir. Tüm akış şemalarında fiziksel testlerin kırmızı, sonlu elemanlar simülasyonunun koyu mavi, kullanıcı aksiyonları gri renkte görselleştirildiğini unutmayın.

Proses, sonlu elemanlar çekme prosesi simülasyonunu uygulayarak hassas kontrol ile başlatılır. Sonlu elemanlar simülasyonu ürünün üretilebildiğini gösterdiğinde, bir araç gereç üretilir ve prototip üretim gerçek proseste üretilir. Ürün daha sonra

3 boyutlu ölçümde ölçülür ve cad datada tanımlanan istenilen şekil ile kıyaslanır. Daha sonra proses mühendisi araç şeklinin nasıl değiştirileceğine karar verir. Tasarım departmanı araç gereçlerin işlenmesi için kullanılan cad datayı değiştirir. Araç gereçler yapılır ve başka bir prototip üretim yapılır. Ürün şekli hala tolerans dışındaysa toleranslar karşılayıncaya kadar daha çok değişiklik yapılacaktır.



Şekil 4.1 Manuel Geri Yaylanma Telafisi

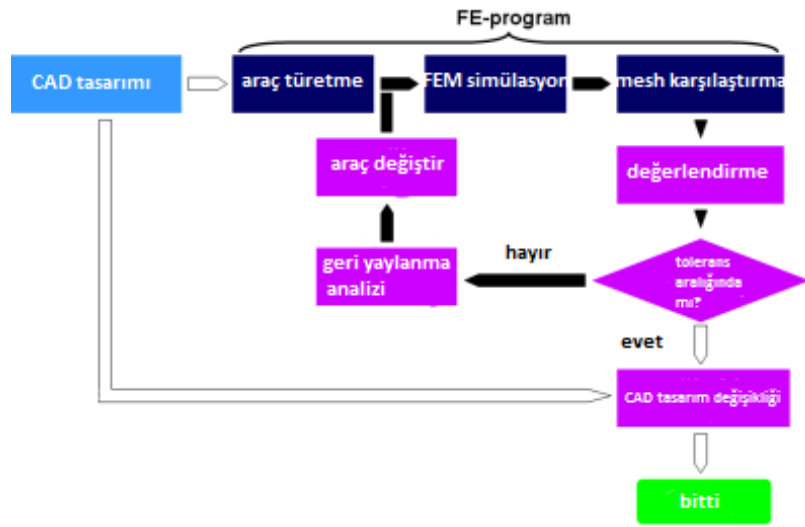


Şekil 4.2 Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Geri Yaylanma Telafisi

Şu andan itibaren geri yaylanma hesaplamaları daha hızlı ve doğru olmaktadır. Bilgisayar simülasyonları gerçek araç gereçlerin yerine kullanılabilir. Bu prosesi hızlandırmakta ve maliyeti azaltmaktadır. Artık prototip ürünlerin üretilmesine gerek yoktur. Şu anda, geri yaylanma hesaplamaları henüz tamamen güvenilir

değil, yani bu hesaplamalar, geriye dönük telafi için bir temel olarak kullanıldığında dikkatli olunmalıdır.

Bu projenin amacı, aşağıdaki görselde gösterildiği gibi süreci tamamen otomatik hale getirmektir. Bilgisayar, daha karmaşık ve daha doğru telafi tedbirleri önerebilir ve otomatik olarak çeşitli optimizasyon adımlarını otomatik olarak uygulayabilir. Bu sayede simülasyonların sayısı azaltılabilir ve sonuna kadar ürün daha sıkı toleransları karşılayacaktır. Bu optimizasyonun çekme prosesindeki her bir adımı için kesme prosesi dahil ayrı ayrı yapılması gerekiyor. Bu aşamalar özellikle problemli olabilir çünkü ürünün şekli kesme operasyonunda değişebilir.



Şekil 4.3 Tamamıyla Otomatik Geri Yaylanma Telafisi

Algoritma tarafından uygulanan operasyonlar mor renk olarak gösterilmiştir. Prosedür şu şekildedir: CAD verileri Autoform programında import edilmiştir ve daha sonra araç ağlarına dönüştürülmüştür. Açınım malzemesi oluşturmak için ağ oluşturulur. Referans ağ, kapalı araçlarla çekme prosesinden sonra düz malzemeyi temsil eder. Araçlar kaldırıldığında, geri yaylanma ağında sonuçlanarak düz malzeme geri yaylanacak. Bu ağlar arasındaki farklar değerlendirilir. Geri yaylanma ağının özel geometrik toleransları dışında olduğunda bir araç modifikasyon sonuçları doğru bir bükme stratejisi kullanarak hesaplanır.

Geri yaylanma için prosese giren ürün ile prosese girmeyen ürünün karşılaştırmasının sebebi nedir?

- Referans ağ, "en iyi elde edilebilir geometridir". CAD geometrisinden oluşturulan ağ çekme prosesi geçiren üründe her zaman hafifçe kıvrılan keskin kenarlar içerebilir. Bu nedenle, CAD ve referans ağları tam olarak aynı değildir ve küçük şekil sapmaları ağ karşılaştırması sırasında istenmeyen sonuçlar çıkabilir.

- Deforme olmuş bir düz malzeme, bir presleme aşamasının gerçek sonucudur. Sadece ürünü değil, aynı zamanda kalıp eki ve geri yayılma üzerinde büyük bir etkisi olan düz malzeme kesimlerini içerir. Geri yaylanmış telafi algoritması, yalnızca ürün alanını değil, eksiksiz düz malzemeyi de optimize eder. Araç değiştirme fonksiyonu ile, araç ağları değiştirilmiştir. Yeni bir araç gereç elde etmenin 2 yolu vardır. İlk yol, araçları doğrudan dönüşüm alanı ile değiştirmektir. İkinci yol sadece ürünü değiştiriniz ve Autoform presleme aşamasında yeni bir araç seti oluştururuz. Mevcut kalıp ekini değiştirilmiş ürün geometrisine sığdırmak mümkündür. Bu yöntem daha az güvenilirdir. Algoritma, optimizasyon için kalıp eki dahil düz malzemeyi kullanır ve daha sonra yalnızca ürün şeklini optimize eder. Kalıp ekinin ayrı ayrı değiştirilmesi, optimizasyonun sonuçlarını etkileyecek ve muhtemelen daha da kötüleştirecektir. Yeni araçlar ile yeni bir simülasyon gerçekleştirilebilir. Yeni simülasyondan yeni geri yayılma simülasyonları kullanılır ve orijinal referans ağ ile kıyaslanır. Geri yaylanmış ürün hala toleranslar dışındaysa toleranslar karşılanana kadar daha fazla iterasyon gerçekleştirilir.

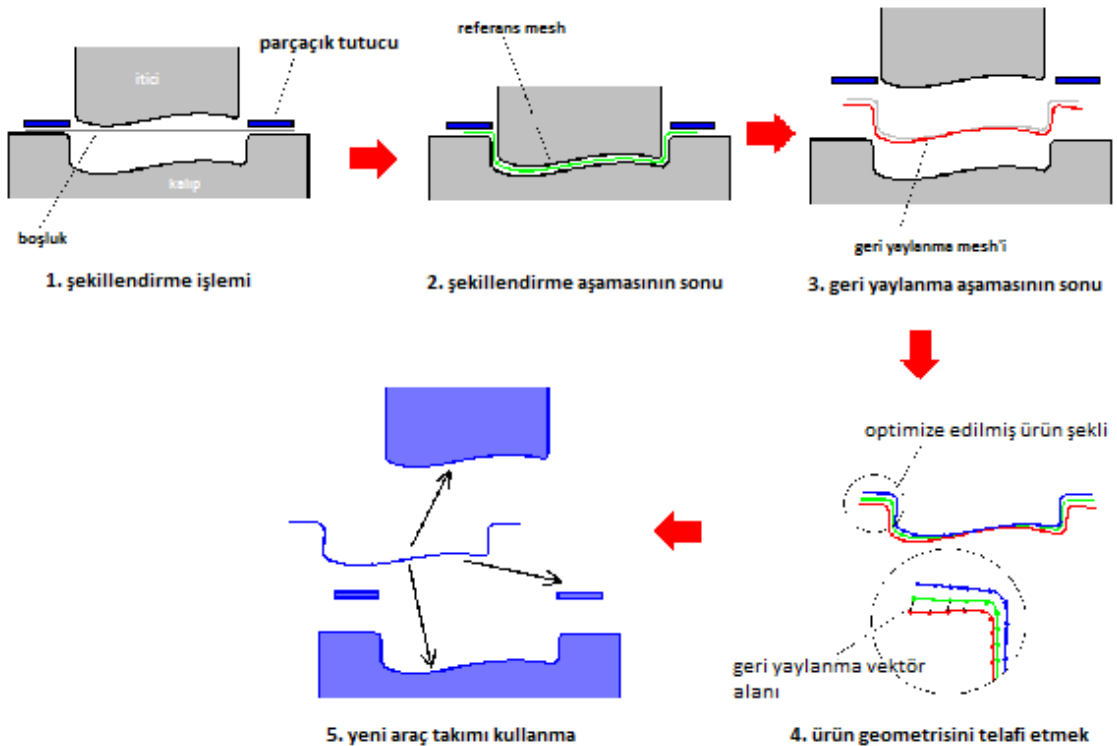
Her bir iterasyonda yeni bir geri yaylanmış malzeme sonlu elemanlar simülasyonu ile hesaplanır. Referans ağ istenilen geometriyi tanımlar ve optimizasyon sırasında değiştirilemez.

Optimizasyonun hedefi referans ağ ile geri yaylanmış ağ arasındaki şekilsel farklılıkları azaltmaktır. Optimizasyon sırasında geri yaylanmanın kendisi azaltılmaz. Aslında, çoğu durumda, araçlar optimize edildiğinde geri yayılma artar.

Birkaç yineleme sonrasında tatmin edici bir geometrik doğruluk elde edildiğinde, proses durdurulur ve araç ağlarına uygulanan şekil değişikliği araçların CAD dosyalarına uygulanır. Bu CAD dosyaları ile direkt olarak işleme takımları için NC kodu geliştirilebilir.

4.2 Yer Değiştirme Düzeltme Yöntemi

Yer değiştirme düzeltme yöntemi yönteminin ilk iterasyonu Şekil 4.4 'de görselleştirilmiştir. 1. adımda bir şekillendirme simülasyonu gerçekleştirilir. 2. adımda form alma aşamasının sonundaki düz malzeme ağı referans (yeşil) parçayı göstermektedir. 3. adımda düz malzemenin geri yaylanmasına izin verilir. Kırmızı renkli parça ise geri yaylanmış malzemeyi göstermektedir. 4. adımda geri yaylanmış malzeme ile referans malzeme kıyaslanmış telafi algoritması uygulanmıştır. Geri yaylanma sırasındaki düğümlerin yer değiştirmesi doğrudan hesaplanır. Geri yaylanma sadece referans ağının düğümleri üzerinde tanımlanan ayrı bir alan olan "geri yaylanma vektör alanı" sağlar. Telafi edilmiş ürün geometrisi için bir öneri şekil değişikliği alanı ile düğümleri yer değiştirterek hesaplanır. Yer değiştirme düzeltme yönteminde geriye doğru vektör alanının bir (negatif) çarpımı kullanılır. Bu çarpım faktörünün bir endüstri kuralı olarak, aşırı bükme faktörü, -1.3 civarındadır. Ancak bizim deneyimizde bu faktörün değeri ürünün geometrisine ve malzemesine bağlıdır ve -1.0 ile -2.5 arasında değişebilir. Son adımda, araçlar modifiye ürün şeklinden türetilmiştir.



Şekil 4.4 Spring Forward Yöntemiyle Birinci İterasyon

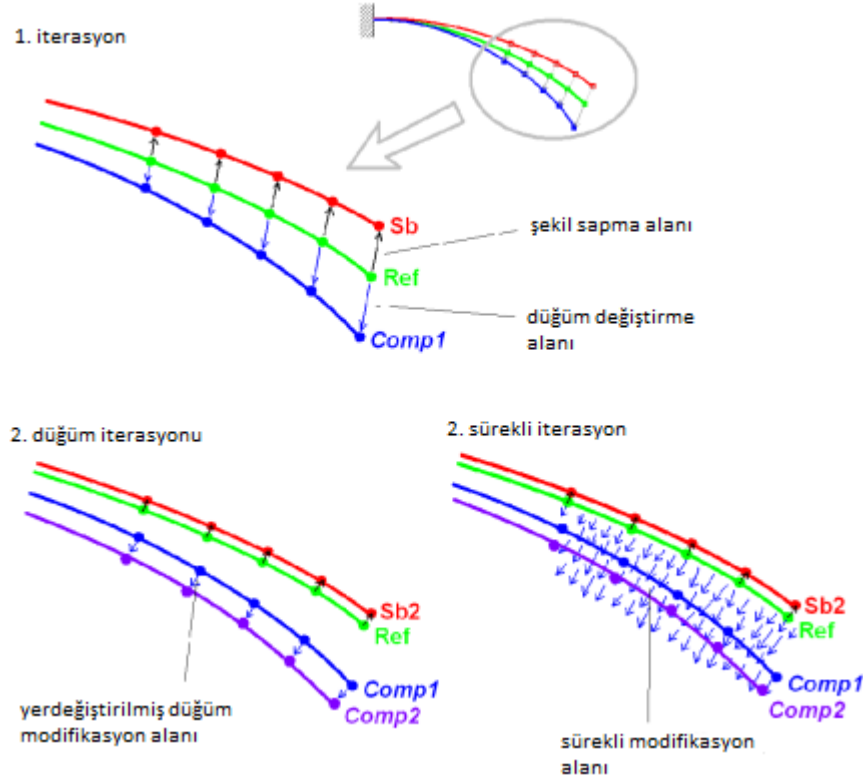
Yer değiştirme yöntemi sıralı olarak uygulandığında, geri yaylanma telafi sonucu şeklini adım adım geliştirerek önemli lde daha iyi olacaktır. Optimize edilmiş araçlar ile ilk iterasyondan yeni bir sonlu elemanlar simülasyonu gerçekleştirilir. Sonuçta, yeni bir geri yaylanma ağı, orijinal referans geometrisi ile karşılaştırılır. Bir nceki paragrafta tartışıldığı gibi, bir geri yaylanma telafisinin inşa edilmesi artık mümkün değildir. Çünkü orijinal simülasyondan referans ağ, yeni simülasyondan bir geri yaylanmış ağ ile karşılaştırılmaktadır.

İlk iterasyonda olduğu gibi, şekil sapma alanı negatif bir faktör ile çarpılır ve ürün şeklini tekrar telafi etmek için başvurulur. Bu doğrudan yapılamaz çünkü ürün geometrisi bir kez değiştirildi ve alan, referans ağındaki düğümlerde tanımlandı. şekil sapma alanını uygulamak için iki olasılık vardır:

Tanım 4.1 Düğüm modifikasyonu: şekil modifikasyon alanı, telafi edilen ürünün düğümlerine doğrudan bağlanabilir. şekil değişikliği alanını 'dikkatsizce' hareket ettirerek değiştirilmiş ürün geometrisi üzerine bir (küçük) hata tanıtılır.

Tanım 4.2 Sürekli modifikasyon: Yer değiştirme alanı, sürekli 3 boyutlu şekil değiştirme fonksiyonuna ekleme ve uzatma yapılabilir bu nedenle temel olarak herhangi bir ağa dönüştürülebilir. Uzatma işlevindeki sınırlamalar nedeniyle bir hata sunulur.

Her iki yöntem de şekil 4.5'de gösterilmiştir. Bir şekillendirme işlemi için bir model olarak, bir yatay şerit plastik olarak aşağı doğru eğilir. İlk iterasyon basittir. şerit, referans geometriyi yeşil, geri yaylanmış geometriyi kırmızı olarak göstermektedir. Geri yaylanma deformasyon alanı siyah oklarla gösterilmekte negatif faktör ile çarpılan ise mavi okları göstermektedir. şekil değiştirme alanı doğrudan ilk telafi edilmiş geometriyi üreterek referans geometriye uygulanır. (Telafi 1). İkinci sonlu elemanlar simülasyonunda, şerit bu "telafi 1" geometrisine doğru eğilir ve geri yaylanmış geometri 2'ye doğru eğilir 'geri yaylanmış geometri 2 referans geometriye çok daha yakındır. Bu andaki iterasyondaki şekil farklılıklarını telafi etmek için 'geri 'yaylanmış geometri 2 geometrisine referans geometri arasında bir şekil sapma alanı hesaplanır ve aşırı bükme faktörü olarak negatif faktör ile çarpılır. şimdi, ortaya çıkan şekil değiştirme alanının, "telafi 1" geometrisine uygulanması ve "telafi 2" geometrisinin sağlanması gerekiyor.



Şekil 4.5 Düzüm ve Sürekli Modifikasyon

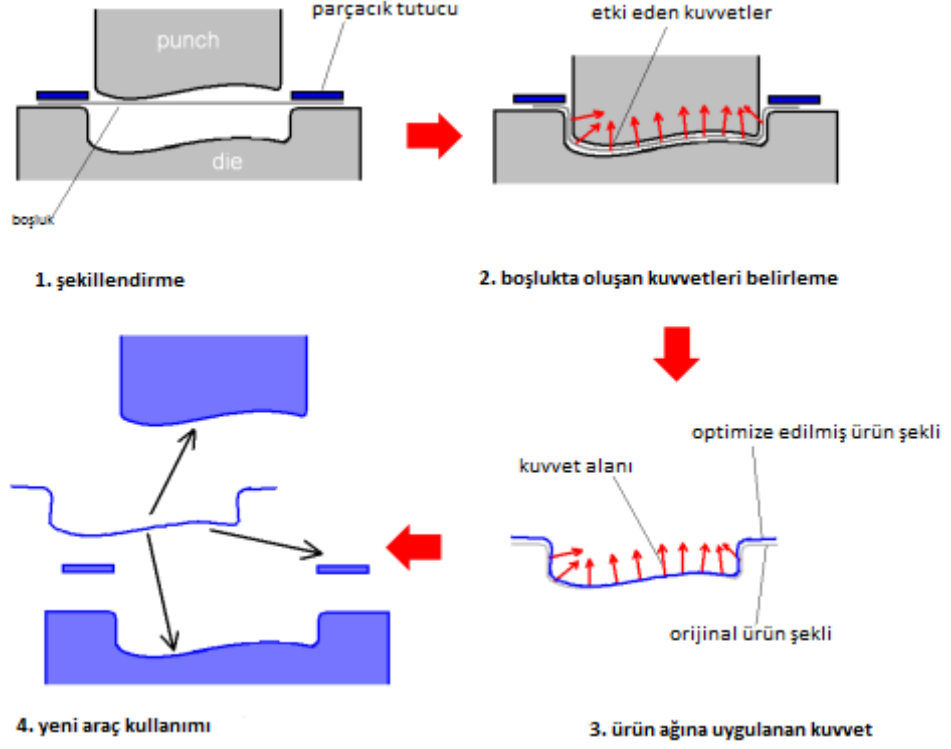
Şimdi iki farklı seçenek gösteriliyor. Sol resimde şekil değiştirme alanı düğümler farklı bir konumdaysa bile, telafi 1 geometrisinin düğümlerine basitçe uygulanır. Doğru örnekte, şekil değiştirme alanı taşınmaz, ancak sürekli 3 boyutlu şekil değiştirme fonksiyonuna ekleme ve uzatma yapılabilir. Bu telafi 1 geometrisine, telafi 2 geometrisini ilereyerek uygulanabilir. Şu anda gerçekleştirilen şekil değişikliği, yaklaşım fonksiyonun yeterince detaylı olması koşuluyla daha iyidir. Yaklaşım fonksiyonu için iyi bir tanım bulmak kolay değildir. Bu bir avantajdan daha fazla bir sorunun olduğu ortaya çıkıyor. Hala, sürekli dönüşüm alanının önemli bir avantajı vardır: araç ağlarını doğrudan değiştirmek için genellikle ürün ağından daha büyük olan ve topolojik olarak farklı olan araç ağları kullanılabilir. Kalıp, çekirdek ve parçacık tutucu doğrudan değiştirildiğinde, araçlar arasındaki boşluk genişliğinin değişmeden kalması gerektiğinden dolayı doğru değişiklik hayati önemdedir.

Referans ve geri yaylanma ağı olan algoritmanın sıralı uygulaması için pratik bir problem ilk iterasyondan sonra uyarlanabilir ağ yapısı nedeniyle artık topolojik olarak aynı olmayacaktır. Genel olarak, uygulanabilir ağ düzeltme yapısı ikinci iterasyondaki geri yaylanma ağının farklı bir düğüm kümesine sahip olmasına

neden olarak biraz farklı olacaktır. Ancak, tüm simülasyonlar için başlangıçtaki düz malzemer aynıdır. Yani referans ve geri yaylanma ağları topolojik olarak benzerdir, düzeltilmiş düğümlerin ağlardan çıkarılması gerekiyor. Bu bir karmaşık iş değildir ve çoğu örgü dosyasında, orijinal düğümler her zaman ilk olarak listelenir. Sonuç olarak, bu nedenle ürünün şekli, geometriyi yapay olarak “gerdirmeksizin” optimize edilebilir. 3 boyutlu durumlarda, zar gerilmeleri her zaman olacak ve yapay gerilmeler telafi algoritması tarafından tanıtılacaktır. Bu telafi sürecini önemli ölçüde yavaşlatabilir.

4.3 Spring Forward Yöntemi

Başka bir yöntem ise Karafillis ve Boyce tarafından tanıtılan yöntemdir. Spring forward yönteminde proses kuvvetleri araç şeklini optimize kullanılır. Spring forward yönteminin 1. İterasyonu Şekil 4.6’da gösterilmiştir. Ürünün form almasından sonra, çekirdek üzerindeki üzerinde hareket eden temas kuvvetleri (traksiyonlar) sonlu elemanlar sonuç dosyalarından ölçülür. Bir telafi ölçüsü olarak, 3.adımda sonuçlanan kuvvet-alan ayrı bir sonlu elemanlar hesaplamasındaki ürün geometrisine uygulanır. Bunun arkasındaki fikir şudur ki araçlar kapalı olduğunda kuvvet alanının action’ undan dolayı düz malzemelerin şekli aynı olmaktadır. Araçlar çıkarıldığında düz malzemenin kuvvet-alan altında geri yaylandığı farz edilir. Telafi geometrisini üretmek için referans geometrisine kuvvet-alan uygulanmaktadır. Geri yaylanmadan ötürü deformasyonun telafi edildiği farz edilir. Aşırı bükmenin, referans geometrisi ile ayrı bir (elastik) hesaplama olarak ve çekme prosesi simülasyonundan sonra fazladan bir adım olarak yapılmadığını unutmayın. Kalıntı gerilmelerin elastik davranışları etkilemediği varsayılmaktadır. Son olarak, elde edilen ürün şekli, adım 4’te yeni araçlar yaratmak için kullanılır ve yeni bir biçimlendirme simülasyonu gerçekleştirilir. Yinelemeler sırasında daima orijinal ürün geometrisinin güç alanıyla dengelendiğini unutmayın.



Şekil 4.6 Spring Forward Yöntemi ile Birinci İterasyon

Bu stratejinin avantajı şudur ki problemin fiziksel olarak az ya da çok orijinali gibi aynı şekilde telafi edilmesidir. Yapının “doğal olarak” deforme olmasına izin vermek bir deformasyon alanını empoze etmek ve "yapay" gerilmeleri tanıtmaktan sadece daha iyi sonuçlar verebilir. Aynı zamanda bazı önemli dezavantajları da vardır. Temelde kullanıldığında optimizasyon döngüsü, daha yavaş birleşir hiç değilse, ya da yanlış kalıp şekillerine yakınsayabilir. Ayrıca geri yaylanma hesaplaması sırasında sınır koşullarının tanımına çok duyarlıdır.

En önemli sorun şu ki; sabit geometrik referansın olmamasıdır. Geometrinin istenmeyen bir şekle yakınsama olasılığı vardır. Diğer bir problem, telafinin CAD verisinin geri beslenmesinin de karmaşık olmasıdır. Ürün düzensiz şişebilir, temel şekli korunmaz. Bu, sürekli bir modifikasyon fonksiyonunu tanımlamanın kolay bir yolu olmadığı anlamına gelir.

4.4 Kontrol Yüzeyi Yöntemi

Yer değiştirme yönteminin etkili ve sağlam olduğu kanıtlanmıştır ama algoritmanın pratik uygulaması için bazı önemli sorunların çözülmesi gerekiyor. Bu sorunlardan biri CAD sistemine geri döndürülmüş değiştirilmiş geometriyi geri

beslemektir. Başka bir problem, yapılacak algoritmayı kontrol etmektir. Örneğin lokal telafi mümkündür. Son olarak, algoritmanın daha büyük olanı ve topolojik olarak farklı takım geometrilerini doğrudan dönüştürebilmesi gerekmektedir. Bu bölümde tartışılan kontrol yüzeyi algoritması bazı sorunları çözer.

Kontrol yüzeyi algoritmasının arkasındaki genel fikir, kontrol yüzeyi olarak adlandırılan esnek bir yüzeyin, ürün geometrisi için yaylanmadan önce ve sonra bir yaklaşım olarak kullanılmasıdır. Yer değiştirme yönteminin temel prensibi kafesler yerine referans ve geri yaylanmış yüzeyler olarak adlandırılan bu kontrol yüzeylerine uygulanır. Bu yüzey araçların şeklini doğrudan değiştirmede kullanılır. Birinci paragrafta bu temel ilkeler açıklanmış ve görselleştirilmiştir.

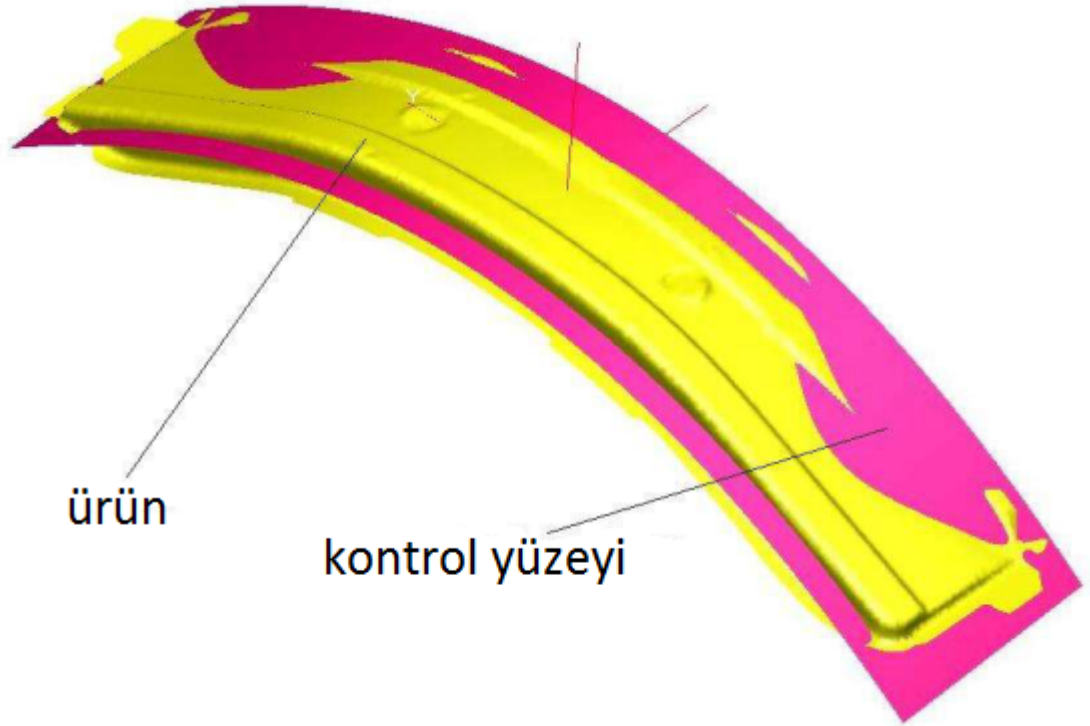
Kontrol yüzeyi algoritmasının adımları detaylıca tartışılmıştır. Bu temel adımlar aşağıda sıralanmıştır.

1. Kontrol yüzeyinin türünün tanımı: Geri yaylanma telafi problemi için hangi tür yüzeylerin kullanılması gerektiği
2. Kontrol yüzeyleri ile referans ve geri yaylanmış kafeslerin yakınlaştırılması: Doğru bir şekilde ağ geometrisine yakınlaştırmak için ağ boyunca kontrol yüzeyi nasıl monte edilir.
3. Dönüşüm yüzeyinin şeklinin hesaplanması: Uygun bir geri yaylanma telafi yüzeyi üretmek için yer değiştirme yöntemi yüzeylere nasıl uygulanabilir?
4. Araçların değiştirilmesi: Çekme yüzeyi ağlarının araçlarını değiştirmek için dönüşüm yüzeyi nasıl kullanılabilir.

Aşağıdaki paragrafta kontrol yüzeyi olarak silindirik bir yüzey kullanılarak bir kontrol yüzeyi algoritması uygulanır. Şekil optimizasyon olasılıkları algoritmayı uygun hale getirmek için çok sınırlıdır çünkü bu tür yüzeylerin arkasındaki matematikler basittir. 4 adım kolayca daha net hale getirilebilir. Bir sonraki bölümde uygulanabilir ancak daha esnek kontrol yüzeyi tanımı kullanarak daha karmaşık bir algoritma geliştirilmiştir.

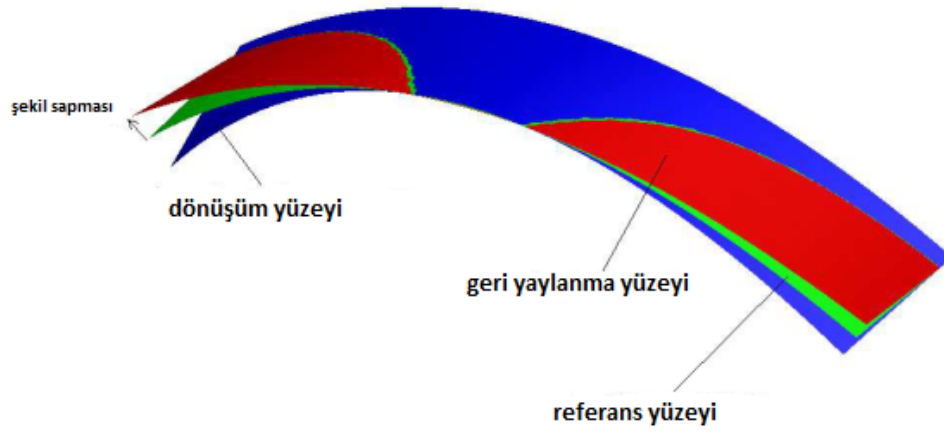
4.4.1 Kontrol Yüzey Algoritmasının Yapısı

Tüm çekme prosesi ile üretilmiş ürünler, yüzeylerin bir koleksiyonu olarak bir CAD dosyasında tanımlanan bir şekle sahiptir. Ürünün global şekli şekil parametrelerinin küçük bir set ile daha basit bir yüzeyle yakınlştırılabilir ve temsil edilebilir. Aşağıdaki görselde ona yaklaşan ürün ve kontrol yüzeyi gösterilmiştir.



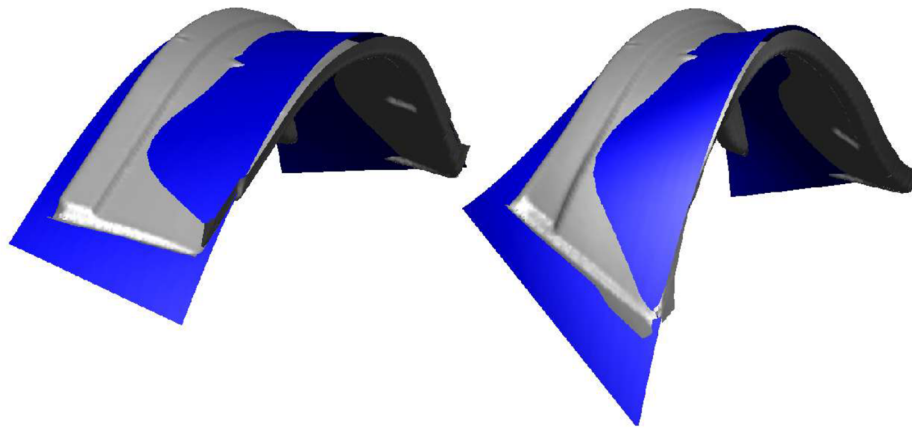
Şekil 4.7 Ürün ve Kontrol Yüzeyi

Yer değıştirme yönteminin fikri, referans ve geri yaylanmış kafesleri karşılaştırmak ve bir şekilsel sapma alanı elde etmektir. Bu şekilsel sapma alanı daha sonra bir aşırı bükme faktörü ile çarpılır ve ortaya çıkan şekil değıştirme alanı ürün geometrisine uygulanır. Kontrol yüzeyi yönteminde, referans ve geri yaylanmış kafesler, önce referans ve geri yaylanma yüzeyleri ile yaklaşık olarak tahmin edilir. Daha sonra yer değıştirme prensibi ağların yerine bu yüzeylere uygulanır. Bu resim Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Referans yüzeyi yeşil, geri yaylanmış yüzey kırmızı ve dönüşüm yüzeyi mavi olarak resmedilmiştir. Geri yaylanmış yüzey aşağıdaki görselde abartılı olarak resmedilmiştir. “Telafi geometri için bir yaklaşım” olarak görülebilen dönüşüm yüzeyi şekil sapması alınarak ve her zaman negatif aşırı bükme faktörü ile çarpılarak yaratılır.



Şekil 4.8 Kontrol Yüzeyi ve Yer Değiştirme Yöntemi

Bir sonraki adım, ürünün veya araç geometrisinin modifikasyonu için dönüşüm yüzeyini kullanmaktır. Bu, Şekil 4.9’da gösterilmiştir. Gri renkteki ürünü ve kontrol yüzeyi mavi renktedir. Daha sonra kontrol yüzeyinin şekli değiştirilmiştir. Ürün kontrol yüzeyine bağlı olduğundan, şekildeki değişikliği izler. Bu nedenle, bu işlem için iki yüzeye ve değiştirilecek ağı ihtiyaç vardır. Kontrol yüzeyi algoritmasında, bu iki yüzey referans ve dönüşüm yüzeyidir. İlk olarak ürün referans yüzeyine bağlanır. Daha sonra kontrol yüzeyinin şekli dönüşüm yüzeyine dönüşür ve ürün bu değişikliği şekil olarak izler. Bu yöntem analitik yüzey açıklamalarına dayandığından, modifikasyon alanı sürekli ve herhangi bir ağı bu şekilde modifiye edilebilir. Kontrol yüzeyi, genellikle düzgün olan düz bir yüzey olduğunda, modifikasyon da pürüzsüz olacaktır. Böylece, kontrol yüzeyi yöntemi ile, araçlar doğrudan modifiye edilir. Tüm algoritmalar, modifiye edilmiş araç seti ile, yeni bir sonlu elemanlar simülasyonu için kullanılır. Algoritma, gerekli geometrik doğruluk elde edilene kadar iteratif olarak da kullanılabilir.

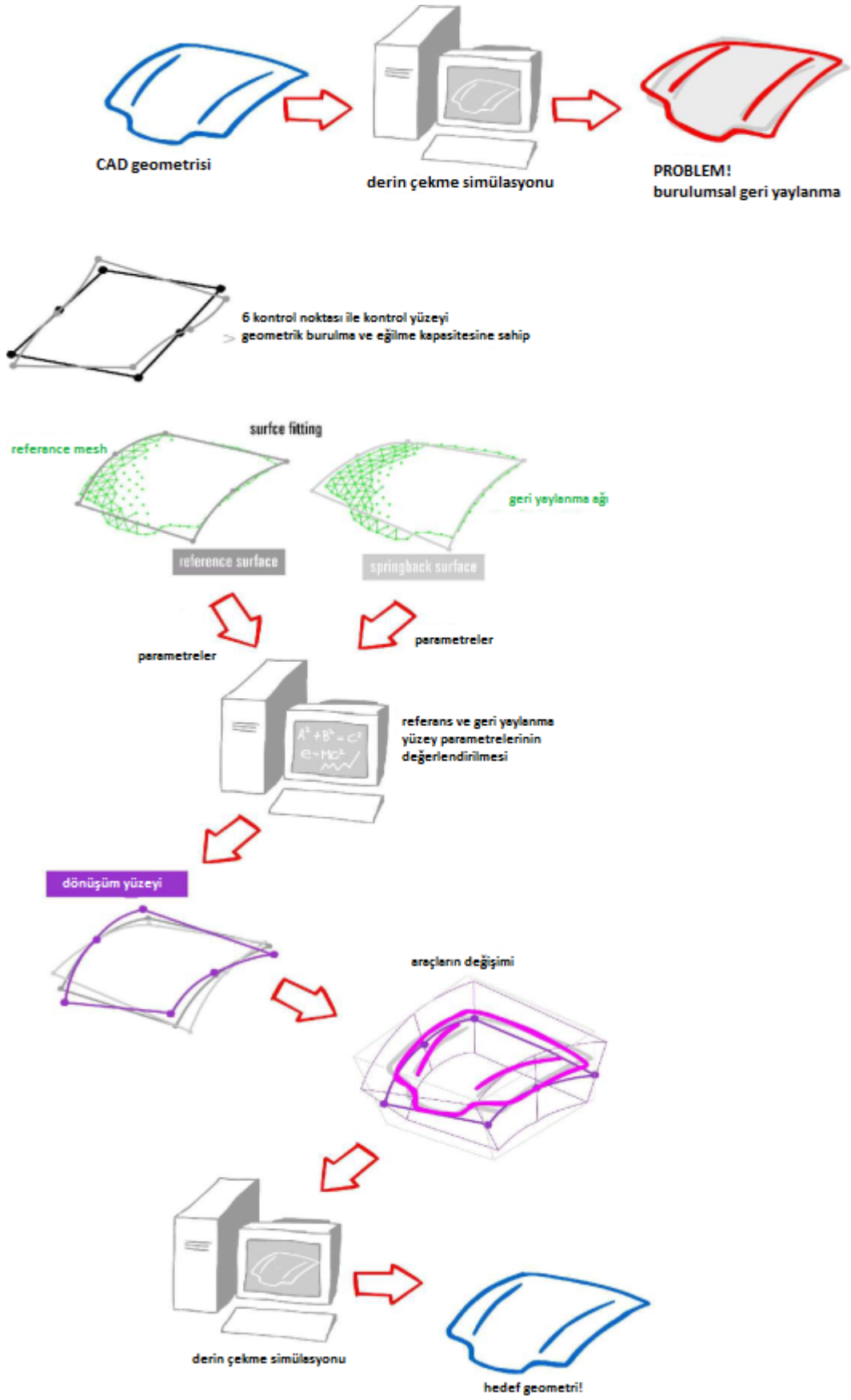


Şekil 4.9 Kontrol Yüzeyi Şekil Değişikliği

Konunun anlaşılması amacıyla kontrol yüzeyi algoritmasının ilk iterasyonu Şekil 4.10'da görselleştirilmiştir.

Yine, algoritmadaki adımlar şunlardır:

1. Çekme prosesi simülasyonu yapılır. Bu (hayali) durumda, burulma geri yaylanma problemi bulunur.
2. Kontrol yüzeyleri, referans yüzeyine ve geri yaylanma yüzeyine sahip olacak şekilde, referans ve geri yaylanmış ağlara uydurulur.
3. 2 yüzey, belirli bir aşırı bükme faktörü ve yer değiştirme yöntemi kullanılarak bir dönüşüm yüzeyi oluşturmak için kullanılır.
4. Takım ağları referans ve dönüşüm yüzeylerine göre modifiye edilmiştir.
5. Yeni bir sonlu elemanlar simülasyonu yapılır. Sonuçlanan geri yaylanmış yüzey istenen geometri ile karşılaştırılır istenilen geometrik doğruluk elde edilene kadar iterasyonlar tekrarlanır.



Şekil 4.10 Kontrol Yüzeyi İterasyonları

4.4.1.1 Adım Adım Kontrol Yüzeyi Algoritmaları

Bu paragrafta, algoritmadaki adımların her birinin matematiksel detayları açıklanmaktadır. Her adımın sınırlamaları ve sorunları daha ayrıntılı olarak tartışılmaktadır.

4.4.1.2 Bir Kontrol Yüzeyinin Tanımı

Temel olarak, kontrol yüzeyi için herhangi bir sürekli ve pürüzsüz yüzey gösterimi kullanılabilir. Kontrol yüzeyi, referans ve geri yaylanmış kafeslere yaklaşmak için kullanıldığından, yüzeyin şekildeki farkı doğru gösterebilmesi önemlidir. Yaklaşımın kendisi çok kaba olabilir. Matematiksel esneklik, kontrol yüzeyinin ikinci fonksiyonu için de önemlidir. Araçların değişikliği, yüzeyin şekli ve parametreleri bu modifikasyonun olasılıklarını tanımlar.

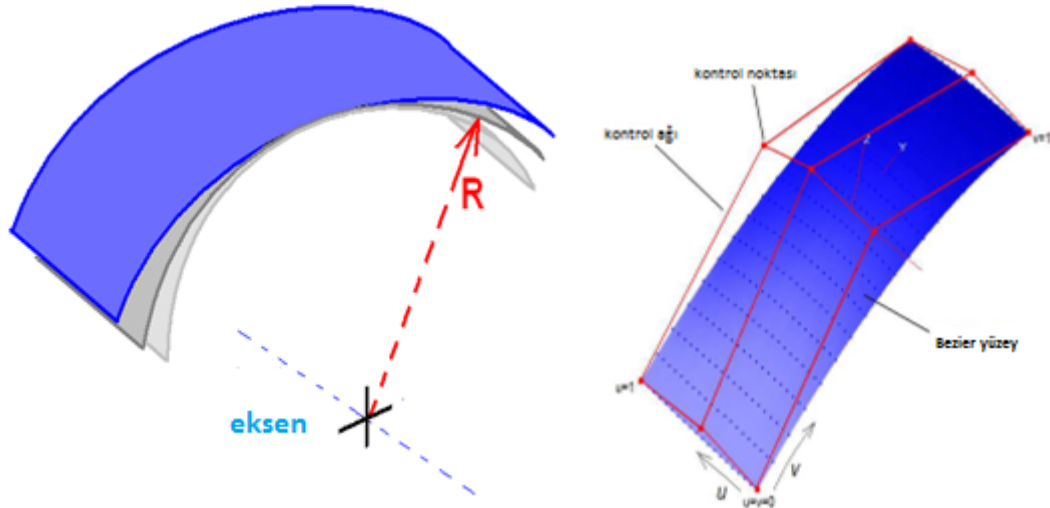
Bu yüzeyin tanımlanmasının, geri yaylanma probleminin türünü yansıtmaması, ürünün şeklini doğru bir şekilde tahmin edebilmesinden daha önemlidir.

Şekil modifikasyonu, kontrol yüzeyinin "matematiksel esnekliği" ile sınırlandırıldığından, kontrol yüzeyinin tanımı, optimizasyonun doğruluğunu etkiler. Örneğin: eğer burulmalı geri yaylanma fenomeni olan bir ürün silindirik (tek kavisli) bir yüzey kullanılarak optimize edilirse, optimizasyon algoritması sadece ürün geometrisini 'bükerek' en uygun takım şeklini bulmaya çalışacaktır, çünkü daha karmaşık şekil modifikasyonları gerçekleştirilemez. Ne yazık ki, ürünün bükülmesi geri yaylanma sorununu doğru bir şekilde telafi etmeyecek ve doğru bir takım geometrisi bulunmayacaktır.

Referans ve geri yaylanmış kafeslere yaklaşmak için kontrol yüzeyi bu kafeslerden geçirilir. Bu bağlantı işlemini sağlam hale getirmek için, yüzeydeki parametrelerin sayısının düşük kalması gerekmektedir. Yüzey parametreleri (nispeten) bağımsız olduğunda, bağlantı süreci de daha stabil hale gelir. Bu nedenle, doğru kontrol yüzeyinin bulunması, geri yaylanma telafisi doğruluğu ve algoritmanın sağlamlığı arasında bir uzlaşma bulunması anlamına gelir.

İki kullanışlı yüzey tanımı, sadece daha basit fazla bükme için kullanılan silindirik yüzey ve çok daha karmaşık şekil optimizasyonları için Bezier / B-spline yüzeyidir. Silindirik yüzey ayrıntılı geri yaylanma telafisi getirmeyecektir, ancak arkasındaki

matematik basit olduğundan, algoritmayı en basit haliyle göstermek için görsel-16'da kullanılmıştır.



Şekil 4.11 Silindirik Yüzey(sol) ve Bezier Yüzey (sağ)

4.4.1.3 Yüzey Uydurma

Uygun yüzey (ve parametre sayısı) seçildiğinde, referans ve geri yaylanmış kafeslerde düğüm nokta bulutu üzerine yerleştirilebilir. Her durumda, yüzeyin yerleştirilmesi, her bir düğümden yüzeye olan mesafelerin toplamının minimize edilmesiyle ilgili temel optimizasyon problemi anlamına gelir. En küçük kareler yöntemi burada uygulanır. Belirli bir parametreler kümesi için, her düğümden yüzeye olan uzaklıklar kare kare yapılır ve toplanır. Sonuç, düğüm koordinatlarının kümesine ve yüzey parametrelerine bağlı olarak Q objektif fonksiyonudur. Optimum parametre seti, Q'nun global minimumuna sahip olduğu yerde bulunabilir.

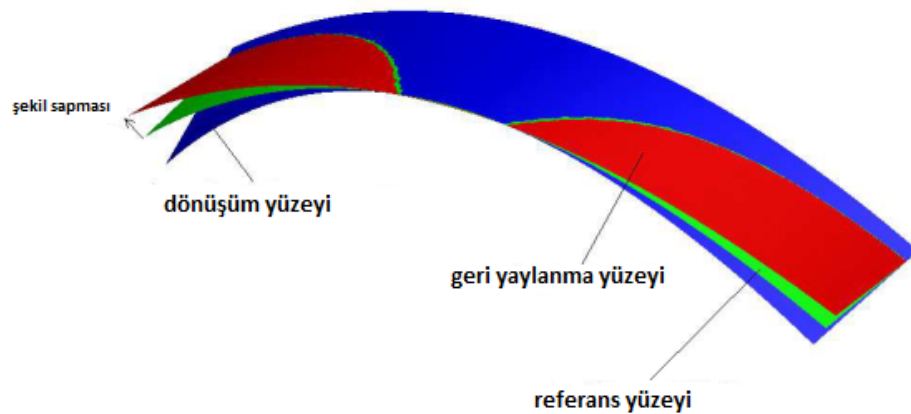
Downhill Simplex Yöntemi, Powell Yöntemi ve hatta evrimsel algoritmalar gibi çok sayıda çok değişkenli fonksiyon minimizasyonu algoritması vardır. Tüm stratejiler önemli bir soruna sahiptir: en azını bulacaklardır, ancak bu küresel minimum olmayabilir (yani en iyi uydurma yüzeyi için ayarlanmış olan parametre). Bu nedenle, kullanıcı, algoritmanın doğru minimum değeri bulması için makul bir ilk tahminde bulunmalıdır. Bu, silindirik bir yüzeyle basittir, ancak

"sarmal" bir Bezier yüzeyi ile çok karmaşık olabilir. Yüzey uydurma işlemi, parametre sayısını yavaşça artırarak daha kararlı hale getirilebilir: Uydurma işlemi, çok az miktarda parametre ile tanımlanan bir yüzey ile başlatılır. Bu yüzey uydurulur ve parametre sayısı artırılır. Bu yüzey ile eski yüzey kullanılarak başlangıç tahmininde yeni bir uydurma prosedürü başlatılır. Aynı şekilde, yüzey istenilen hassasiyetle donatılınca kadar parametrelerin sayısı iteratif olarak artmaktadır.

İlk tahminin tanımı sadece referans yüzeyinin uydurulması için önemlidir. Referans ve geri yaylanmış kafesler sadece biraz farklı olduğundan, geri yaylanma yüzeyinin uydurulması için bir başlangıç tahmini olarak sonuçtaki referans yüzeyi kullanılabilir. Bu, uydurma işlemini büyük ölçüde daha hızlı ve daha sağlam hale getirir. Referans yüzeyinin uydurulması sırasında küresel minimum yerine yerel bir minimum bulunursa, bir 'yanlış' yüzey monte edilir. Yine de geri yaylanma yüzeyi için çözüm muhtemelen "yanlış olarak" bir şekle yakınsayacak ve telafi algoritması iyi bir telafi bile gelebilir.

4.4.1.4 Dönüşüm Yüzeyinin Hesaplanması ve Koordinat Dönüşümü

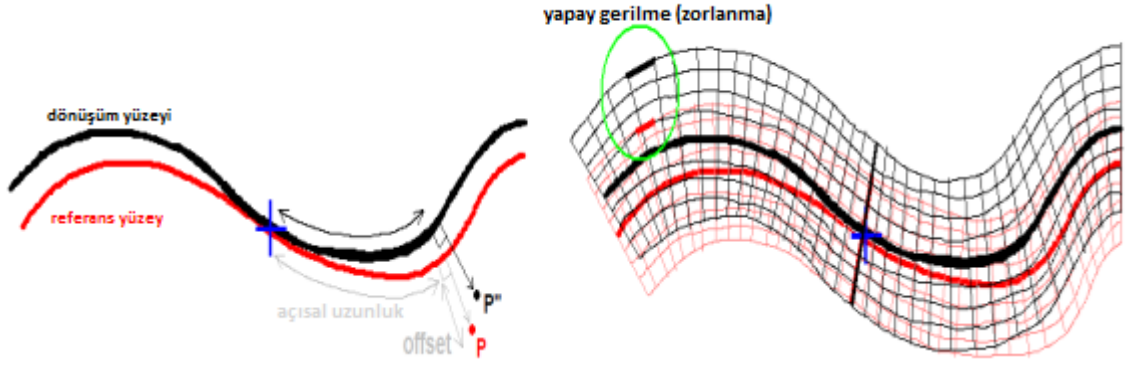
Referans ve geri yaylanma yüzeyleri için parametre setleri ile, bir sonraki adım, iyi bir dönüşüm yüzeyi bulmaktır. Önceki paragraflarda açıklandığı gibi, dönüşüm yüzeyi, standart yer değiştirme usulü ağlara uygulandığı şekilde yapılır. Geri yaylanma ve referans yüzeyleri arasındaki fark ile modifiye edilen geri yaylanma deformasyonu, dönüşüm yüzeyini oluşturan (negatif) aşırı bükme faktörü ile çarpılmaktadır.



Şekil 4.12 Dönüşüm Yüzeyinin Hesaplanması

Zorluk, 'doğru' aşırı eğilme faktörünü tanımlamaktır. Genel olarak, algoritma istenen ürün geometrisine ulaşmak için birkaç iterasyon gerçekleştirecektir. Aşırı bükülme faktörü çok büyük alındığında, şekil her bir yinelemede fazla telafi edilecektir ve optimizasyon işlemi kararsız hale gelebilir. Aşırı bükme faktörü çok düşük alınırsa, optimum kalıp şeklini elde etmek için birçok iterasyon gerekli olacaktır. Bu, işlemi çok yavaşlatacaktır, çünkü her bir yinelemede, pahalı bir sonlu elemanlar simülasyonu gerçekleştirilir. Daha önce de belirtildiği gibi, sektörün temel kuralı, % -130'luk bir faktörle aşırı bükme faktörüdür. Bu, referans ve geri yaylanma yüzeyi arasında 10 mm'lik bir boyut sapması, 13 mm'lik bir telafi ölçüsü (ters yönde) anlamına gelir. Bu gerçekten çok küresel bir sayıdır; Her bir ürün için aşırı değişken faktör çok farklı olabilir. Optimizasyon işlemi sırasında aşırı bükme faktörünü değiştirmek mümkündür, ancak bu sadece çok sayıda yineleme ile etkilidir.

Referans yüzeyi ve dönüştürme yüzeyi ile şekil değişikliği gerçekleştirilebilir. Şekil modifikasyonunun arkasındaki genel fikir en belirgin şekilde iki boyutta açıklanır. Şekil 4.13'de süreç görselleştirilmiştir. Düğüm p, modifiye edilen araç ağındaki bir düğümdür. İlk olarak, referans yüzeyine normal olan ve p düğümündeki noktalar aranır. Bu ofsetvektörün uzunluğuna ofset denir. Düğüm p, referans yüzeyinde "altında" olduğunda ofset değişkeninin negatif bir değere sahip olduğunu unutmayın. Referans yüzeyindeki ofset vektörünün yeri, referans yüzeyine göre düğümün yerini tanımlayan ikinci değişkendir. Bu 2 boyutlu durumda, yüzey boyunca yay uzunluğu kullanılabilir. Şimdi düğümün konumunu referans yüzey boyunca bir "Kartezyen" koordinat sisteminde tanımladık. Modifiye ağda p düğümünün yerini bulmak için, ark uzunluğu artık dönüşüm yüzeyi boyunca ortaya konmuştur. Bu arkın sonunda, ofset değerine eşit uzunluktaki yeni bir normal vektör oluşturulur. Bu vektör, değiştirilmiş düğüm p'yi işaret etmektedir. Hem referans hem de dönüşüm yüzeyi aynı tanımlamaya sahip olduğu sürece, referans yüzeyinin hangi tarafının alt taraf olarak tanımlandığına dikkat edin.



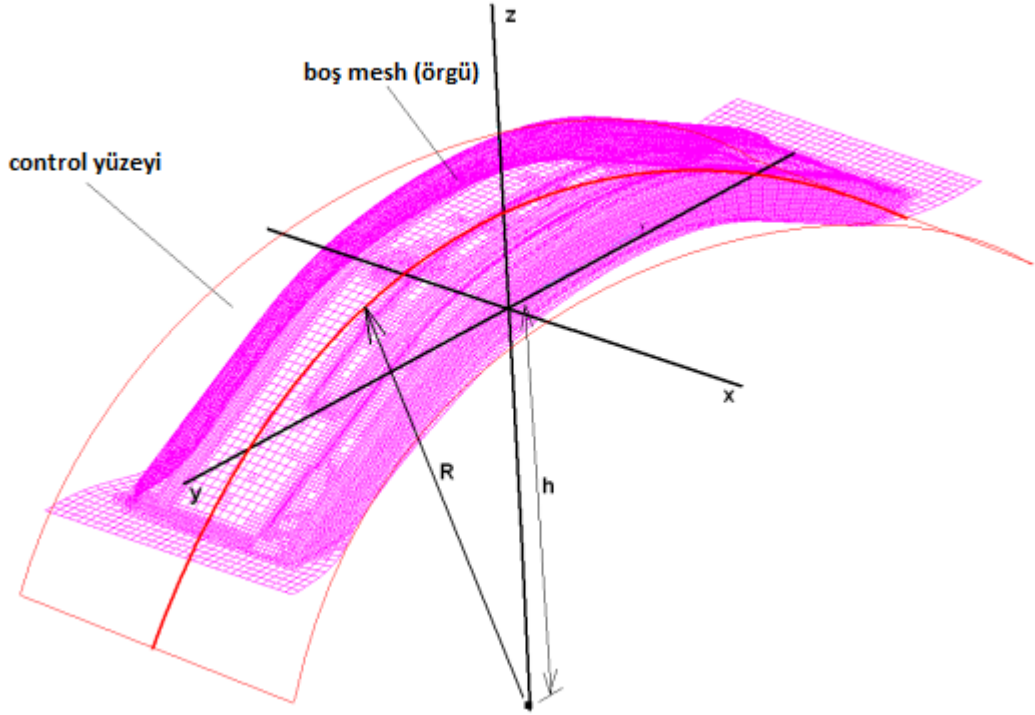
Şekil 4.13 Mesh Değişiklik Prensibi

Referans yüzeyinde bulunan bir eğri parçası, dönüştürülmüş koordinat sisteminde tam olarak aynı uzunluğa sahip olacaktır. Fakat bu eğri parçasının ofseti sıfır olmadığında, koordinat dönüşümü sırasında yapay gerilmeyi indükleyerek gerilecektir veya sıkıştırılacaktır (Şekil 4.13'de yeşil dairesinde kalın kırmızı ve siyah eğri parçaları farklı uzunluklara sahiptir). Bu, değiştirilmiş geometrinin yapay olarak deforme olacağı anlamına gelir. Bununla birlikte, geometrinin düzgünlüğü ve detayları da çok iyi korunacaktır, çünkü şekil değişikliği tüm yapı üzerinde çok fazladır. Bu nedenle, şekil değişikliği, sonraki bölümlerde kapsamlı olarak gösterileceği gibi CAD dosyaları üzerinde de gerçekleştirilebilir.

Kontrol yüzeyi bir Bezier veya B-spline yüzeyi olarak tanımlandığında, referans yüzeyindeki ofset vektörünün yerini tanımlamak için ark boyu prensibinin kullanılması imkansızdır. Bu nedenle, yüzeydeki yerel bir koordinat yerine kullanılır. Bunun nasıl çalıştığı sonraki bölümlerde açıklanmıştır.

4.4.1.5 2 Boyutlu Dairesel Ark Algoritması

Bu paragrafta, kontrol yüzeyi algoritması silindirik bir kontrol yüzeyi ile uygulanır. Tek yüzey yarıçapının merkezi z ekseninde bulunur, bu da yüzeyin iki parametre ile tam olarak tanımlanabileceği anlamına gelir: R yarıçapı ve merkez noktasının yüksekliği h. Bu şekil 4.14'de görselleştirilmiştir. Yapısal bir parçanın boş ağı pembe, kontrol yüzeyi ince kırmızı çizgilerle görselleştirilmiştir. R yarıçapını (R) değiştirerek, yüzeyin eğriliği değiştirilir, x-ekseni etrafında 'bükülür'. Pratik uygulama için şekil optimizasyon olasılıkları çok sınırlıdır, çünkü bu tür bir yüzeyin arkasındaki matematik basittir, optimizasyon süreci açık hale getirilebilir.

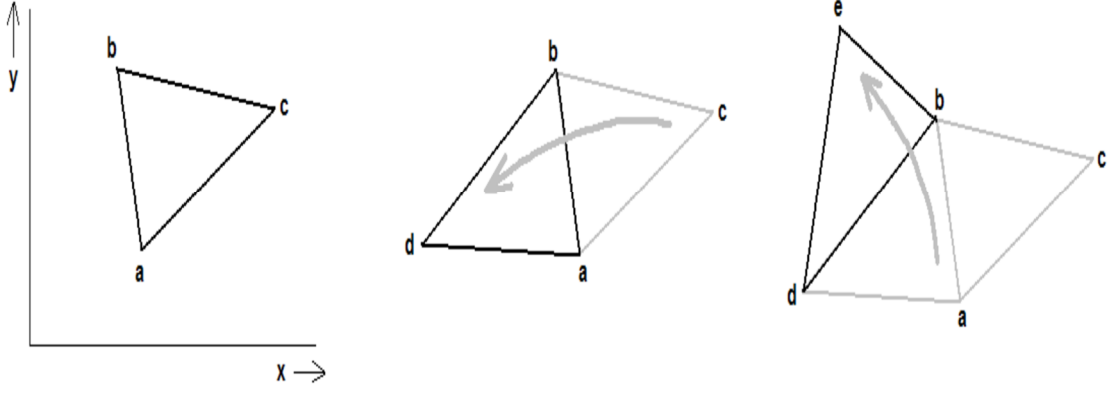


Şekil 4.14 Tek Bükülmüş Kontrol Yüzeyi

4.4.1.6 Tek Bükülmüş Kontrol Yüzeyi Algoritması

Önceki paragraflarda açıklandığı gibi, eğri uydurma için en küçük kareler mesafesi fonksiyonunun en aza indirilmesi gerekir. Bu, h ve R parametreleriyle çok değişkenli bir minimizasyondur. 1965 yılında Nelder ve Mead tarafından geliştirilen Downhill Simplex yöntemi seçilmiştir. “Downhill simpleks yöntemi, hesaplama yükü küçük olan bir problem için liyakat rakamının “hızlı çalışan bir şey elde etmesi” durumunda sıklıkla kullanılan en iyi yöntem olabilir.

Yöntemin fikri, N -boyutlu bir minimizasyon problemi için $N + 1$ puan (vertices) poligonunu almaktır. Bu çokgen bir simpleks olarak adlandırılır. Bir başlangıç simpleksi kullanıcı tarafından tanımlanır ve daha sonra simpleks minimum en düşük olana kadar işlev boyunca aşağı doğru gider. Dört temel simpleks hareketi vardır: yansıma, yansıma ve genişleme, daralma ve çoklu daralma. Burada en önemli hareketi, yansımayı açıklayacağız.



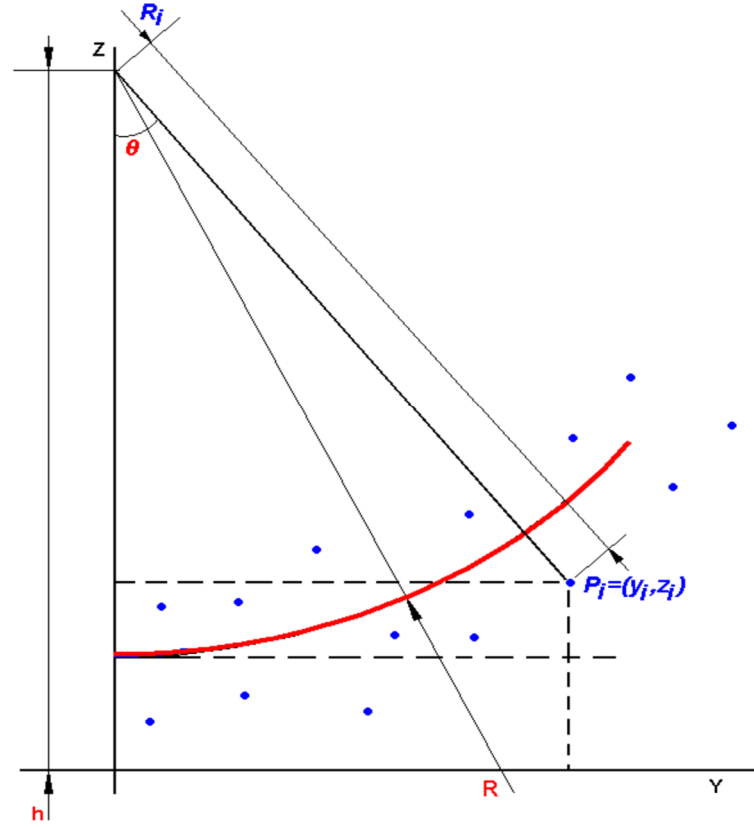
Şekil 4.15 Tek Yönlü Yansımada

Şekil 4.15’de ABC iki boyutlu bir problem için başlangıç simpleksidir. İşlev bu üç noktada değerlendirilmiştir. Noktası en yüksek değere sahip olduğunda, nokta AB çizgisi boyunca yansıtılır. Daha sonra, D noktası için yeni bir fonksiyon değerlendirmesi gerçekleştirilir. Şimdi A noktası, en yüksek fonksiyon değerine sahip olduğunda üçgen, BD hattı boyunca çevrilir. Bu işlem, hedef fonksiyonun değeri, belirli bir doğruluktan daha fazla değişmeyene kadar devam eder.

Başlangıç simpleksinin tanımı matematiksel olarak tanımlanmamıştır. Temel olarak, herhangi bir koordinat kümesi seçilebilir, ancak sonuç, mutlaka fonksiyonun global asgari olmak zorunda değildir. Dairesel bir ark için, h ve R'nin değerleri, kafesin bir görüntüsünden "tahmin edilebilir". Bu noktayı üçgenin merkezi olarak seçtik ve etrafındaki diğer noktaları h ve R için ayrı ayrı tanımlanmış bir aralık ile konumlandırdık. Bir startimplex oluşturmak için standart bir strateji yoktur, bu yüzden problemler olduğunda başka fikirler düşünülebilir.

Bir hedef fonksiyon Q tanımlanır, bir nokta ile eğri arasındaki mesafelerin uydurulması aşağıdaki gibi toplanır:

$$Q R, h = \sum_{i=1}^n R - R_i^2 = \sum_{i=1}^n (R - \sqrt{h - z_1^2 + y_1^2})^2 \quad (4.1)$$



Şekil 4.16 Curve Uydurma

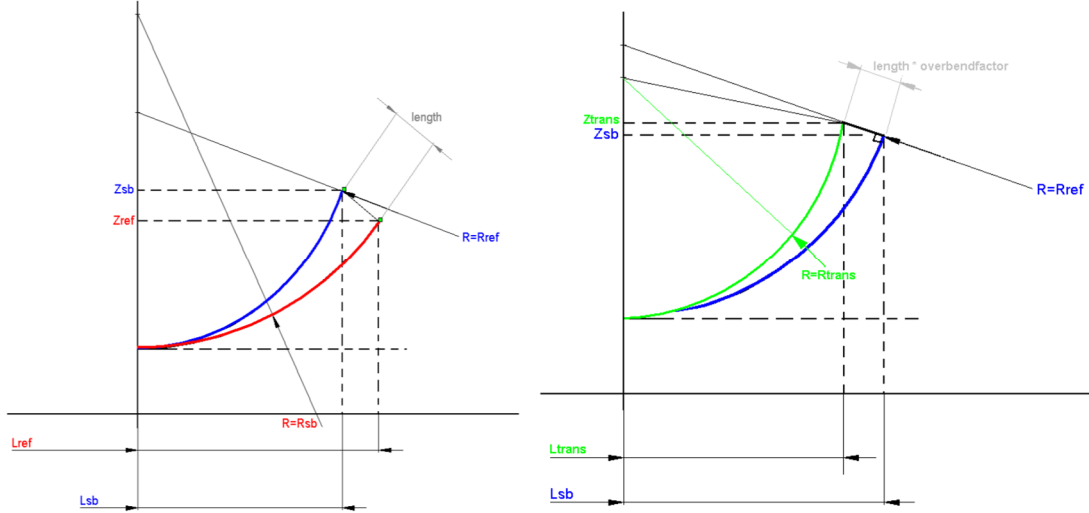
Merkez noktası etrafında bir kutup-koordinat sisteminde i -inci düğümün yarıçapı olarak R_i ile (h parametresi ile tanımlanır). Değişkenler Şekil 4.16'da gösterilmiştir.

Eğri uydurma, sadece 2 parametrenin bulunmasından dolayı beklenildiği kadar hızlı bir şekilde sağlanmıştır. Daha fazla değişken bulunması gerektiğinde, Nelder-Mead yöntemi güvenilir olmayabilir, çünkü parametreler başlangıç değerlerinin yakınında mutlaka yakınsama olmaz.

4.4.1.7 Dönüşüm Önerisi

Referans ve geri yaylanma yüzeyleri için mevcut parametreler ile, bir dönüşüm yüzeyi için bir hesaplama hesaplanabilir. Referans ve geri yaylanma yüzeyi arasındaki mesafe Şekil 4.16'da tanımlanmıştır. L_{ref} parametresi, nodal y koordinatlarının en büyüğüdür ve ürünün genişliğini temsil eder. Şimdi referans yüzeyi boyunca ark uzunluğu hesaplanmıştır. Geri yaylanma yüzeyinin uç noktası, yay ark yüzeyi boyunca aynı yay uzunluğunun hareket ettirilmesiyle belirlenir. İki

uç nokta arasındaki mesafe hesaplanır. Geri yaylanma yüzeyinin z yönünde kaydırıldığını, böylece geri yaylanan yüzeyin minimumunun referans yüzeyinin minimumu ile çakıştığını unutmayın.



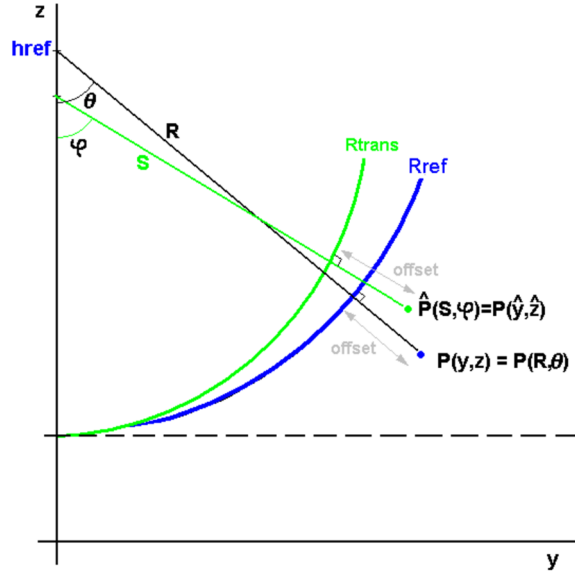
Şekil 4.17 Yüzeyler Arasındaki Mesafenin Belirlenmesi (solda) ve Bir Dönüşüm Yüzeyinin Oluşturulması (sağda)

Bu uzunlukla, dönüşüm yüzeyi Şekil 4.16'da görselleştirilmiş olarak tanımlanabilir. Bu uzunluğa sahip normal bir vektör, referans yüzeyinin sonunda belirli bir aşırı bükme faktörü ile çarpılır. Dönüşüm yüzeyinin son noktasına işaret eder. Yine, bu yüzeyin minimum değeri, referans eğrisininkiyle çakışmaktadır. Şimdi, dairesel eğri tamamen tanımlanmıştır ve dönüşüm yarıçapı Rtrans hesaplanabilir.

Dönüşüm eğrisinin bir uç noktasını, uzunluk değerinin hesaplanması ile aynı şekilde, yani vektör için normal sınırlama olmaksızın, hesaplamak mümkündür. Bu, sadece sayısal olarak çözülebilen doğrusal olmayan bir denklem ile sonuçlanır. Daha basit bir yaklaşımı tercih ettik çünkü pratik durumlarda Rref'e göre uzunluk çok küçüktür.

4.4.1.8 Ağın Değiştirilmesi

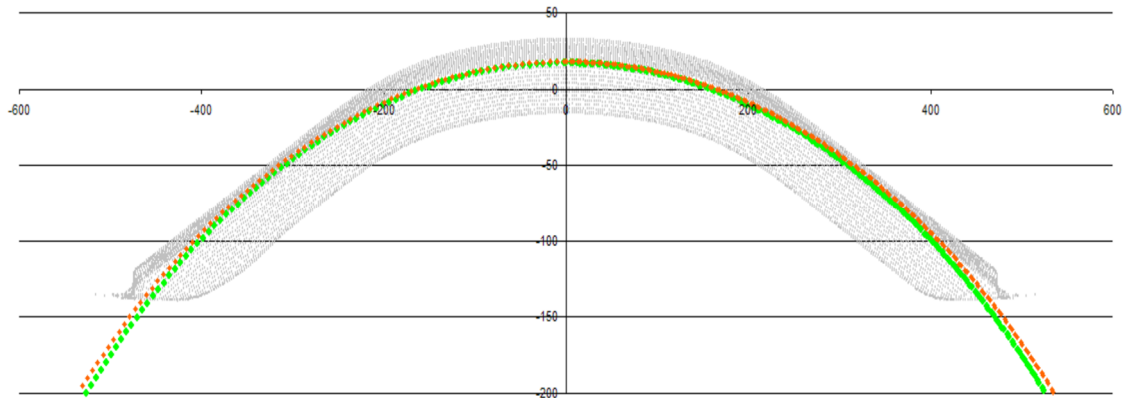
Son olarak, Rtrans ve htrans değerleri ile bir koordinat dönüşümü gerçekleştirilir. Yeni konum aşağıdaki gibi hesaplanabilen P noktası ile belirlenir; İlk olarak, referans koordinat sisteminde iki polar koordinatlar ve onun düğümündeki Ri koordinatı hesaplanır:



Şekil 4.18 Mesh Modifikasyonu Prensihi

4.4.1.9 Örnek

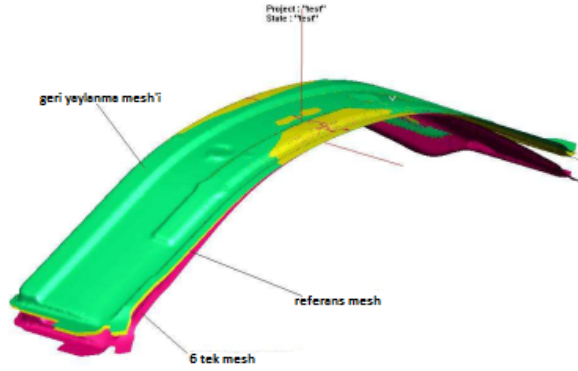
Algoritma şimdi tamamlandı. Referans ürün ile test edilmiştir. Aşağıdaki Şekil 4.18 'de referans mesh görüntülenir ve yaklaşma eğrisi yeşile döner. Turuncu eğri, yaylı ağı yaklaşılmasını temsil eder. Her iki yaklaşım da bir saniyeden az sürüyor. Beklendiği gibi, geri çekmeli ağı eğrisi daha büyük bir yarıçapa sahiptir.



Şekil 4.19 Gerçek Bir Ürünün Tahmini

Bu iki eğrinden, 5.0'ın aşırı eğilme faktörü ile bir dönüşüm yüzeyi hesaplanır. Bu gerçekçi değildir, ancak resmi temizler ve ürün şeklinin büyük istenmeyen deformasyonlar olmadan büyük ölçüde bükülebileceğini gösterir. Artık algoritmanın başarılı olup olmadığını kontrol etmek için yeni bir simülasyon

gerçekleştirilebilir. Açıkçası, silindirik kontrol yüzeyi herhangi bir geri yaylanma problemi için çok kaba olduğundan, yeni bir sonlu elemanlar simülasyonu hesaplaması yapmadık.



Şekil 4.20 DC Yapısal Parçanın Algoritma ile Aşırı Yüklenmesi

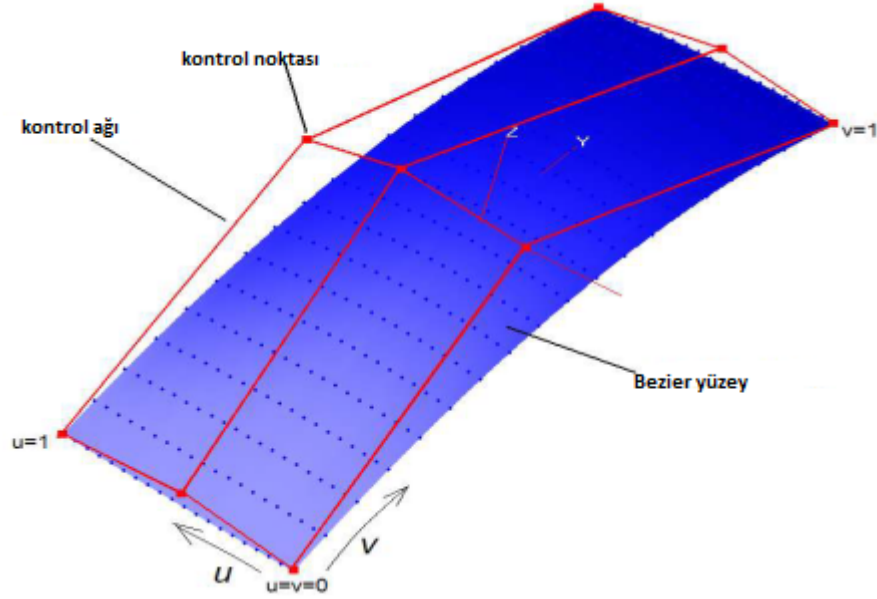
4.4.2 3 Boyutlu Bezier Yüzey Algoritması

Endüstriyel uygulamalar için, bu bölümde sunulan algoritma çok sınırlı olacaktır. Karmaşık yaylı deformasyonları telafi etmek için daha esnek bir algoritma geliştirilmiştir. Önceki algoritmadan gelen dairesel kontrol yüzeyi, daha esnek Bezier ve B-spline yüzeylerle değiştirildi. Algoritma prensibi aynı kalır, ancak arkasındaki matematik artık basit formüller ile açıklanamaz. Bu bölümde, algoritmadaki prosedürler ve arkasındaki matematik ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Bu nedenle bu bölüm ayrıca algoritma için bir referans kılavuz olarak hizmet vermektedir.

Birinci paragraf, parametrik geometri matematiğine giriş olarak hizmet eder. Burada Bezier ve B-spline yüzeylerin arkasındaki bazı temel kavramlar tanıtılmakta olup, bunlar aşağıdaki paragraflarda sıkça kullanılacaktır.

Sonraki paragraflarda algoritmanın prosedürü detaylı olarak açıklanmıştır. Prosedür ayrı paragraflarda ele alınan ayrı adımlarda ayrılmıştır. İlk adım uygun bir Bezier kontrol yüzeyinin tanımıdır. Kullanıcı yüzeyin karmaşıklığını tanımlayabilir ve algoritma kararlılığı ve kompanzasyon doğruluğu arasında bir uzlaşma bulabilir. İkinci adımda, yüzeyler uydurulmuştur. İzlenen prosedür açıklanmıştır. Yüzey uydurma prosedürünün matematiği karmaşık olduğundan,

bunlar daha sonraki paragraflarda tartışılmaktadır. Üçüncü adım, dönüşüm yüzeyini hesaplamaktır. Referans, geri yaylanma ve dönüştürme yüzeyinin matematiksel olarak nasıl bağlandığı burada gösterilmektedir. Son olarak, araçlar modifiye edilmiştir. Geometrinin modifikasyonu şimdi Bezier yüzeylerine dayanmaktadır ve biraz daha fazla ilgilidir.



Şekil 4.21 Kuadratik Bir Bezier Yüzeyi ile kuadratik

Belirtildiği gibi, bir nokta bulutu aracılığıyla (ikinci adımda) parametrik bir yüzeyin yerleştirilmesi prosedürü önemsiz bir görev değildir. Ürünün bir kısmında yerel yaylı telafiye gerçekleştirmek de mümkündür. Bazı durumlarda, sadece ürünün bu kısmının sıkı geometrik gereksinimleri vardır. Yerel yaylı kompanzasyon, algoritmanın doğruluğunu arttırmak için de kullanılabilir: küresel bir dengelemeden sonra, kalan problem alanları tek tek ve takip eden iterasyonlarda daha yüksek doğrulukla ele alınabilir. Bu uygulandığında, sonraki paragraflarda sunulmuştur.

4.4.2.1 Temel Parametrik Geometri Matematiği

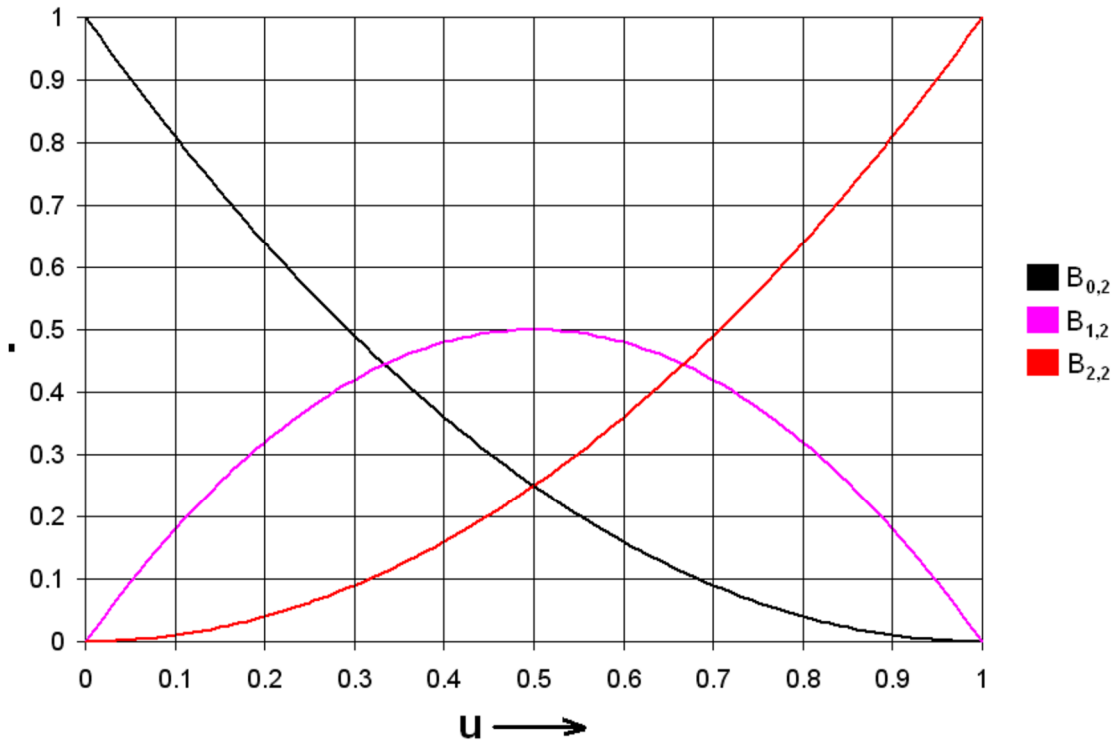
Eğriler ve yüzeyler örtük ve parametrik fonksiyonlarda sunulabilir. Gizli denklemler için, geometri, koordinatların bir (genellikle doğrusal olmayan) fonksiyonuyla tanımlanır.

Parametrik geometri için, her bir koordinat değeri, daha esnek geometrik modelleme ve manipülasyon olanakları sağlayan bir veya daha fazla parametrenin ayrı bir fonksiyonu ile temsil edilir:

Bezier eğrisi en basit parametrik eğridir. 1960'larda, araba gövdelerinin karmaşık geometrilerini tanımlamak için geliştirilmiştir ve n'inci derecenin Bezier eğrisi, bir $n + 1$ kontrol noktaların P_i 'den oluşan kontrol poligani tarafından kontrol edilmiştir. Eğri, eğri boyunca 0'dan 1'e kadar değişen bir parametreye sahiptir. Belirli bir parametre değerinde eğrinin koordinat değerlerinin hesaplanması için, $n + 1$ karıştırma fonksiyonları (B_i, n) değerlendirilir. Eğrinin koordinat değerleri, kontrol noktalarının her birinin ilgili harmanlama fonksiyonu ile çarpılması ve sonuçların toplanması ile bulunur.

$$\vec{C}(u) = \sum_{i=0}^n B_{i,n}(u) \vec{P}_i \quad 0 \leq u \leq 1 \quad (4.2)$$

$$B_{i,n}(u) = \frac{n!}{i!(n-i)!} u^i (1-u)^{n-i} \quad 0 \leq i \leq n \quad (4.3)$$



Şekil 4.22 Kuadratik Bezier Eğrisi için Üç Bernstein Karıştırma Fonksiyonu

Bu kavram Bezier yüzeylerinin modellenmesi için genişletilmiştir. Yüzeyler için tensör ürün şeması en yaygın şekilde uygulanır. Temel fonksiyonlar artık tek

değişkenli fonksiyonların iki değişkenli kombinasyonlarıdır. Aşağıdaki fonksiyon, bir n 'inci derece yüzeyinin tanımlamasıdır.

P , üç boyutlu kontrol noktalarının $m + 1$ matrisi ile $n + 1$ olduğunda ve f ve g , her iki parametre için Bernstein karıştırma fonksiyonlarını içeren $n + 1$ ve $m + 1$ vektörleridir. S 'nin x , y ve z koordinatlarını içeren bir vektör olduğunu, iki karıştırma fonksiyonunun da vektörlere uygulandığını unutmayın. Bir Bezier eğrisi veya yüzeyi her zaman sınırlanır ve sadece parametre aralığında tanımlanır.

Tek bir polinom segmentinden (patch) oluşan Bezier yüzeyinin sınırlamaları vardır. Yüzey bir nokta bulutu ile donatıldığında ve çok sayıda kısıtlamanın karşılanması gerektiğinde, çok yüksek bir dereceye ihtiyaç duyulur. Daha yüksek derece fonksiyonları genellikle sayısal olarak verimsiz ve muhtemelen kararsızdır. Bu nedenle parçalı polinom yüzeyler geliştirilmiştir. Parametre bölgesi daha sonra farklı bölgelere bölünür. Örneğin: bir kübik Bezier eğrisinin parametre aralığında, 2 ek kesme noktası tanımlanmıştır.

Şimdi, eğri, her biri 4 kontrol noktasına sahip olan üç ayrı kübik eğri parçası ile oluşturulmuştur. Ortaya çıkan 12 kontrol noktasının bağımsız olarak seçilemeyeceği açıktır, çünkü eğrinin en azından $C0$ sürekli (kesintisiz) olması gerekir. Bir segmentin son kontrol noktası, takip eden bölümün ilkiyle aynı olmalıdır. Geçiş alanının daha yüksek bir süreklilik seviyesine sahip olması gerektiğinde, daha az bağımsız kontrol noktaları gerekmektedir. Bu sistemin iki dezavantajı var:

- Zorunlu kontrol noktaları için yedekli veri depolanmalıdır.
- Kontrol noktalarının hareketi üzerindeki kısıtlamalardan dolayı, eğrinin şekillendirilmesi, sezgisel olmayan hale gelebilir.

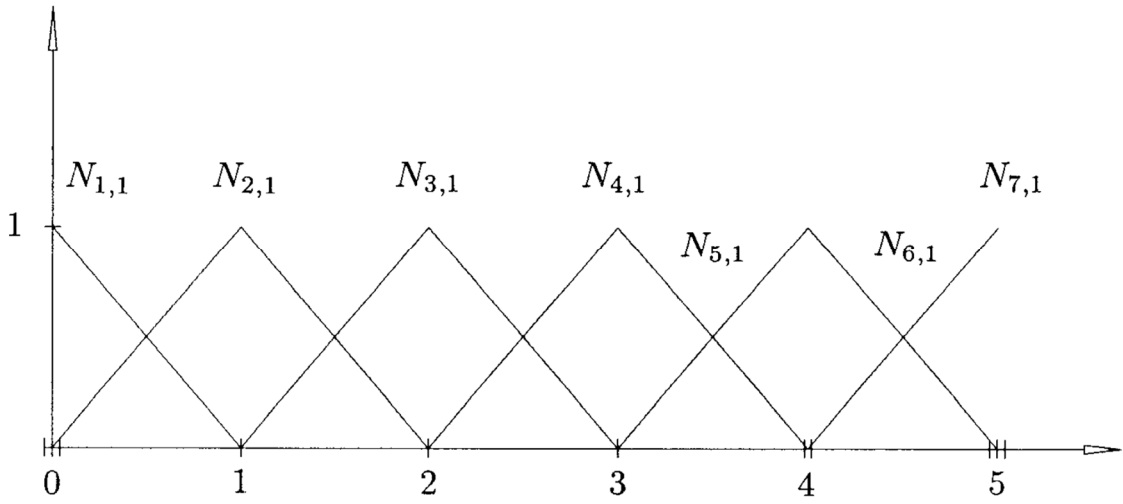
Bu problemleri çözmek için B-spline eğrileri ve yüzeyleri geliştirilmiştir. Karıştırma fonksiyonları birden fazla polinomdan oluşacak şekilde modifiye edilmiştir. Kontrol noktaları, hiçbir yedek verisinin saklanması gerekmeyeceği ve eğrinin şekillendirilmesinin nispeten kolay olduğu şekilde tanımlanır. Şekil işlevleri sadece sınırlı sayıda alt -interede sıfırdan farklıdır. Bu, bir kontrol noktası hareket ettirildiğinde, eğrinin sadece sınırlı bir kısmının değiştirildiği anlamına

gelir. Parametre aralığını bölmek yerine, "düğüm vektörü" olarak adlandırılan U kullanılır ve eğrinin temel formu ve denklemler şekil 4.22 ve şekil 4.23' teki yüzey tanımları korunur.

i 'nci, p 'inci derece B-spline harmanlama fonksiyonu şimdi aşağıdaki formülle yinelemeli olarak hesaplanabilir:

$$N_{i,p}(u) = \frac{u-u_i}{u_{i+p}-u_i} N_{i,p-1}(u) + \frac{u_{i+1}-u}{u_{i+1}-u_{i+1-p}} N_{i+1,p-1}(u) \quad (4.4)$$

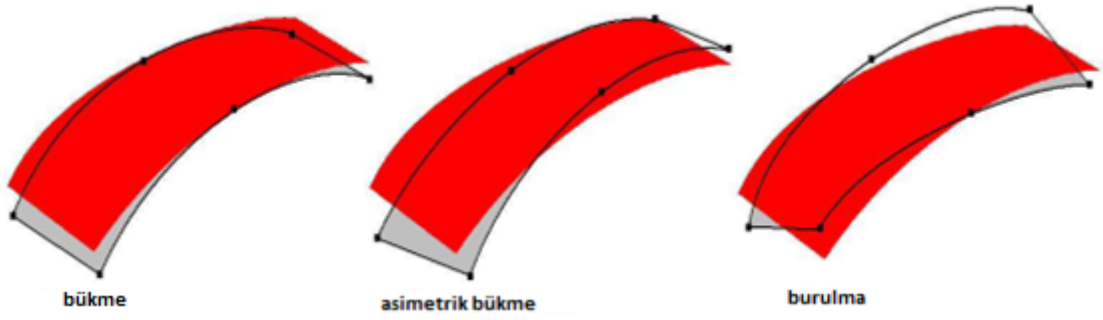
Örnek olarak, parçalı bir doğrusal B-spline için karıştırma fonksiyonları resimde gösterilmiştir. Bu durumda, u parametresinin aralığı olarak alınır.



Şekil 4.23 Sıfır Olmayan Doğrusal B-spline Karıştırma Fonksiyonları

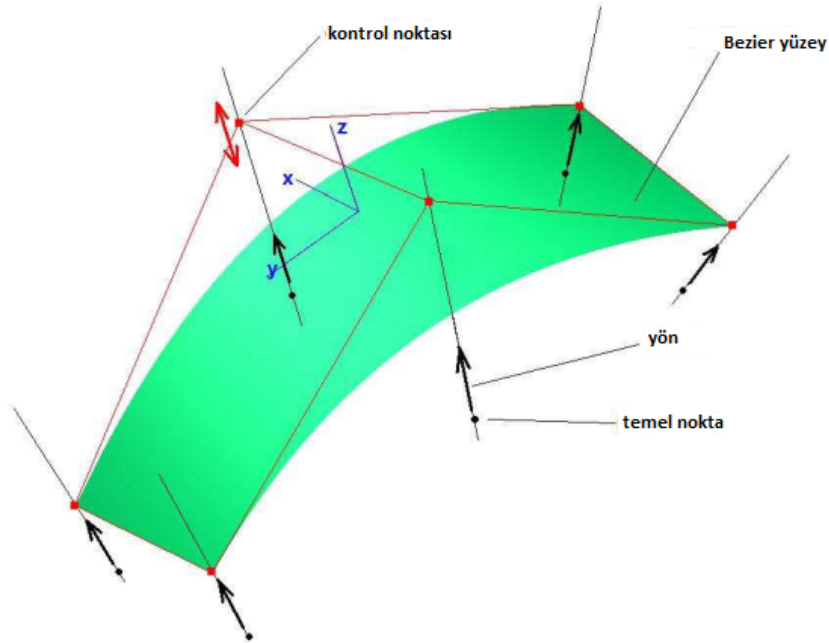
4.4.2.2 Algoritma Prosedürü

Birinci adım olarak algoritma kurulum dosyasında, u ve v yönünde yüzeyin derecesi belirtilir. Daha önce açıklandığı gibi, kontrol yüzeyi, algoritmanın telafi olasılıklarını tanımlar. Resimde şekil 4.24'de bir karesel yüzey ile gösterilmiştir. (Asimetrik) bükme ve burulma için kullanılabilir. Kamber uygulamasının mümkün kılınması için, en azından ikinci dereceden kuadratik bir yüzeye ihtiyaç vardır. Bu yüzeyler çoğu küresel geri yaylanma sorunları telafi edilebilir.



Şekil 4.24 Kuadratik Bir Yüzeyin Doğrusal Olarak Deformasyon Olasılıkları

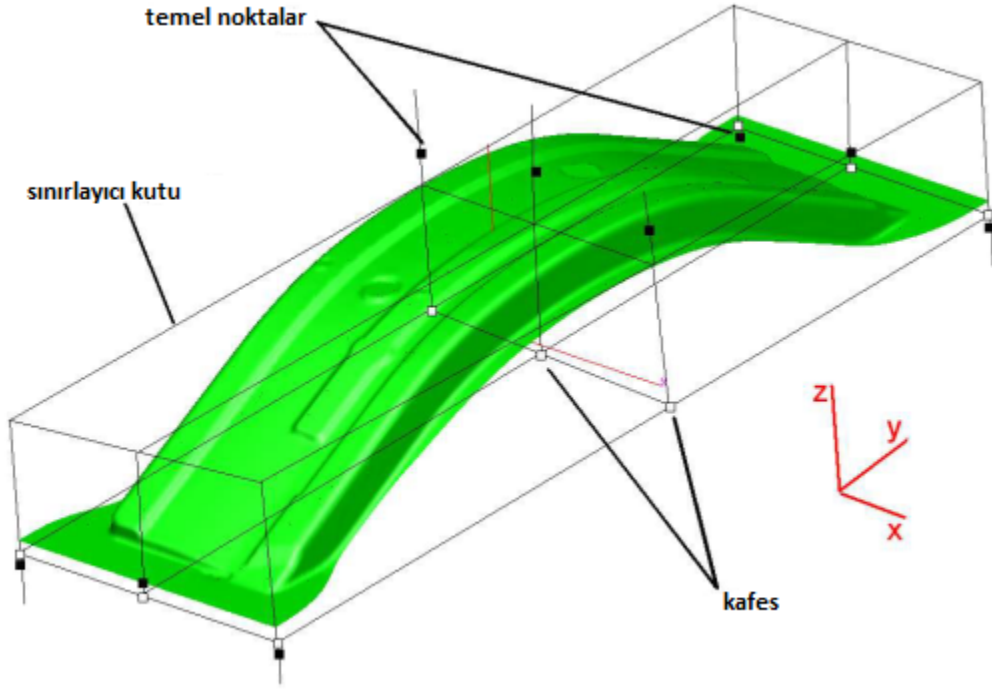
Kuadratik yüzey ile nispeten basit doğrusal 6 kontrol noktası tarafından tanımlanmıştır, bu yüzden şekli tanımlamak için 18 koordinat değeri gereklidir. Bu, yüzey uydurma için önemli bir problem sunmaktadır: kontrol noktası koordinatları, büyük ölçüde bağımlıdır ve 18 serbest değişkenin bir kısmı, yüzey montajının zaten kararsız hale gelebileceği anlamına gelir. Bu nedenle, yüzey uydurma değişkenlerinin sayısını azaltmak için, her kontrol noktasının sadece tanımlanmış bir (3D) çizgi boyunca hareket etmesine izin verilir. Kontrol noktasının konumu şimdi bu satır boyunca konum olarak adlandırılan tek bir koordinatla açıklanabilir. Çizgi bir taban noktası ve yön denilen bir birlik vektörü ile tanımlanır. Şekil 4.25’de 6 basepoints ve altı yönüyle, ikinci dereceden bir Bezier yüzeyi ile doğrusal olarak gösterilmektedir. Yüzey belirli bir ağa yaklaşacak şekilde monte edilmeden önce, bu değişkenler tanımlanır.



Şekil 4.25 Kuadratik Yüzeye Göre Doğrusal, Temel Noktaları ve Yönleri

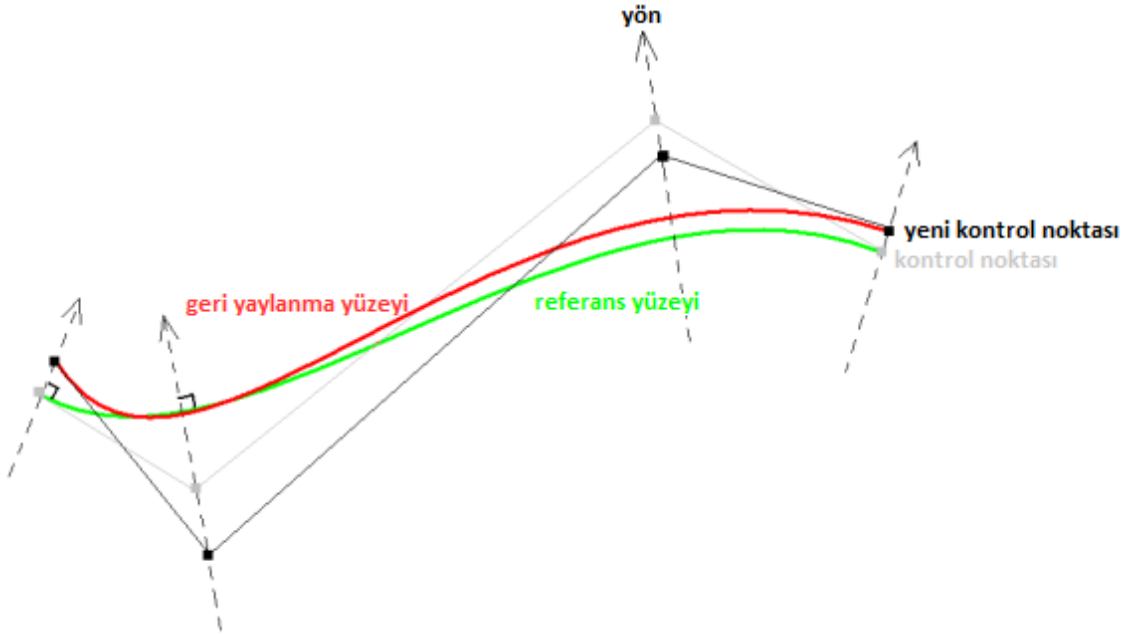
İkinci adım geri yaylanma yüzeylerinin montajıdır. Referans ve geri yaylanmış ağların, derin çekme yönünün z eksenine paralel (kabaca) olması için yönlendirilmesi gerekir. Bu karmaşık konumlandırma problemlerinden kaçınmak için yapılır. Referans örgüsü çevresinde, x , y ve z yönlerinde maksimum ve minimum düğüm koordinat değerleri kullanılarak bir sınırlayıcı kutu oluşturulur. Taban noktaları, Şekil 4.26'da gösterildiği gibi sınırlayıcı kutudaki bir düzlemde eşit aralıklı bir sistem olarak düzenlenmiştir. Düzlem x - y düzlemine paraleldir. Yön vektörleri z eksenine paralel olarak ayarlanır.

İlk tahmin olarak, konumlar (yani, hareket ettirilebilen hat üzerindeki kontrol noktasının konumu), kullanıcı tarafından belirlenen bir değere ayarlanır. İyi bir grafik kullanıcı ara yüzü mevcut olduğunda, kullanıcı kontrol noktasını sürükleyebilir. Böylece yüzey kabaca geometriye uymaktadır. Eğri uydurma algoritması bu noktada başlayacak ve "doğru" yüzeyi bulunacaktır. Bu, özellikle daha fazla kontrol noktasına sahip bir yüzey kullanıldığında önemlidir. Ayrıca, algoritma tam otomatik olarak kullanılabilir. Daha sonra, lineer yüzey parçalarından oluşan lineer bir B-spline başlangıç-değer yüzeyi, önce aynı kontrol noktaları konfigürasyonuna sahiptir. Örneğin: kullanıcı on iki kontrol noktasına sahip bir kuadratik kontrol yüzeyi küpünün kullanılacağını tanımladığında, bu 6 doğrusal çizgisel çizgiyle bir yüzey olacaktır. Parçalı doğrusal fonksiyon, başlangıç değer yüzeyini tanımlamak çok kararlı ve kontrol noktaları tamamen bağımsız olduğundan, bu uydurma işlemi çok sağlamdır. Bu yüzeye uyum için, başlangıç konumlarının tümü, sınırlayıcı kutunun ortasında, z yönünde ayarlanır. Çok kaba uyumdan sonra, kontrol noktalarının yerleri, takılan referans (Bezier) yüzeyi için bir başlangıç tahminleri olarak kullanılabilir.



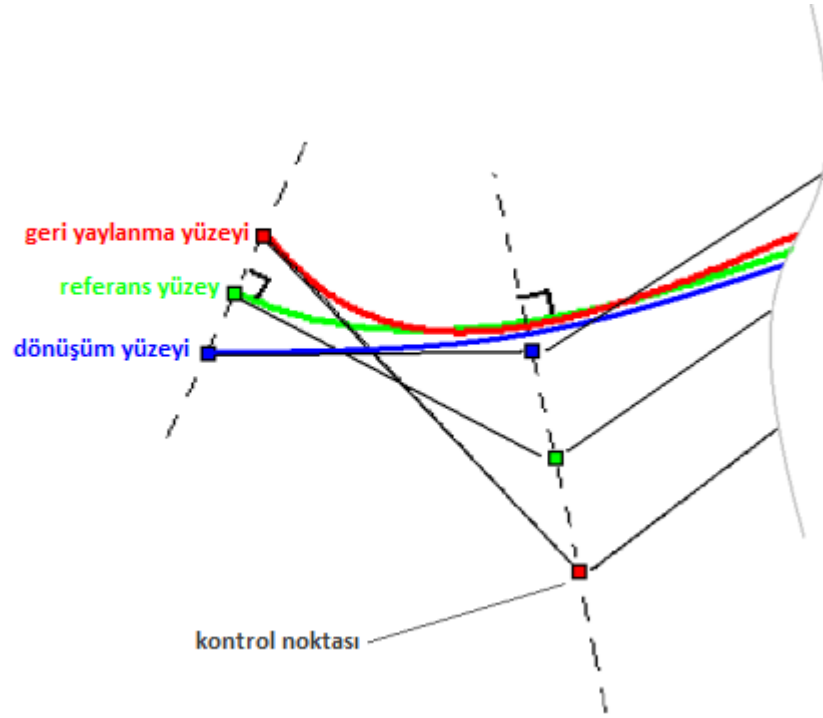
Şkil 4.26 Sınırlayıcı Kutu ve Sistem

Başlangıç değerleri seti ile referans yüzeyi uygundur. Yüzeyin geometriye iyi uyup uymadığını kontrol etmeniz önerilir. Referans yüzeyinin takılmasından sonra gergi yüzeyinin takılması gerekir. Referans yüzeyinin kontrol noktaları artık yüzey uydurma için başlangıç değerleri olarak kullanılmaktadır. Referans yüzeyinin kontrol noktaları da geri yaylanma yaklaşımının temel noktaları olarak ayarlanır. Referans yüzeyine normal vektör, yönlendirme vektörü olarak kullanılır. Temel olarak, geri yaylanma yüzeyi, kontrol noktalarının, şekil 4.27’de gösterildiği gibi, referans yüzeyindeki normal bir vektör boyunca hareket ettirilmesiyle donatılmıştır.



Şekil 4.27 Geri Yaylanma Yüzeyi İçin Normal Yer Değiştirme

Üçüncü adımda referans ve geri yaylanma yüzeyi yüzeylere yaklaştığında, bir dönüşüm yüzeyi önerilebilir. Geri yayılma yüzeyi yaklaşımı sırasında kontrol noktaları referans yüzeyine normal bir vektör boyunca hareket ettirildi. Dönüşüm yüzeyi şimdi geri yaylanma kontrol noktalarından referans yüzey kontrol noktalarına (yön vektörü boyunca) olan mesafeyi alarak ve dönüşüm yüzeyinin kontrol noktalarını ters yönde yerleştirerek inşa edilmiştir. Önceki resimde ayrıntılı olarak gösterilmektedir. Referans yüzey kontrol noktaları ve dönüşüm yüzeyi kontrol noktaları arasındaki mesafe %100 fazla bükülme ile aynıdır, ancak normalde aşırı bükme faktörü ile çarpılır.



Şekil 4.28 Dönüşüm Yüzeyinin Yapımı

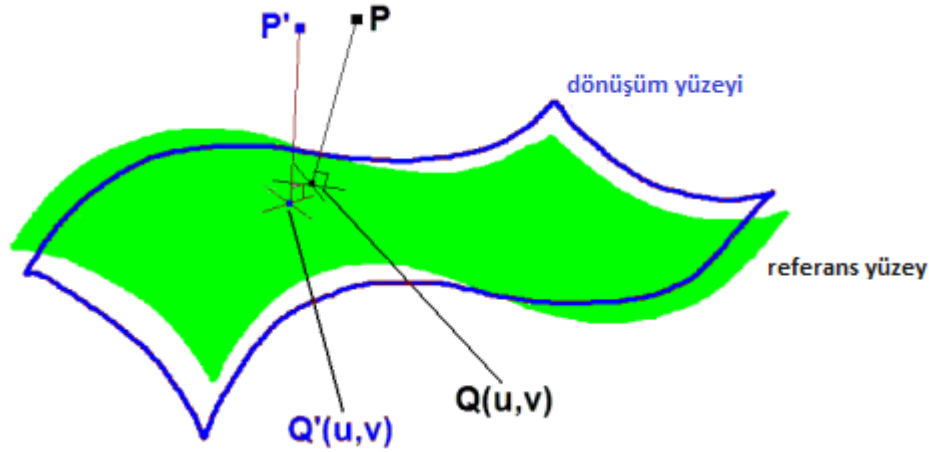
Aşırı bükme faktörü her bir nokta için aynı şekilde ayarlandığında, tamamıyla bir telafi gerçekleştirilir. Aşırı bükme faktörü, her kontrol noktası için farklı şekilde ayarlanabilir. Bu çok fazla olasılık açar.

Aşırı bükülme faktörü, değişmeden kalması gereken ürün geometrisinin belirli alanları için sıfıra ayarlanabilir. Bir Bezier yüzeyinin, kontrol noktalarının konumu dikkate alınmaksızın, süreklilik seviyesini koruduğu gerçeğinden dolayı, değiştirilen alan ile değişmeyen alan arasındaki geçiş bölgesi düzgün kalacaktır. Ayrıca, ürün, her alan için farklı aşırı eğilme faktörleri ile çeşitli geri yaylanma sorun alanlarına ayrılabilir. Lokal olarak farklı kompanzasyon faktörlerini kullanmak, kontrol noktalarının sistemi yeterince iyi olduğunda sadece pratik kullanım olacaktır. Bu, kararsız hale gelebilen eğri uydurma algoritması için önemli bir problem sunmaktadır. Bir çözüm, önce küresel bir yüzeye uydurmak ve daha sonra yüzeyi daha sonra daraltmak ve yerel olarak ekstra kontrol noktaları eklemek sonraki paragraflarda tartışılacaktır.

Dördüncü adım araç geometrisinin dönüştürülmesidir. Artık dönüşüm yüzeyi biliniyor, ürün dönüştürülebilir. Önceki bölümlerdeki silindirik yüzey versiyonunda, yay uzunluğu ofset-vektörünün konumunu tanımlamak için kullanılabilir. Ayrıca, yüzey "geliştirilebilir" olduğundan (yani, deforme olabilir),

kontrol yüzeyi, geometrik gerilmeden "bükülebilir" olabilir, zorlanma olmadan bükülebilir). Bu genellikle 3 boyutlu yüzey tanımı için geçerli değildir. Ofset faktörünün yerini tanımlamak için, şimdi yüzeyin parametrelendirmesi kullanılır. Bezier yüzeyinin u ve v parametreleri, yüzey boyunca bir çeşit "çarpık koordinat sistemi" olarak görülebilir.

Prensip şekil 4.29'da gösterilmiştir. P noktasında işaret eden referans yüzeyindeki normal vektör belirlenir. Q noktası, vektörün referans yüzeyinde başladığı yerde bulunur ve bu noktanın u ve v parametreleri hesaplanır. Parametre değerlerinin hesaplanması sadece Newton yineleme düzeni ile sayısal olarak gerçekleştirilebilir. (Bu bölüm daha sonra ayrıntılı olarak açıklanmıştır). Q' noktası, Q ile aynı u ve v parametrelerini içeren noktayı belirleyerek bulunur, ancak şimdi belirlendi. Nokta Q , vektörün referans yüzeyinde, dönüşüm yüzeyinde başladığı yerdedir. Ofset vektörü normal olarak Q 'ya yerleştirilir ve dönüştürülmüş düğüme işaret eder, ama şimdi dönüşüm yüzeyinde yer alıyor. Ofset vektörü normal olarak Q' ya yerleştirilir ve dönüştürülmüş düğümü (P') işaret eder.



Şekil 4.29 Kontrol Yüzeyleri ile Ağ Değişikliği

Geometri bu şekilde değiştirildiğinde, yapay gerilme tanıtılır. Bu gerilme iki kategoriye ayrılabilir:

- Kontrol yüzeyinin kendisinde gerilme. Belirtildiği gibi, bir parametrik kontrol yüzeyi genel olarak yüzeyin kendisinde yapay gerilim olmadan değiştirilemez.

- Gerilme nedeni, geometrinin yüzeye tam olarak yerleştirilmemesidir. Bu etki önceki paragrafta açıklanmıştır.

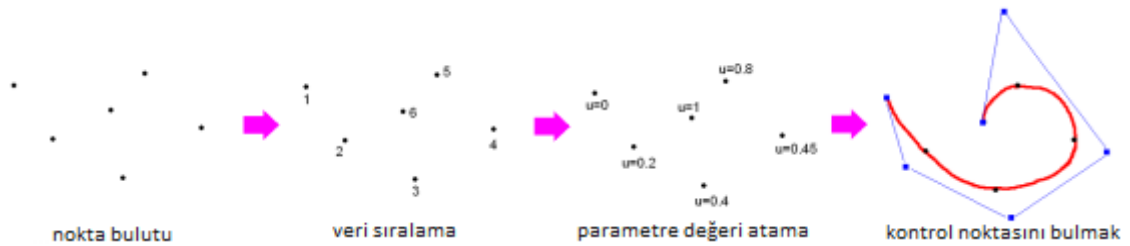
4.4.2.3 Parametrik Yüzeylerin Uyumu

Bu paragrafta yüzey uydurma arkasındaki matematik ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Tüm yüzey uydurma işlemleri için, hedef, yüzeydeki her kontrol noktası için doğru konum değerlerini bulmaktır.

Açıklandığı gibi Bezier veya B-spline eğri uydurma için birçok algoritma geliştirilmiştir. Çoğu durumda, kontrol noktaları, uydurma prosedüründeki serbest değişkenler olarak seçilmiştir. Parametrik geometri olarak birçok olasılıkları ve birçok serbestlik derecesini şekillendirmek, doğru sınır koşullarını seçerken dikkatli olunmalıdır. Çoğu durumda eğri veya yüzey istenmeyen bir şekil alabilir ve hala 'matematiksel olarak doğru' olabilir.

Bir veri enterpolasyon algoritması en kolay şekilde açıklanmaktadır. Temel prosedür şu şekildedir:

- Veri bulutunu, noktaların doğru sırada (yani eğri boyunca) olmasını sağlayın.
- Bir düğüm vektörü seçin (B-spline için)
- Veri bulutundaki her bir noktaya u bir "hassas" parametre değeri atayın
- Lineer denklem sistemini çöz ve kontrol noktalarını bul



Şekil 4.30 Veri Enterpolasyonu

Bir veri bulutunun parametrik bir eğriye yaklaşması gerektiğinde, problem daha karmaşık hale gelir. Şimdi, tam bir eğri tanımı için gerekenden çok daha fazla veri noktası sağlanmaktadır. Yaklaşıklık maliyetli bir işlem olduğu için, bir nokta seçimi yapılır ve “en küçük kareler” ilkesi kullanılarak bir eğri yerleştirilir. Eğrinin verilerden sapması kontrol edilir. Bu sapma belirtilen toleranstan daha büyükse,

sete daha fazla veri noktası eklenir ve yeni bir eğri takılır. Bu prosedür, eğri istenen toleransa sahip olana kadar tekrarlanır. Hızlı ve kararlı bir algoritma geliştirilmiştir.

Bir yüzeyin takılması gerektiğinde, veri bulutunu ayırmak ve veri noktalarına duyarlı bir parametre değeri atamak için genel bir prensip yoktur. Bu sorunu çözmek için, daha basit bir şekilde çalışan bir algoritma geliştirdik. Yine, düğüm vektörü sabittir ve kontrol noktalarının konumları serbest değişkenlerdir. Hedef, artık her bir düğümden yüzeye olan mesafeleri en aza indirmektir. İki minimizasyon yöntemi test edilmiştir, bunlar daha sonraki bölümlerde tartışılacaktır. Bu küçültme süreci problemsiz değildir. Daha önceki paragraflarda belirtildiği gibi, bir kontrol noktasının pozisyonunun değiştirilmesi, sadece yüzeydeki (sınırlı) bir menzile etki eder. Komşu kontrol noktalarının etkisi üst üste gelir ve bu nedenle serbest değişkenler tamamen bağımsız değildir.

Belirli bir değişkenler kümesi (kontrol noktası koordinatları) için hedef fonksiyonu hesaplamak için, her düğümden yüzeye olan mesafe hesaplanmalıdır. Çözümün temeli, yüzeyde belirli bir nokta için u ve v parametrelerini hesaplayan bir nokta inversiyon algoritmasıdır.

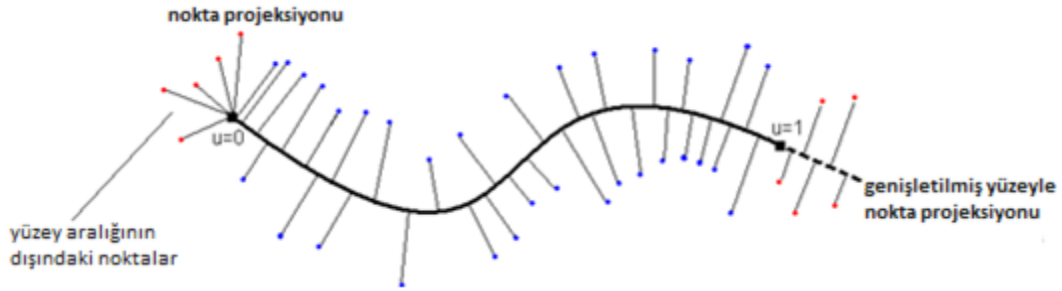
İki Kartezyen koordinatında verilen bir noktadan iki parametrenin hesaplanması, aşırı tanımlanmış bir problemdir.

Bunun anlamı, tam bir çözüm bulunamamasıdır, çünkü yüzey yüzeyde bulanık değildir. Bu nedenle, bir sayısal tolerans belirtilmelidir. Teoride, bu hesaplama daha düşük dereceli yüzeyler için kapalı formda çözülebilir. Yüzeyin dereceleri kullanıcı tarafından tanımlandığından, daha fazla esnekliğe ihtiyaç duyulur ve bu hesaplama için sayısal bir algoritma seçilmiştir. Bu algoritma, giriş noktasının en yakın yüzeyindeki noktayı arar. Bu noktaya gerek yoktur. Yüzeyde tam olarak durmak ve bu yüzden bu süreci yüzey projeksiyonu üzerine işaret ederiz. Bu en yakın nokta ile giriş noktası ve yüzey arasındaki mesafe hesaplanabilir.

Bir eğri için, sadece u parametresiyle, P noktası ve eğri $C(u)$ arasındaki mesafe, işlevdeyken minimumdur.

Bir Bezier veya B-spline yüzeyi, sınırlı bir alanda tanımlanmıştır. Theu değişkeni bu nedenle kontrol edilmiştir ve $\{0 \dots 1\}$ aralığı ile sınırlıdır. İşlem sırasında artık

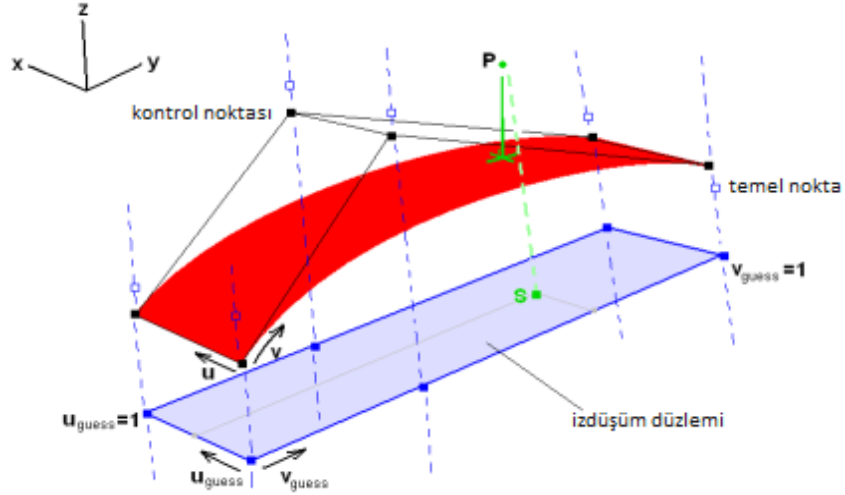
değişmezse, en yakın nokta eğrinin kenarındadır ve işlem durdurulur. (Şekil 4.31) Bizim uygulamada bu sorundur. Yüzey, bu yüzden boş örgü en iyi uygun boyuttadır. Ancak yüzey, araç takımını değiştirmek için de kullanılır. Araçlar, boşluktan önemli ölçüde daha büyüktür ve bu nedenle araç düğümleri, yüzeyin tanımlandığı bölgenin dışında olabilir. Nokta projeksiyonu işlevi, bir parametre $[0,1]$ aralığının dışında olduğunda, yüzeyin otomatik olarak genişlemesi için değiştirilmiştir. Uzatma en az G1 sürekli olan bir hizalı yüzeydir. G1 sürekliliği, C1'den daha az sıkı bir sınır koşuludur: G (Geometrik) 1 sürekliliği için, eğri C0 ve C1 sürekliliğini elde etmek için yeniden parametrelenebilir. Sınırlama kutusunun geometri çukurunun etrafına oturduğuna dikkat edilmelidir, çünkü bu genişleme yüzeyden uzaktayken kararsız hale gelebilir.



Şekil 4.31 Normal (sol) ve Uzatılmış Nokta Projeksiyonu (sağ)

Son olarak, her bir hesaplama için, başlangıç değerlerinin formu ve v tarafından sağlanması gerekir. Yüzey eğriliği düşük olduğunda, genellikle oldukça düz kontrol yüzeyleri söz konusu olduğunda, 0,5 için başlangıç tahminleri başlar.

Her iki değişken de sağlam sonuçlar sağlar. Referans yüzeyinin (sayısal olarak en pahalı olan) yerleştirilmesi için, temel noktaların x ve y değişkenleri Newton sürecini hızlandırmak için kullanılabilir. Şekil 4.32'de nasıl çalışıldığı açıklanmıştır.



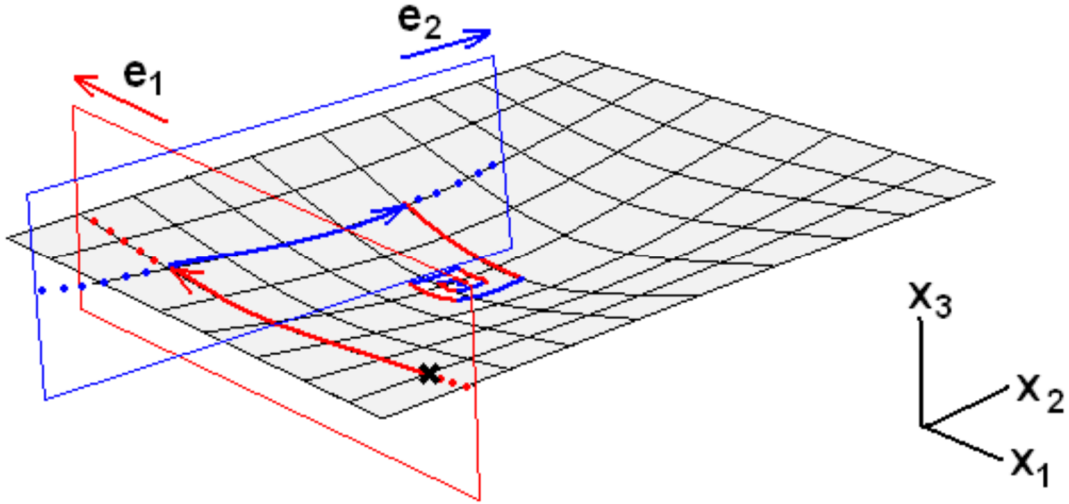
Şekil 4.32 Nokta Projeksiyonu İçin İyi Bir Başlangıç Değeri Bulma

Baz noktaları x-y düzlemine paralel bir düzlem üzerine yansıtılır. Bu projeksiyonların dış noktaları, yerel $(u_{\text{guess}}, v_{\text{guess}})$ bir koordinat sisteminin oluşturulduğu bir dikdörtgeni kapsar. Yüzeyde olduğu gibi, her iki parametrenin de aralığı $[0,1]$. Yüzey üzerinde yansıtılacak olan P noktası, projeksiyon düzlemi üzerinde, S noktası ile sonuçlanacak şekilde projekte edilir. S'nin $(u_{\text{guess}}, v_{\text{guess}})$ 'koordinatları', Newton prosesi için başlangıç değerleri olarak hesaplanır ve kullanılır. Yüzey nispeten düz ise, başlangıç tahmini doğru olacaktır. Bu, uydurma işlemini yaklaşık %30 oranında hızlandırır.

Problem, objektif fonksiyonun olduğu kontrol noktalarının yerleri ile dolu olan vektörü bulmaktır.

$$f(\overrightarrow{P}) = \sum_{i=0}^n |N_i - Q_i|^2 \quad (4.20)$$

Minimuma sahiptir. Bu nedenle, en aza indirme algoritması mümkün olan en az sayıda işlev çağrısı yapmalıdır. Ayrıca, çok sayıda serbest değişkenle sabit kalması gerekir. Belirtildiği gibi, referans yüzeyini bulmak için doğru başlangıç noktalarına ihtiyaç vardır. Geri yaylanma yüzeyi için, başlangıç değerleri referans yüzey şeklinden gelir. Her iki durumda da, yüzey uydurma algoritması başlangıç değerlerine nispeten yakın bir çözüm bulmaya ihtiyaç duyar. Bu güvenilirlik, sayısal maliyetten daha önemlidir. Nelder-Mead süreci daha önceki bölümde açıklanmıştır. Bezier yüzeyini silindirik yüzey yerine oturtmak için daha fazla parametreye ihtiyaç vardır. Bu, iyi bir başlangıç simpleksini gerekli kılar. Po civarında aşağıdaki başlangıç simpleksini önerir.



Şekil 4.33 Sabit Yön Ayarlı Bir İşlevi En Aza İndirme

Eğri uydurma işlemi sayısal olarak pahalıdır, çünkü 100 iterasyonda 30.000 düğümlü bir ağın içinden bir yüzeyin takılması için halihazırda $[3 \times 10]^6$ Newton işlemine ihtiyaç duyulmaktadır. İşlemi hızlandırmanın en kolay yolu ağdaki düğümlerin yalnızca bir kısmını kullanmaktır. Algoritma, düğümlerin sadece %10'u kullanılarak test edildi ve bağlantı süreci hala çok doğrudur. Düğüm-yüzey mesafesi hesaplamaları algoritmada baskın faktör olduğundan, hesaplama süresi %80'den daha fazla azalır.

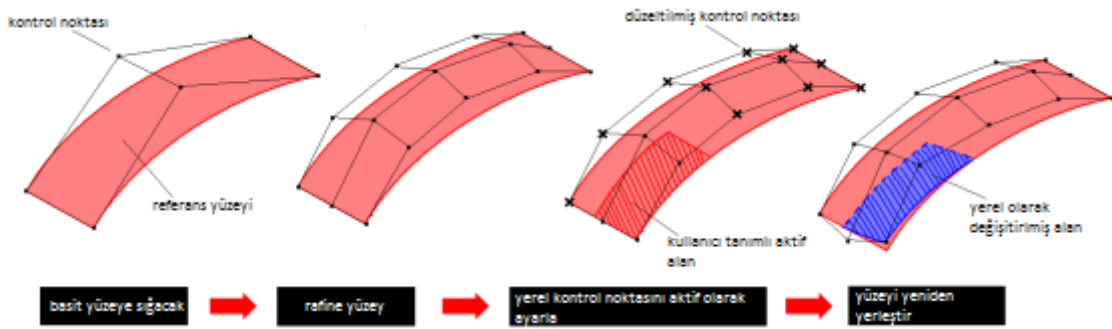
Yaklaşım sürecinde düğümler göz ardı edildiğinde dikkatli olunmalıdır. Yapının belirli bir kısmı göz ardı edilen düğümleri tam olarak içerdiğinde, ağın şekli bozulur ve yaklaşık değer yanlış olur. Yaklaşımın sonuçlarını görsel olarak kontrol etmek tavsiye edilir. Daha iyi bir yol sadece küçük bir düğüm seçkisiyle başlamak, bazı yaklaşım basamaklarını yapmak ve küresel bir yüzey şekli elde etmektir. Bu çözüm, daha doğru, ancak daha fazla düğüm ile daha yakın bir yaklaşım için bir başlangıç noktası olarak kullanılır. Şimdi bulunan çözüm, yine, mevcut tüm düğümlerle çok doğru bir yaklaşım için bir başlangıç noktası kullanılabilir.

4.4.2.4 3 Boyutlu Yüzey İnceltme ve Derece Yükseklik Kullanarak Lokal Aşırı Bükme

Belirtildiği gibi, çok sayıda kontrol noktasına sahip yüzeyler, yerel aşırı bükme için gereklidir. 16'dan fazla serbest parametrelili bir yüzeyin uydurulması, doğru bir başlangıç parametre seti gerektirir. Aynı zamanda oldukça kararsızdır, bu yüzden

doğru bir ilk tahminin yapılması birkaç girişimde bulunabilir. Ancak, lokal aşırı bükme için, daha iyi bir sistem genellikle doğru geri yaylanma telafisi için gereklidir. Sorun aşağıdaki prosedürle çözülmüştür.

- Nispeten basit bir Bezier referans yüzeyi uydurulmuştur.
- Bezier yüzeyi düzeltilir (kontrol noktaları eklenir) ve derecesi yükseltilir (gerekirse)
- Etkin bölge olarak adlandırılan kullanıcı tarafından belirlenen bölgedeki kontrol noktaları serbest kontrol noktaları olarak ayarlanır.
- Düzeltilmiş referans yüzeyine uyacak yeni bir uydurma prosedürü gerçekleştirilmiştir.
- Düzeltilmiş referans yüzeyi, geri yaylanan yüzey uydurulması için bir başlangıç noktası olarak kullanılır.
- Bir geri yaylanma yüzeyi uydurulur, hesaplanan bir dönüşüm yüzeyi ve takım geometrisi daha önce tartışıldığı gibi değiştirilir.



Şekil 4.34 Referans Yüzeyinin Geliştirilmesi ve Yeniden Düzeltilmesi

Önce takılan Bezier yüzeyi, geometriyi yaklaşık olarak tahmin etmelidir. Düzeltilmiş Bspline yüzeyi yerleştirildiğinde, yaklaşık olarak aktif bölgede lokal olarak daha doğru hale gelmiştir. Algoritma sabit kalır, çünkü bu alanda olmayan kontrol noktaları yerinde sabit kalır. Şekil 4.34'de, refine yüzey 15 kontrol noktası içerir, ancak kompanzasyonun gerçekleştirildiği aktif alan sadece 4 kontrol noktasını içerir. Bezier yüzeylerin düzgünlüğü nedeniyle, değiştirilen ürünün değiştirilen kısmı ile değişmeyen kısım arasındaki geçiş de düzgün kalmaktadır.

Bir Bezier yüzeyi esas olarak B-spline yüzeylerin toplanmasının bir alt kümesidir. B-spline işaretlerle dönüştürülen Bezier yüzeyler için düğüm vektörleri aşağıdaki forma sahiptir.

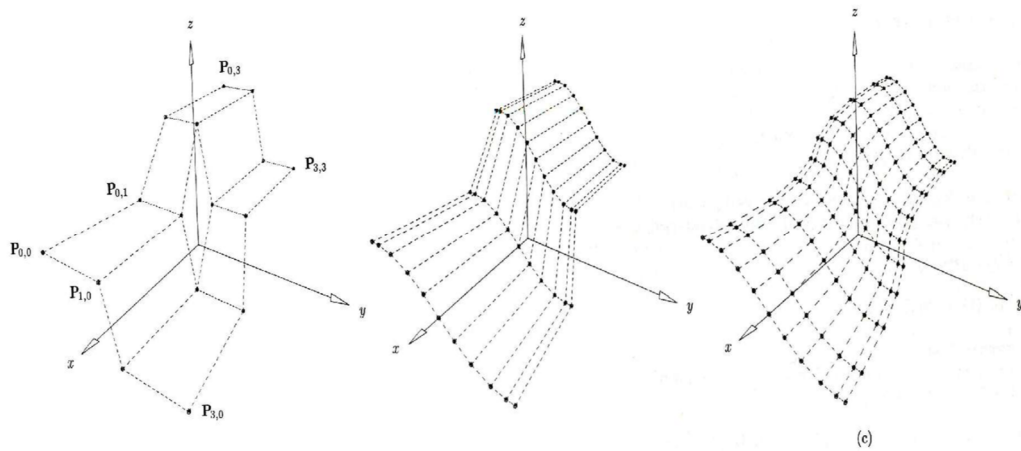
İlk uydurma aşamasından sonra yüzey düzeltme uygulanır. Kontrol noktaları seti genişletilerek, eğri üzerinde daha fazla lokal kontrol sağlanır. Bu işlemde, u ve v yönü için düğüm vektörlerine yeni düğümler yerleştirilir. Yeni, daha büyük, kontrol noktaları seti daha sonra hesaplanır ve böylece yüzeyin şekli ve parametrelendirmesi aynı kalır. C (u) düğüm vektörü olan bir Nurb eğrisi olsun $u_0, \dots, u_m$ Şimdi, yeni bir düğüm, $\overline{u_{new}} \in u_k, u_{k+1}$ yeni bir düğüm vektörü oluşturmak için düğüm vektörüne eklenir

$$\overline{U} = \overline{u_0} = u_0, \dots, \overline{u_{k+1}} = \overline{u_{new}}, \overline{u_{k+2}} = u_{k+2}, \dots \quad (4.4)$$

U, vektör uzayının bir alt kümesi olan bir vektör boşluğunu yaydığı için U, U ile yayılan vektör uzayının bir alt kümesi olan bir vektör uzayına yayıldığı için, C (u), U üzerinde aynı şekilde temsil edilebilir. Düğüm ekleme, bu nedenle doğrusal denklemler kümesini çözme sürecidir:

$$\vec{C}(u) = \sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) \vec{P}_i = \sum_{i=0}^{n+1} \overline{N_{i,p}}(u) \vec{Q}_i \quad (4.5)$$

Bu büyük denklem dizisini çözmek maliyetli bir işlemdir. (Çoklu) düğüm ekleme sonucu, yüzey B-spline bir yüzey haline gelir. Şekil 4.35’de, yüzey iyileştirmesi, önce u yönünde, sonra v yönünde gösterilmektedir.

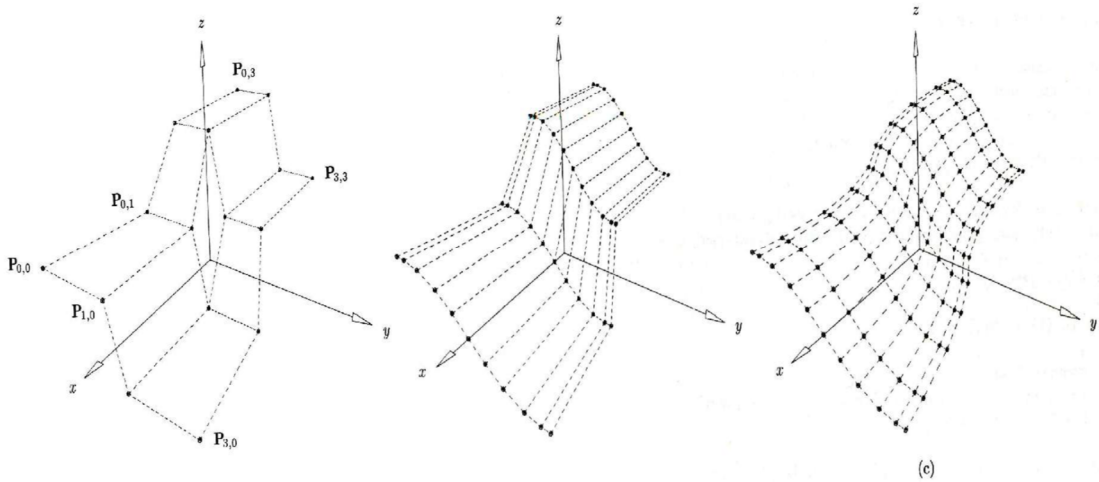


Şekil 4.35 Yüzey Düzeltme. Orijinal Yüzeyi (solda), u Yönünde (ortada) ve Her İki Yönde (sağda) Düzeltme Netliğinde Değiştirin

Düğüm vektörüne düğüm eklenmesi ve yeni kontrol noktaları kümesinin hesaplanması yerine, istenen konuma yeni bir kontrol noktaları sırası eklemek ve yüzey şeklini ve parametrelemeyi etkilemezken yeni bir düğüm vektörünü hesaplamak da ayrıca mümkündür.

Bu ters düğüm ekleme olarak adlandırılır. Bu şekilde, bir kontrol noktalarının sırasının yerini doğrudan tanımlamak mümkündür. Ancak, başka bir kontrol noktası satırı eklendiğinde, diğer tüm satırların konumları algoritma tarafından otomatik olarak değiştirilecektir. Bu nedenle belirli bir alandaki kontrol noktalarının yoğunluğunu kontrol etmek çok zordur. Artan sağlamlık için, yüzeyi küresel olarak her zaman hassaslaştırmayı seçtik. Dezavantaj, yüzeyin gerekli olandan daha fazla (sabit) kontrol noktası içermesidir. Hesaplama süresindeki küçük artışın kabul edilebilir olduğu bulunmuştur.

Bu büyük denklem dizisini çözmek maliyetli bir işlemdir. (Çoklu) düğüm ekleme sonucu, yüzey B-spline bir yüzey haline gelir. Şekil 4.35’de, yüzey iyileştirmesi, önce u yönünde, sonra v yönünde gösterilmektedir.

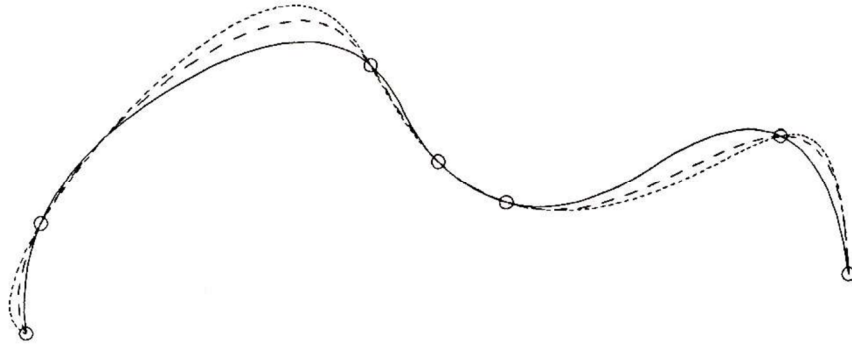


Şekil 4.36 Yüzey Düzeltme. Orijinal Yüzeyi (solda), u Yönünde (ortada) ve Her İki Yönde (sağda) Düzeltme Netliğinde Değiştirin

Düğüm vektörüne düğüm eklenmesi ve yeni kontrol noktaları kümesinin hesaplanması yerine, istenen konuma yeni bir kontrol noktaları sırası eklemek ve yüzey şeklini ve parametrelemeyi etkilemezken yeni bir düğüm vektörünü hesaplamak da ayrıca mümkündür.

Bu ters düğüm ekleme olarak adlandırılır. Bu şekilde, bir kontrol noktalarının sırasının yerini doğrudan tanımlamak mümkündür. Ancak, başka bir kontrol noktası satırı eklendiğinde, diğer tüm satırların konumları algoritma tarafından otomatik olarak değiştirilecektir. Bu nedenle belirli bir alandaki kontrol noktalarının yoğunluğunu kontrol etmek çok zordur. Artan sağlamlık için, yüzeyi küresel olarak her zaman hassaslaştırmayı seçtik. Dezavantaj, yüzeyin gerekli olandan daha fazla (sabit) kontrol noktası içermesidir. Hesaplama süresindeki küçük artışın kabul edilebilir olduğu bulunmuştur.

Kontrol noktaları eklemenin bir başka yolu, yüzeyin u ve v derecelerini yükseltmektir. Artan dereceler ile, ortaya çıkan yüzey uyması giderek zorlaşacaktır. Genel olarak, daha fazla düğüm içeren daha düşük dereceli yüzeyler, verileri daha az düğüm içeren daha yüksek dereceli yüzeylerden daha iyi uyacaktır: yüzeyin eğriliği daha düşük olacaktır. Şekil 4.35'da bu görselleştirilmiştir: katı çizgi 2 derecelik bir B-spline eğrisidir, kesikli çizgi 3 derecedir ve noktalı çizgi 4 derecedir. Kuadratik eğri "en iyi" nokta bulutunu izler. Yani eğrinin eğriliği en düşüktür. Kübik fonksiyondaki eğrilikteki farkın onu çok esnek ve dolayısıyla da oldukça kararsız hale getirdiği açıktır.



Şekil 4.37 Kuadratik (düz çizgi), Kübik (kesikli) ve 4. Derece (noktalı) Eğri Uydurma

Derece yükseltmesi uygulanmıştır, çünkü bazı geometri türleri için, bir karesel olarak dört yüzlü yüzey kullanılarak, halihazırda doğru küresel geri yaylanma telafisi sonuçları sağlanmaktadır. Yüzey daha sonra lokal geri yaylanma etkilerini çözmek için düzeltilindiğinde, bir yönde doğrusal kalır ve keskin kenarlar geliştirir. Böylelikle, lokal geri yaylanma kompanzasyon gerçekleştirilebilmesinden önce,

kontrol yüzeyi derecesi, düzgün bir yüzey elde etmek için her iki yönde de en az 2'ye yükseltilmelidir. İkinci dereceden yüzey zaten doğru küresel yaylı kompanzasyon sonuçları sağlar.

GERİ YAYLANMANIN SONLU ELEMANLAR ANALİZİ İLE TAHMİNİ

Kalıbın tasarımı sırasında geri yaylanmanın doğru bir şekilde tahmin edilmesi ve telafi edilmesi maliyet ve zaman açısından son derece önemlidir. Geri yaylanmanın tahminine yönelik olarak literatürde deneysel çalışmalar, benzetim çalışmaları ve analitik çalışmalar mevcuttur. Geri yaylanmanın oluşmasına neden olan parametrelerin çokluğu ve çeşitliliği, geri yaylanmanın analitik olarak modellenmesini zorlaştırmaktadır. Diğer yandan, sonlu elemanlar paket programlarının yıllar içerisinde gösterdikleri gelişim, endüstriyel ve akademik çalışmalarda sonlu elemanlar yöntemini vazgeçilmez hale getirmiştir. Ancak sonlu elemanlar benzetim yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçların deneysel sonuçlar ile doğrulanması gerekmektedir.

Tez kapsamında geri yaylanmanın sonlu elemanlar analizi ile tahmini çalışmalarında Autoform programı kullanılmıştır. Bu bölümde öncelikli olarak Autoform'da gerçekleştirilen şekil verme ve geri yaylanma benzetimlerinde kullanılan model ve yöntem anlatılmıştır. Daha sonra 5 farklı geometriye sahip parçalar için gerçekleştirilen benzetim çalışmaları, kullanılan model, yöntem ve deney sonuçları ile doğrulama çalışmaları detaylı bir şekilde sunulmuştur. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlar ile kıyaslanmıştır ve sonlu elemanlar yönteminin doğruluğu gösterilmiştir.

Bu çalışmada sadece geri yaylanma benzetim sonuçları değil, geri yaylanmanın telafisine yönelik parça geometrisinde yapılan değişiklikler incelenmiştir. Autoform programında incelenen bu değişiklikler ile geri yaylanmanın minimum ölçüde olacak şekilde parça geometrisi elde edilmeye çalışılmıştır. Autoform programında elde edilen en uygun geri yaylanma yüzeyleri kalıp geometrinde kullanılmıştır. Reel ortamda çıkan parçalarımız, atos tarama cihazında taraması yapılmış parça geometrisi ile kıyaslanmıştır.

5.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sac metal şekillendirme sonrasında oluşan geri yaylanmanın benzetimi temel olarak iki aşamada gerçekleşmektedir. Birinci aşamada, sac kalıbın hareket etmesiyle, rijit olarak modellenen kalıbın şeklini alır. Bu aşamaya şekil verme aşaması denir. İkinci aşama ise şekil almış sacın üzerindeki yüklerin kaldırılması ile birlikte, sacın eski haline dönmeye çalıştığı geri yaylanma aşamasıdır. Bunların dışında endüstriyel kalıplarda, yerçekimi altında sacın davranışını veren yerçekimi benzetimi ve kapanma benzetiminin de modellenmesi gerekmektedir. Tez kapsamında incelenen büküm problemlerinde şekil verme benzetimleri ve geri yaylanma benzetimleri iki ayrı aşamada ayrı sonlu elemanlar yöntemleriyle modellenmiştir. Düzlemsel gerilme kabulü yapılarak sac metal kabuk elemanlar kullanılarak modellenmiştir.

5.1.1 Açık (Explicit) ve Kapalı (Implicit) Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sac metal şekil verme benzetimlerinde şekil verme ve geri yaylanma benzetimleri birbirini takip eden iki aşamada gerçekleşmektedir. Birinci aşama şekil verme, ikinci aşama ise geri yaylanmadır. Şekil verme aşamasının benzetim çalışmalarında açık hesaplamalı yöntem ya da kapalı hesaplamalı yöntem kullanılabilir.

Açık yöntemler sistemin durumunu ileriki bir zamanda hesaplarken, kapalı yöntemler sistemin hem şimdiki hem de ileri bir zamandaki durumunu içeren denklemi çözerek sistemin durumunu hesaplar. Açık yöntemde, ileriki zaman adımındaki durum o andaki durum dikkate alınarak hesaplanır.

Kapalı yöntemde her bir düğüm noktasının serbestlik derecesi kadar doğrusal olmayan denklemler çözülmeaktadır. Doğrusal olmayan bu denklemler genellikle Newton-Raphson tekniği kullanılarak doğrusal hale getirilirler [32]. Her bir basamak sonrası elde edilen çözüm belirli bir tolerans değerinin altına düştüğünde bir sonraki basamağa geçilir. Bir önceki basamakta elde edilen sonuçlar yeni basamağın deneme değerleri olarak kullanılır.

Yakınsama elde edildiğinde, yeni sınır şartları kullanılarak yeni sonuçlar elde edilir. Kapalı yöntemle gerçek değerlere çok yakın sonuçlar elde etmek

mümkündür ancak, kapalı yöntem kullanıldığında yakınsama problemi oluşmaktadır. Karmaşık problemlerin çözümünde ise çok büyük matrislerin çözülmesi ve bilgisayar hafızasında saklanması problemi ortaya çıkmaktadır. Açık yöntemin kapalı yöntemden temel farkı, her bir zaman basamağında, diğer basamaklardan bağımsız olarak en yenileme (iterasyon) yapılmamasıdır. Bu durum açık yöntem kullanılarak yapılan çözümlerin hesaplama zamanı yönünden daha az maliyetli olması demektir. Açık yöntemde yakınsama problemi söz konusu değildir, ancak elde edilen sonuçların doğruluğu için aynı şey söylenemez. Prior [33] yaptığı çalışmada karmaşık geometriye sahip parçaların şekil verme benzetimlerinde açık yöntemi önermiştir. Karafils ve Boyce [34] şekil verme benzetiminde açık yöntem ve geri yaylanma benzetiminde ise kapalı yöntem kullanımının karmaşık geometriye sahip problemlerde kolaylık sağladığını ve iyi sonuçlar elde edildiğini göstermişlerdir.

Açık yöntem kullanılarak yapılan SE yönteminin doğruluğu, geometrinin ağ yapısına, kalınlık boyunca nokta integrasyon sayısına (katman), eleman formülasyonuna, zaman adımına ve temas algoritmasına bağlıdır [35,36]. Finn vd. [37] bu parametrelerin uygun değerlerinin seçilmesiyle açık yöntem kullanılarak elde edilen sonuçların kapalı yöntem kullanılarak elde edilen sonuçlara yakın olduğunu ve hesaplama zamanının daha kısa olduğunu göstermişlerdir.

Yukarıda anlatılan sebeplerden ötürü, tez kapsamında yapılan şekil verme benzetimlerinde açık formülasyon, geri yaylanma benzetimlerinde ise kapalı formülasyon kullanılmıştır. Şekil verme benzetimleri sonucunda elde edilen sonuçlar, geri yaylanma benzetimleri için girdi olarak kullanılmıştır.

5.2 Autoform Malzeme Modelleri

Şekil verme benzetim çalışmalarında malzemenin plastik davranışını ve anizotropik özelliğini ifade edecek uygun malzeme modelinin seçilmesi gerekmektedir. Autoform kullanıcılarına pek çok malzeme modeli sunmaktadır. Bu çalışmada kullanılan malzeme modellerinin isimleri, Autoform adlandırmaları ve genel özellikleri Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1 Sonlu Elemanlar Analizlerinde Kullanılan Malzeme Modelleri

Malzeme modeli	Akma kriteri	Anizotropi	Uygulama
SCGA270C-45	Hill48	E	Metal
SPC270C_C_055	Hill48	E	Metal
SCGA590DU	Hill48	E	Metal
SPC440_C_100	Hill48	E	Metal
SCGA980DU_45	Hill48	E	Metal

5.3 Birim Sistemi

Autoform’da belirli bir birim sistemi kullanılmamakla birlikte birbirleriyle uyumlu olacak şekilde birimler kullanılabilir. Girilen rakamların hangi birim sisteminde olduğu kullanıcı tarafından bilinirse ve uyumlu birim sistemi kullanılırsa elde edilen sonuçların birimleri de bilinmiş olur. Farklı birimlerin kullanıldığı uyumlu birim sistemi mevcut olmakla birlikte, tez kapsamında gerçekleştirilen Autoform analizlerinde seçilen birim sistemi Tablo 5.2’de verilmiştir.

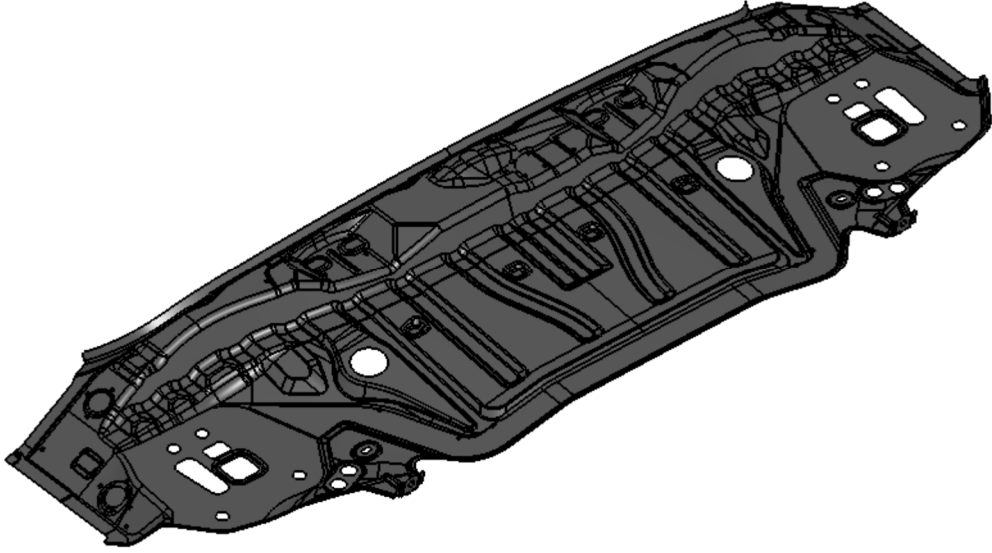
Tablo 5.2 Autoform Analizlerinde Kullanılan Uyumlu Birim Sistemi

Kütle	Uzunluk	Kuvvet	Gerilme	Enerji
ton	mm	N	MPa	N.mm

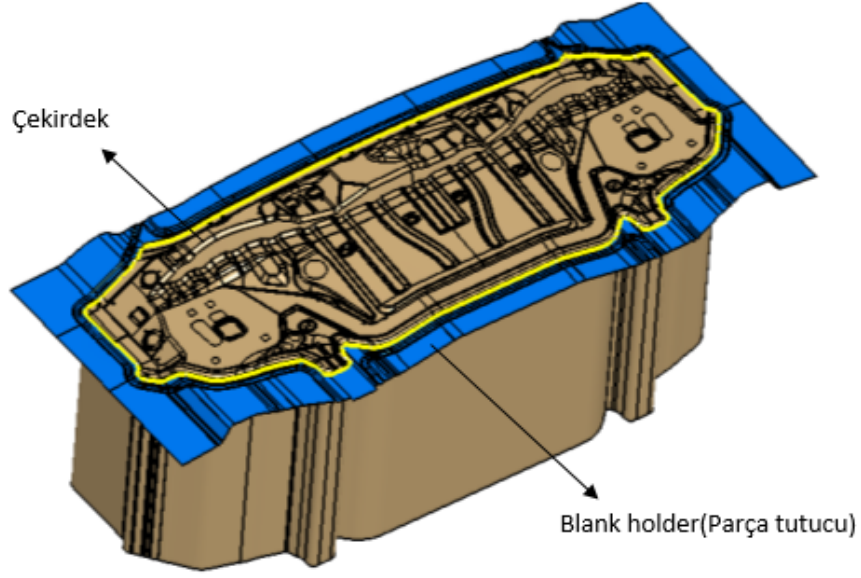
Yukarıda anlatılan genel bilgiler ve yaklaşımlar dahilinde, her bir parçanın sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiş ve deneyler ile doğrulanmıştır. Her farklı geometri için tasarım, deneysel çalışma ve sonlu elemanlar yönteminin doğrulanması ilerleyen bölümlerde detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

5.4 Arka Araç Gövde Parçası_1

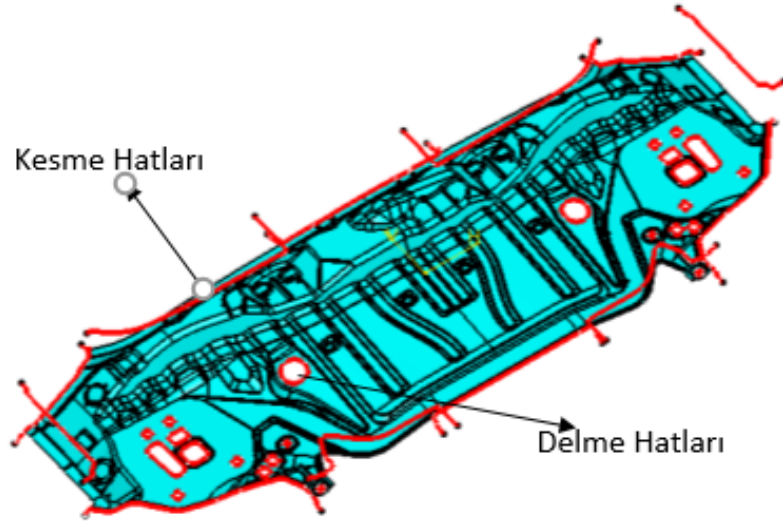
Otomotiv endüstrisinde kullanılan sac metallerin, Şekil verme sonrası ortaya çıkan geri yaylanma davranışlarının öngörülebilmesi için Toyotetsunun tecrübeli kalıp geliştirme mühendisleri ile parçanın proses belirleme çalışmaları yapılmıştır. Parçanın prosesleri belirlendikten sonra Autoform sonlu elemanlar programında simülasyon çalışması yapılmıştır. Bu parça, 4 prosesten oluşmaktadır. Parçanın prosesleri aşağıdaki Şekilde gösterilmektedir. Parça ekme prosesiyle Şekil aldıktan sonra etrafı kesilmiş ve son olarak parçanın kulak ve etek kısmı bükülmüştür.



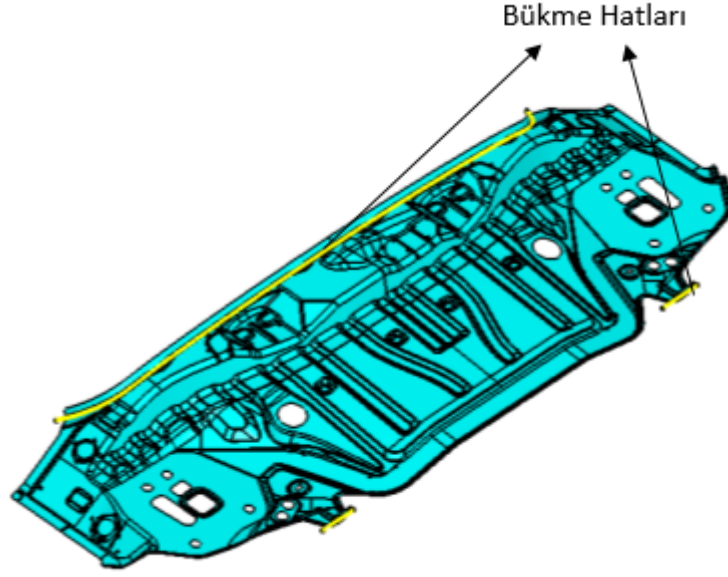
Şekil 5.1 Arka Araç Gövde Parası_1 Parça Cad Datası



Şekil 5.2 Arka Araç Gövde Parçası_1 İçin Oluşturulan Çekme Prosesi Yüzeyleri



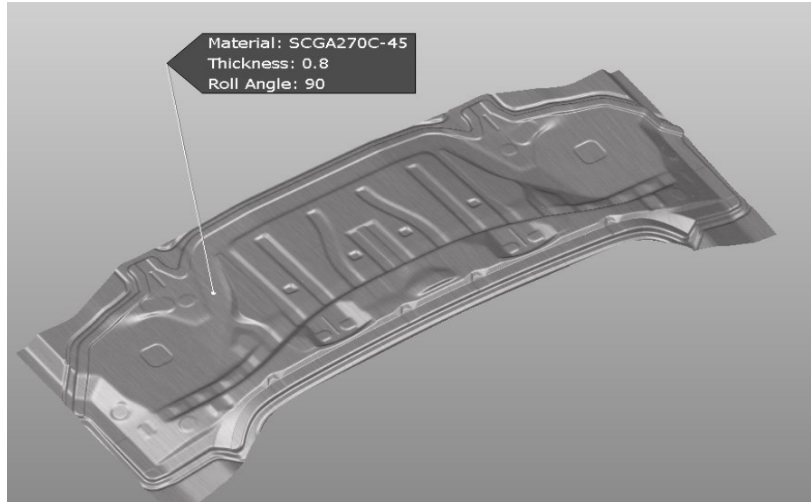
Şekil 5.3 Arka Araç Gövde Parçası_1 İçin Kesme ve Delme Hatları



Şekil 5.4 Arka Araç Gövde Parçası_1 İçin Kulak Büküm Hatları

5.4.1 Kalıp Tasarımı ve Deneysel Çalışma

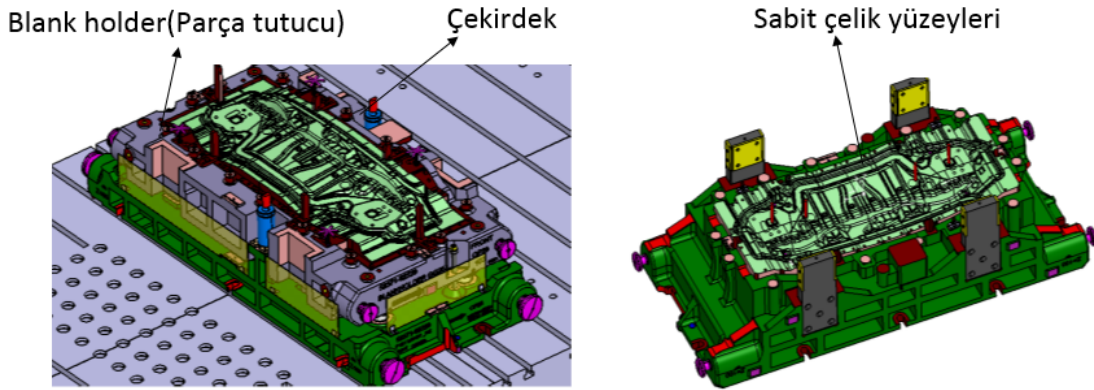
Arka Araç Gövde Parçası_1 parçası 0,8 mm malzeme kalınlığına ve 270 MPa çekme dayanımına sahiptir.



Şekil 5.5 Arka Araç Gövde Parçası_1

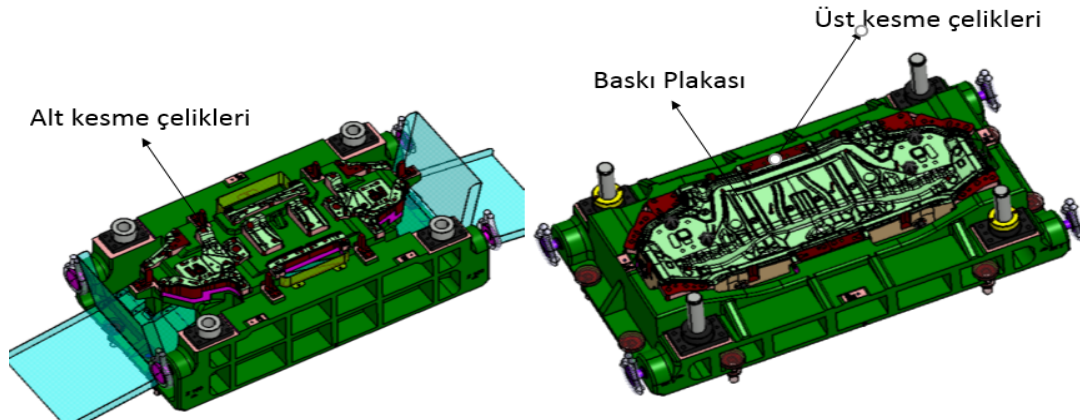
Bu parça, 4 farklı kalıp yapılarak üretilmiştir. Kalıplar, çekme prosesi, 2 adet kesme prosesi ile son olarak parçada büküm yapılmıştır. Parçanın formu çekme prosesi ile oluşturulmuştur. Çekme prosesi, parçaya formunu veren çekirdek, parça tutucu (blankholder) ve sabit üst kalıp yüzeyinden oluşmaktadır. Dişi kalıp,

hareketli elemandır ve üst kısma yerleştirilmiştir. Parça tutucu gücünü presin alt kısmına yerleştirilmiş pres tablasından almaktadır.



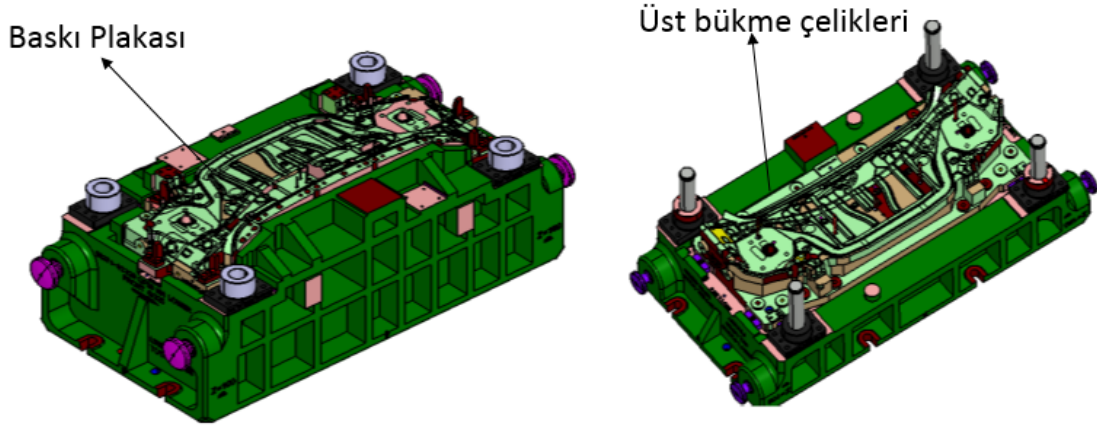
Şekil 5.6 Arka Araç Gövde Parçası_1 Çekme Prosesi Alt ve Üst Kalıp

Bu parçanın diğer proseslerinde kesme ve delme yapılmış parçanın etrafında yer alan malzeme fazlalığı kesilmiştir. Kesme ve delme kalıbında ise parçayı tutma görevi gören baskı plakası, alt ve üst kesme çelikleri yer almaktadır. Baskı plakası gücünü yaylardan almaktadır. Üst kalıp hareketli elemandır. Kalıbı merkezleyen kolonlar kalıbın aynı ekseninde çalışmasını sağlamaktadır.



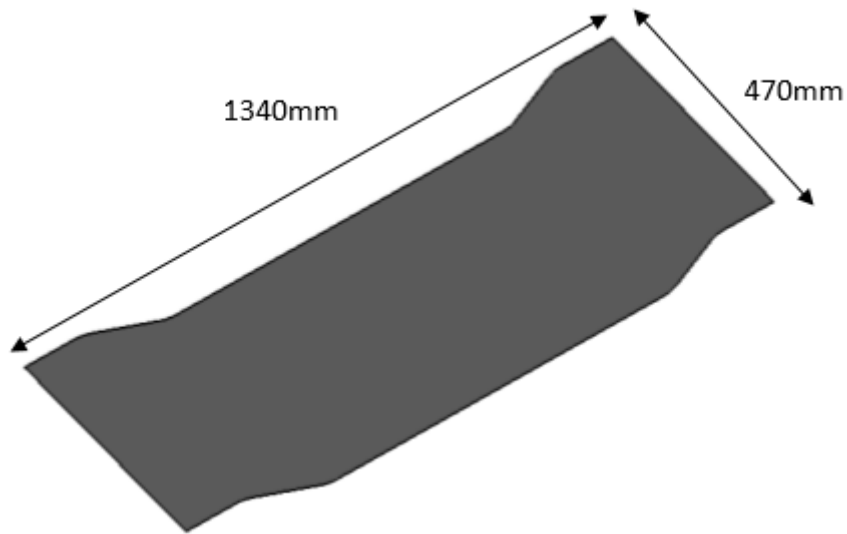
Şekil 5.7 Arka Araç Gövde Parçası_1 Kesme Prosesi Alt ve Üst Kalıp

Kalıbın son prosesinde ise parçanın kulak kısımlarını bükmek amacıyla bükme kalıbı tasarlanmıştır. Bükme kalıbı, sabit çelikler, baskı plakası ve bükme çeliklerinden oluşmaktadır.



Şekil 5.8 Arka Araç Gövde Parçası_1 Bükme Prosesi Alt ve Üst Kalıp

Yapılan deneylerde SCGA270C-45 çelik malzeme kullanılmıştır. Sac 470 mm genişliğinde ve 1340 mm uzunluğundadır. Çekme prosesi kurs boyu olarak 60 mm, kesme prosesi baskı plakası kurs boyu olarak 20 mm ve son olarak bükme prosesi baskı plakası kurs boyu olarak 50 mm seçilmiştir. Tüm saclar haddeleme doğrultusu yönünde şekillendirilmiştir. Haddeleme yönü sacın üreticisi tarafından belirtilmiştir. Böylece, şekillendirilen tüm parçaların anizotropi yönleri birbirleriyle uyumlu hale getirilmiştir. Deneylerde kullanılan SCGA270C-45 çelik malzemenin boyut ve özellikleri aşağıdaki görsellerde verilmiştir.



Şekil 5.9 Arka Araç Gövde Parçası_1 için Sac Malzemenin Boyutları

Tablo 5.3 SCGA270C-45 Sac Malzemenin Özellikleri

g/cm ³	E(Mpa)	ν	G0(Mpa)	R _m (Mpa)
7,8	210000	0,3	150	271,3

5.4.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi

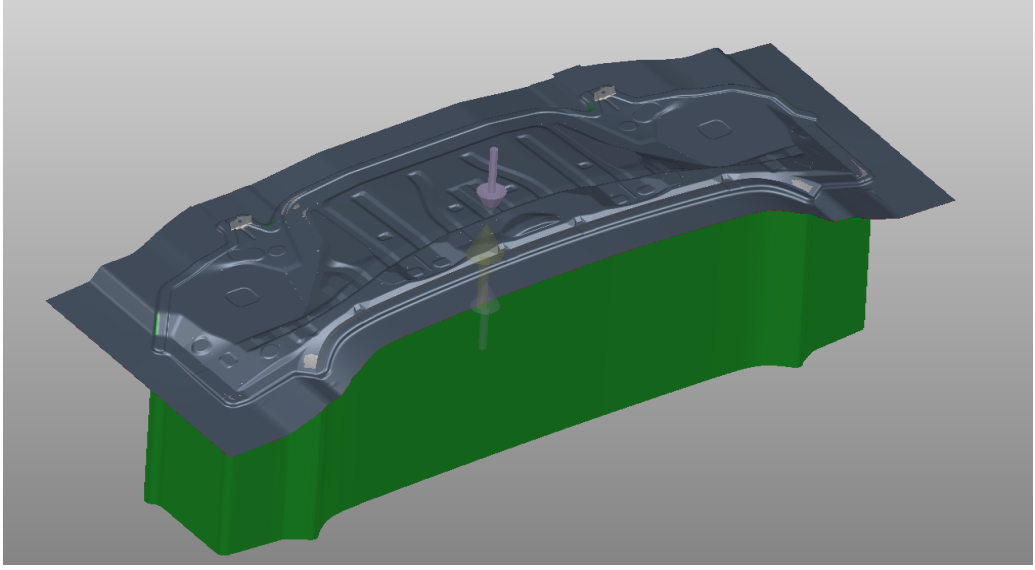
Analiz iki farklı formülasyon kullanılarak, birbirini takip eden iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşama açık formülasyon kullanılarak şekil verme işlemi, ikinci aşama ise kapalı formülasyon kullanılarak geri yaylanmanın belirlenmesidir.

Şekillendirme işlemini daha iyi kavrayabilmek, işlem parametrelerinin ve malzeme özelliklerinin geri yaylanma davranışını nasıl etkilediğini gözlemleyebilmek için literatürdeki analitik modeller incelenmiştir. Analitik model uygulanırken aşağıdaki kabuller yapılmıştır.

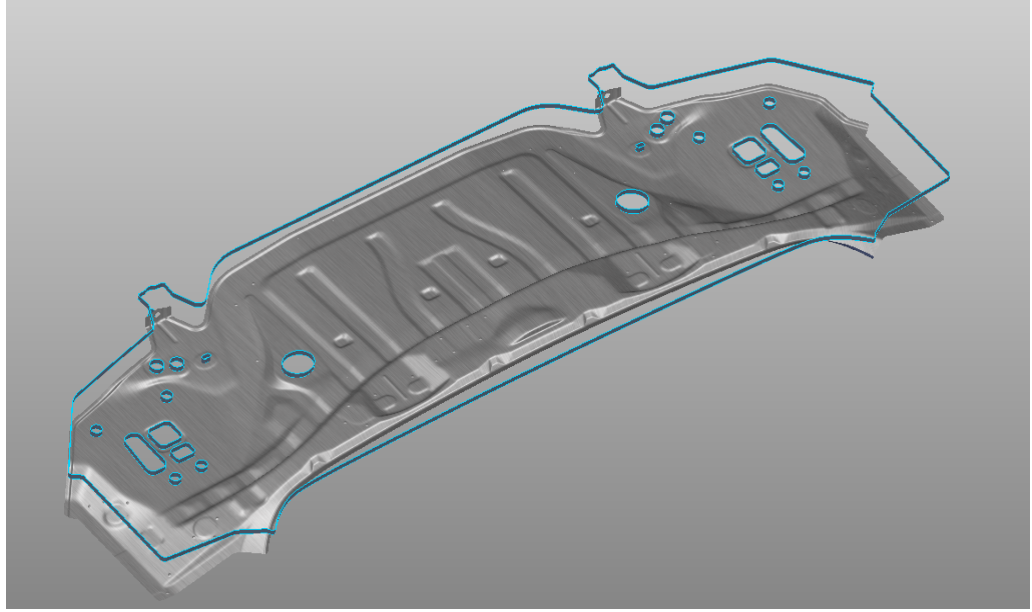
1. Kalınlık boyunca olan gerinim ihmal edilmiştir. Düzlemsel gerinim durumu söz konusudur.
2. Sac düzlemi boyunca kalınlık ve genişlik aynıdır.
3. Sac düzenli-sürekli moment ve gerdirme kuvveti etkisinde bükülmektedir.
4. Sac düzlemine dik olan düzlemler işlem boyunca bu durumunu korurlar.
5. Çap yönündeki gerilme, σ_r ihmal edilmiştir.
6. Büküm öncesi ve sonrasındaki hacim birbirine eşittir.
7. Plastik bölgedeki gerilme gerinim ilişkisi Swift'in pekleşme kuralına göre tanımlanmıştır.
8. Normal anizotropi durumu kabul edilmiştir.
9. Bauschinger etkisi ihmal edilmiştir.

Parça Cad datası yardımıyla Catia V5 programında çekme prosesi için çekirdek, parça tutucu ve sabit üst kalıp yüzeyleri oluşturulmuştur. Oluşturulan yüzeyler Autoform programında import edilerek simülasyon yapılmıştır. Simülasyon çalışması yapılırken sürtünme katsayısı Toyotetsu tarafından 0,15 mm

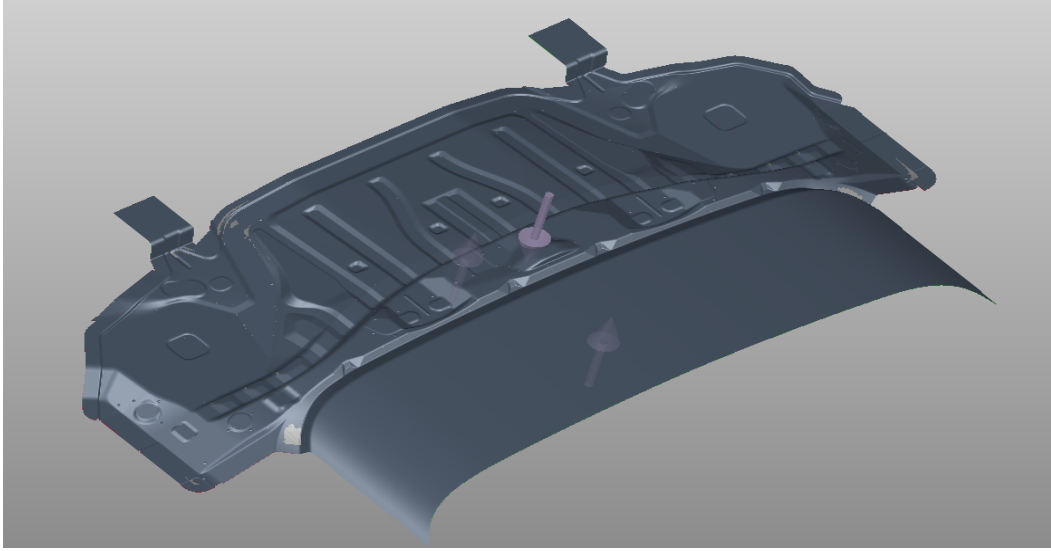
belirlenmiştir. Sürtünme katsayısının belirlenmesinde tecrübeli toyotetsu mühendislerinin bilgi birikiminden faydalanılmıştır.



Şekil 5.10 Arka Araç Gövde Parçası_1 için Çekme Prosesi Simülasyonu

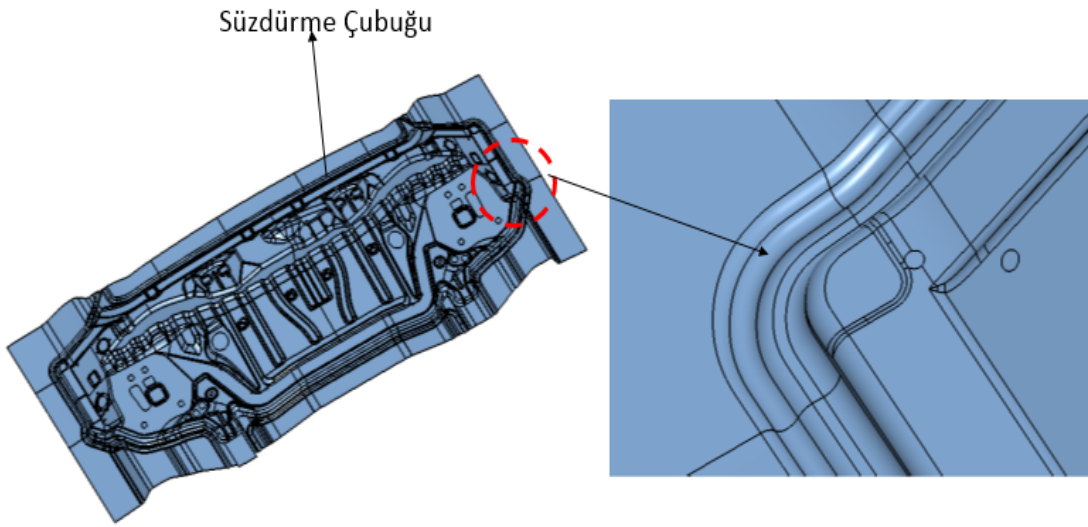


Şekil 5.11 Arka Araç Gövde Parçası_1 için Kesme Prosesi Simülasyonu



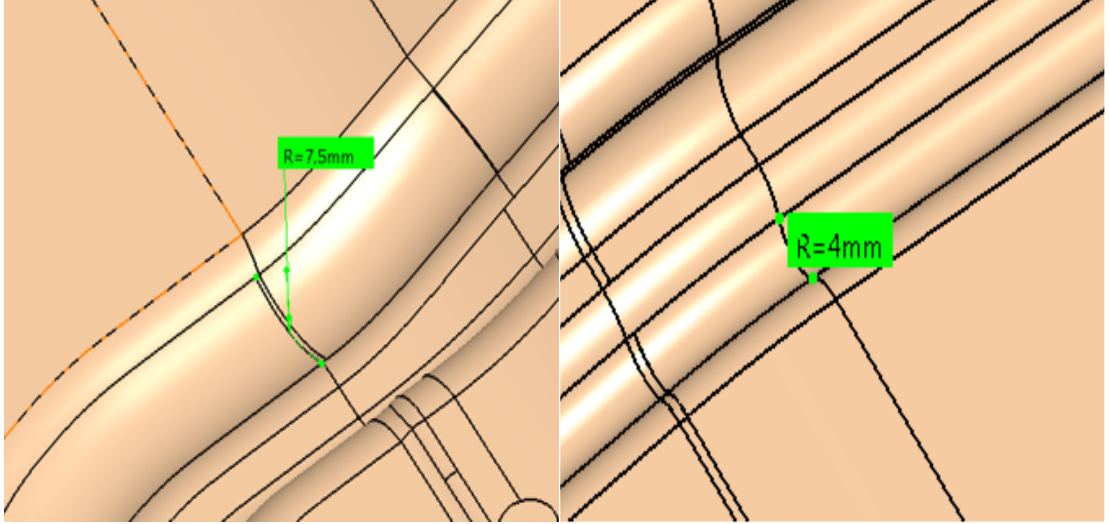
Şekil 5.12 Arka Araç Gövde Parçası_1 için bükme Prosesi Simülasyonu

Çekme prosesinde malzeme akışı ve geri yaylanmayı uygun şekilde kontrol etmek amacıyla sektörde oldukça kullanılan süzdürme çubuğu uygulaması yapılmıştır.



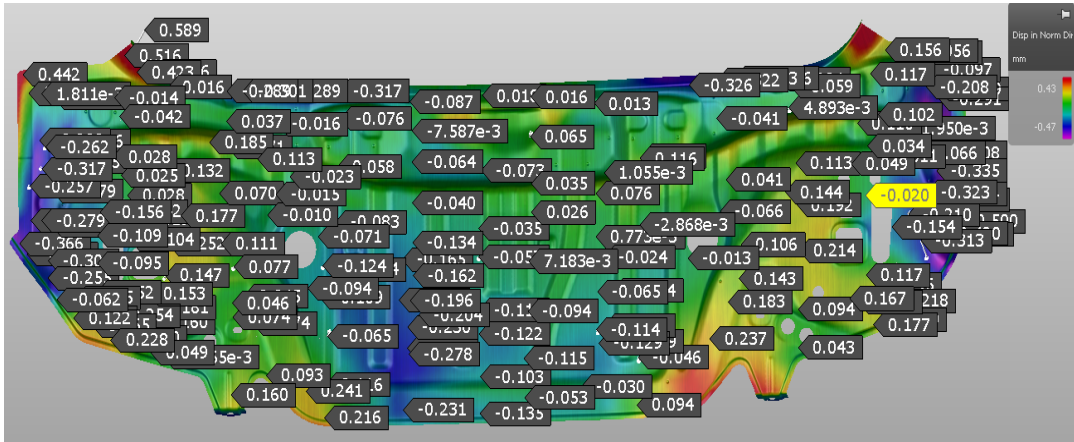
Şekil 5.13 Arka Araç Gövde Parçası_1 için Tasarlanan Süzdürme Çubuğu

Süzdürme çubuğu olmadan yapılan sonlu elemanlar simülasyonu ile kullanıldıktan sonraki simülasyon çalışmaları aşağıdaki görsellerde yer almaktadır. 2 farklı süzdürme çubuğu yarıçapı kullanılmıştır. Süzdürme çubuğu yarıçapları sırasıyla 4 ve 7,5 olacak süzdürme yarıçapları tasarlanmıştır.

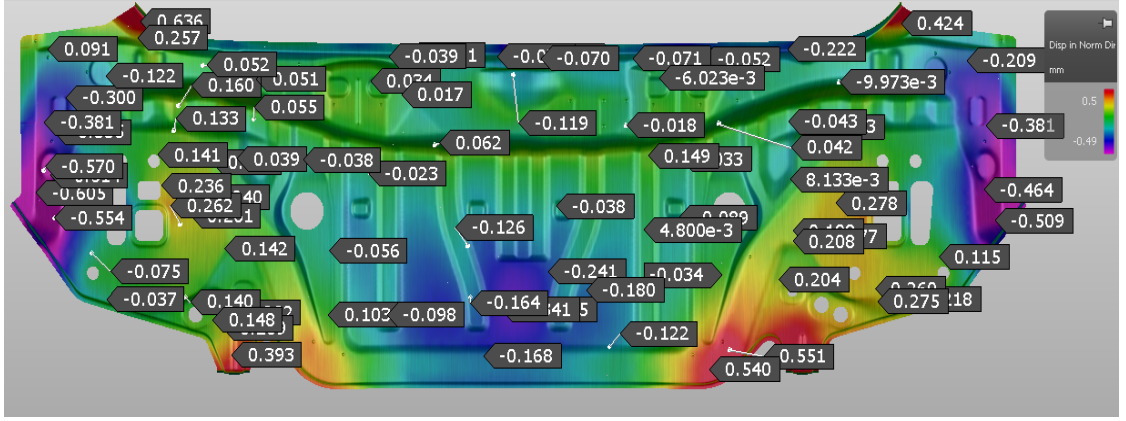


Şekil 5.14 Arka Araç Gövde Parçası_1 için Süzdürme Çubuğu Yarıçapları

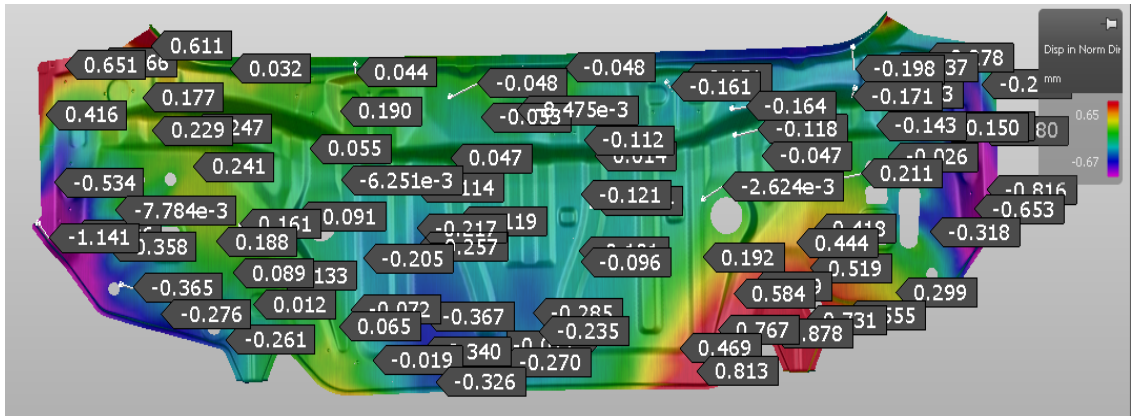
Tasarlanan süzdürme çubukları için sonlu elemanlar simülasyonu yapılmıştır. Öncelikle süzdürme çubuğu olmadan sonlu elemanlar simülasyonu gerçekleştirildikten sonra sırasıyla sırasıyla süzdürme yarıçapları 4 ve 7,5 olacak şekilde sonlu elemanlar simülasyonları gerçekleştirilmiştir.



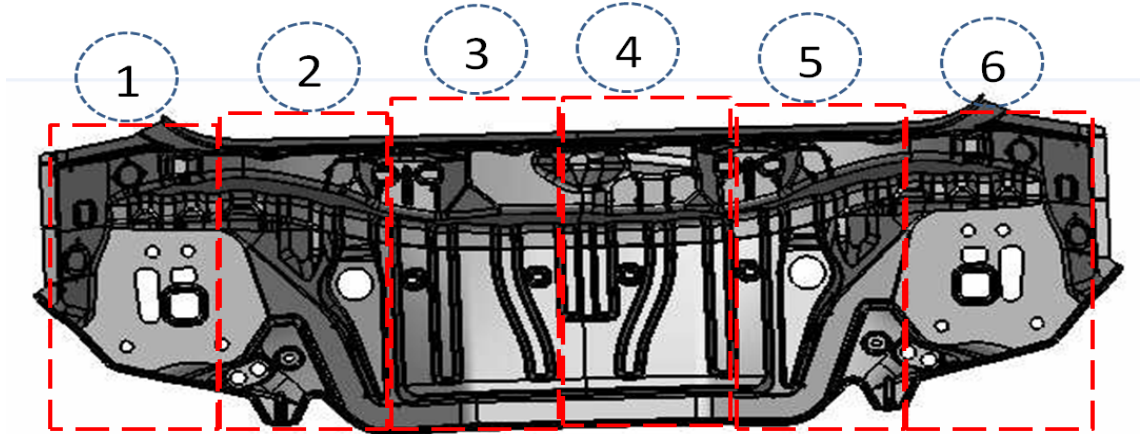
Şekil 5.15 Arka Araç Gövde Parçası_1 için Süzdürme Çubuğu Kullanılmadan Yapılan Geri Yaylanma Analizi



Şekil 5.16 Arka Araç Gövde Parçası_1 için Süzdürme Çubuğu Yarıçapı 4 Olacak Şekilde Yapılan Geri Yaylanma Analizi



Şekil 5.17 Arka Araç Gövde Parçası_1 için Süzdürme Çubuğu Yarıçapı 7,5 Olacak Şekilde Yapılan Geri Yaylanma Analizi



Şekil 5.18 Arka Araç Gövde Parçası_1 için Sonlu Elemanlar Analizi İçin Yapılan Ölçüm Bölgeleri

Parça için 6 farklı bölgeden ayrı ayrı 200 noktadan ölçümler alınmıştır. Toplam 1200 noktadan ölçüm yapılmıştır. Parça geri yaylanma toleransımız $\pm 0,5$ mm'dir.

Tablo 5.4 Arka Araç Gövde Parçası_1 için Sonlu Elemanlar Simülasyon Sonuçlarının Ortalamasını mm Cinsinden İfade Eden Temsili Yüzeye Ait Geri Yaylanma Sonuçları

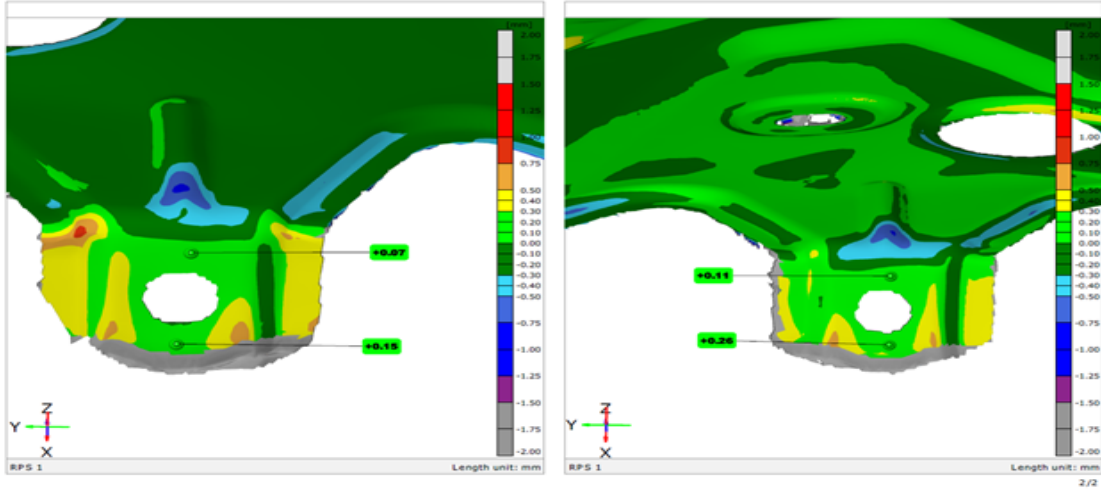
	Sonlu Elemanlar Simülasyonu Geri Yaylanma Ölçüm Sonuçları(mm)						
	1.Bölge	2.Bölge	3.Bölge	4.Bölge	5.Bölge	6.Bölge	Ortalama simülasyon sonuçları
Süzdürme çubuksuz	0,187	0,115	0,088	0,08	0,092	0,178	0,11
Süzdürme çubuğu yarıçapı R4	0,188	0,115	0,090	0,08	0,135	0,172	0,13
Süzdürme çubuğu yarıçapı R7.5	0,358	0,285	0,26	0,25	0,305	0,342	0,3

5.4.3 Sonlu Elemanlar Simülasyon Çalışması Değerlendirilmesi ve Deneysel Karşılaştırma

Elde edilen sonlu elemanlar simülasyon sonuçlarına göre süzdürme çubuğu yarıçapı 4 olan simülasyonun kalıp yüzeylerinde kullanılmasının geri yaylanma ve incelme için uygun olduğuna karar verilmiştir. Simülasyon sonuçlarına bakıldığında en fazla geri yaylanma süzdürme çubuğu yarıçapı 7,5 mm’de gözlenmiştir. En az geri yaylanma süzdürme çubuğu kullanılmadan elde edilmiştir ancak sac malzemenin çekme prosesinde yeterince gerilememesi dezavantaj oluşturmıştır. Süzdürme çubuğu olan simülasyonda süzdürme çubuğu kullanılmadan elde edilen simülasyon sonuçlarına göre benzer geri yaylanmalar elde edilmiştir.



Şekil 5.19 Arka Araç Gövde Parçası_1 için Reel Ortamda Üretimi Yapılan Parçanın Cad Data ile Karşılaştırılması



Şekil 5.20 Arka Araç Gövde Parçası_1 için Reel Ortamda Üretimi Yapılan Parçanın Cad Data ile Karşılaştırılması

Autoform programında yapılan simülasyon sonuçları ile parçanın proses süreçlerinin doğruluğu kanıtlanmıştır. Elde edilen proses yüzeylerinin reel ortamda ortaya çıkan nihai ürünle karşılaştırılması tarama programı olan Gom Inspect programında karşılaştırılmıştır.

Sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen geri yaylanmış yüzeyler, deney tarama yüzeyi ile Gom Inspect'de üst üste çakıştırılmış ve yüzeyler arasındaki mesafe mm cinsinden ölçülmüştür. Bu yöntemde, aralarındaki normal mesafe en küçük olan her bir düğüm noktası arasındaki mesafenin dik koordinat sistemindeki üç bileşeni

ölçülmüş ve bu değerler kullanılarak normal mesafe hesaplanmıştır. Sac yüzeyi boyunca toplam 1200 ölçüm alınmıştır.

Tablo 5.5 Arka Araç Gövde Parçası_1 için Geri Yaylanma Sonlu Elemanlar Simülasyon Sonuçlarının Reel Ortamda Üretimi Yapılan Parça ile Karşılaştırılması

	Sonlu elemanlar simülasyonu geri yaylanma ortalaması	Reel ortamda üretimi yapılan parçanın geri yaylanma ortalaması
Sonuçlar	0,13	0,30

Karekök ortalama hata kare (KOHK) yönteminden faydalanarak, SCGA270C-45 malzeme modelleri kullanılarak gerçekleştirilen sonlu elemanlar analiz sonuçlarının deneysel sonuca ne kadar yaklaştığı belirlenmiştir. KOHK yöntemi denklem 5.1’de verilmiştir. Bu denklemde n toplam ölçüm sayısını, x_i deney sonucunu, y_i ise benzetim sonucunu ifade etmektedir. KOHK yöntemi ile sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilmiş geri yaylanma yüzeyinin, deneysel olarak elde edilmiş yüzeye ne kadar yakın olduğu belirlenmiştir. KOHK değerinin sıfıra yaklaşması, sonlu elemanlar analizi tahminlerinin tutarlılığının yüksek olduğuna işaret etmektedir.

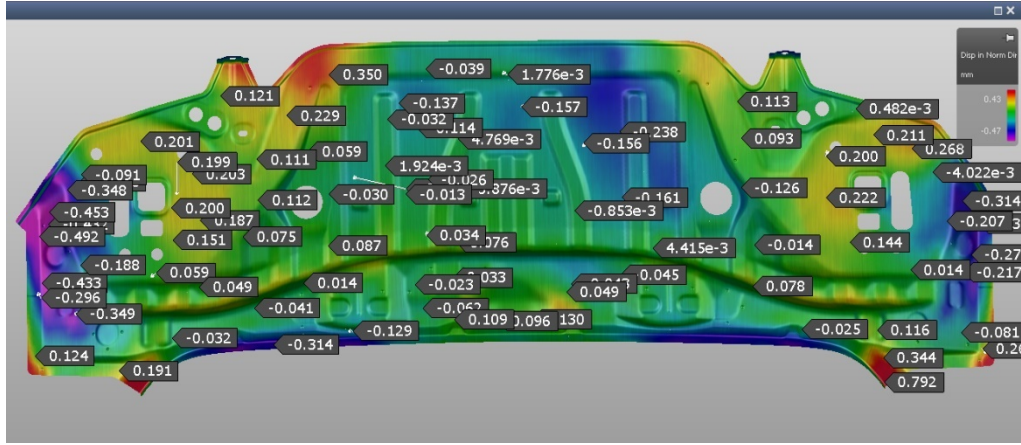
$$KOHK = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} = 0,11 \quad (5.1)$$

1200 noktadan alınan ölçüm sonuçlarına göre deney sonuçları ile Autoform programında yapılan simülasyon sonuçları arasındaki fark 0,15mm’dir. Malzeme geri yaylanma toleransının + -0,5 mm tolerans aralığı düşünüldüğünde elde edilen sonuçlar geri yaylanma sonuçlarına yaklaşmıştır. Elde edilen simülasyon sonuçları ile reel ortamda gerçekleştirilen çıktılar birbirleri ile örtüşmektedir.

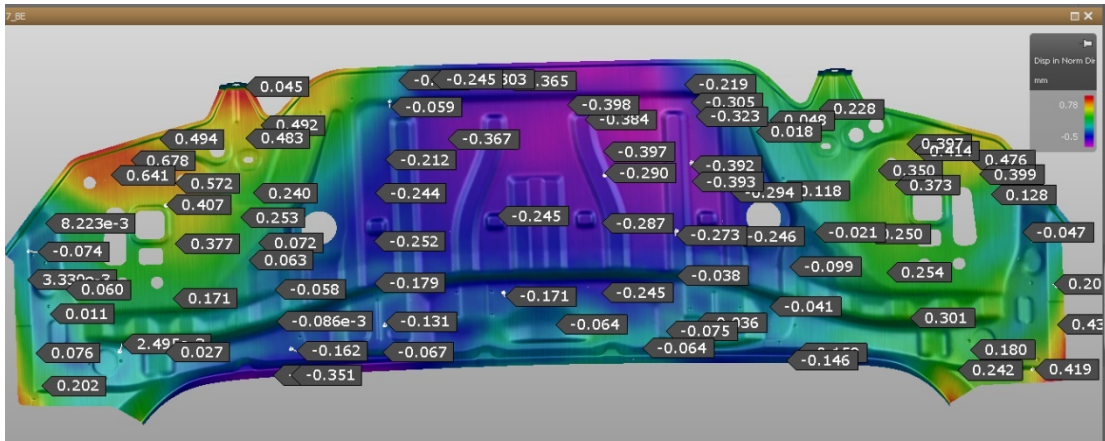
5.4.4 Arka Araç Gövde Parçası_1 Malzeme Kalınlığının Geri yaylanma Davranışı Üzerindeki Etkisi

Parametrik analizlerde, farklı kalınlıklardaki SCGA270C-45 sac metaller için benzetim çalışmaları yapılmıştır. Autoform programında elde edilen simülasyon

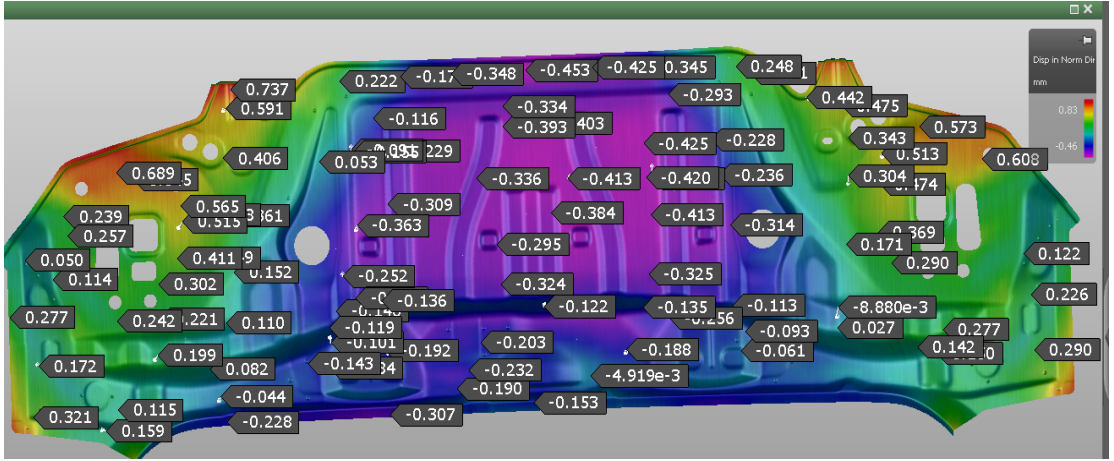
sonuçlarına göre geri yaylanma davranışları incelenmiştir. Autoform programında malzeme kalınlığı 0,8 - 1,2 - 1,6 - 2 ve 2,4 olacak şekilde malzeme kalınlıkları değiştirilmiştir. Yapılan çalışma için malzemenin diğer özellikleri sabit tutulmuştur. Elde edilen simülasyon sonuç görselleri aşağıda gösterilmiştir.



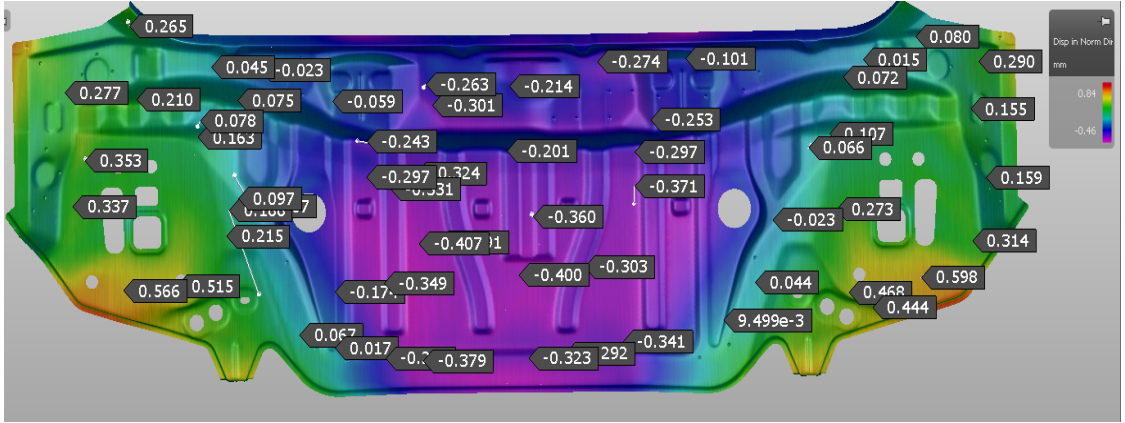
Şekil 5.21 Arka Araç Gövde Parçası_1 için Malzeme Kalınlığı 0,8 mm ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi



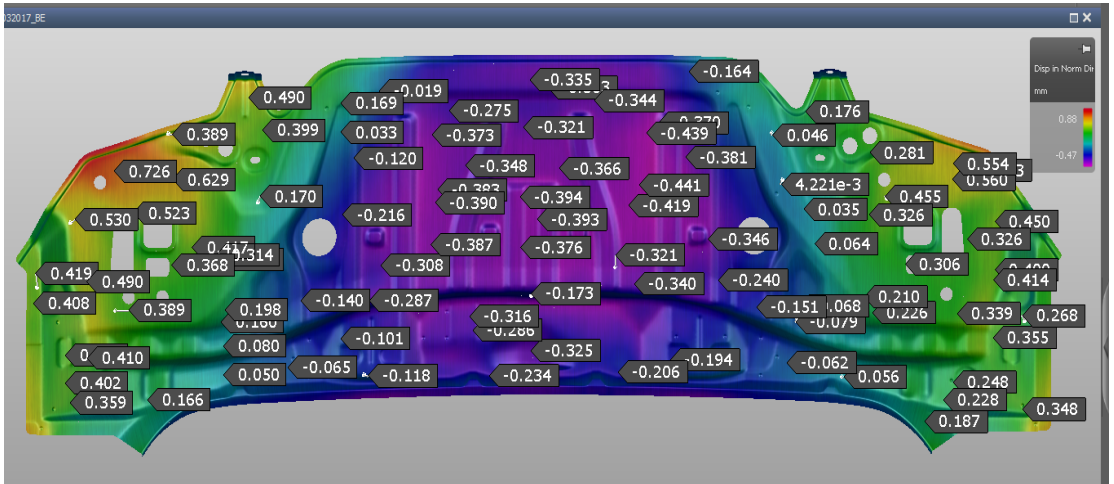
Şekil 5.22 Arka Araç Gövde Parçası_1 için Malzeme Kalınlığı 1,2 mm ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi



Şekil 5.23 Arka Araç Gövde Parçası_1 için Malzeme Kalınlığı 1,6 mm ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi



Şekil 5.24 Arka Araç Gövde Parçası_1 için Malzeme Kalınlığı 2,0 mm ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi



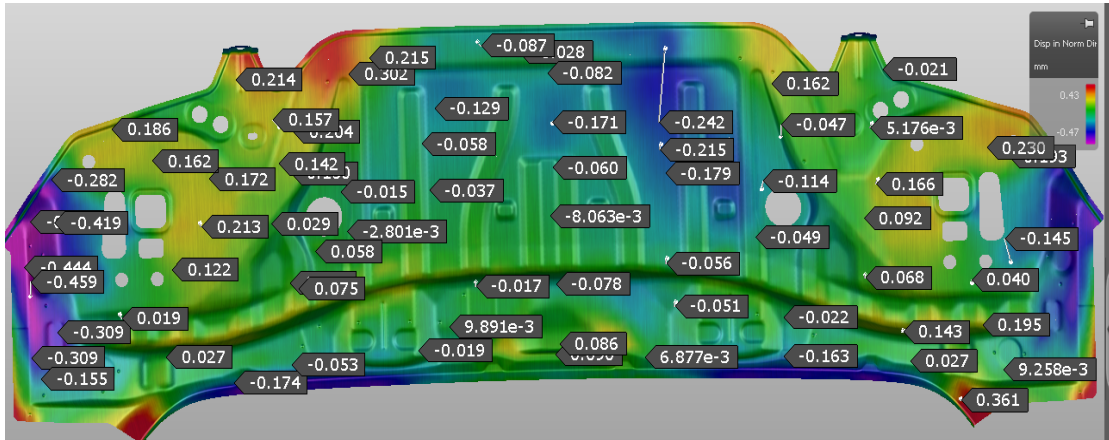
Şekil 5.25 Arka Araç Gövde Parçası_1 için Malzeme Kalınlığı 2,4 mm ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi

Tablo 5.6 Arka Araç Gövde Parçası_1 için Malzeme Kalınlığının Geri Yaylanma Sonuçlarına Etkisi

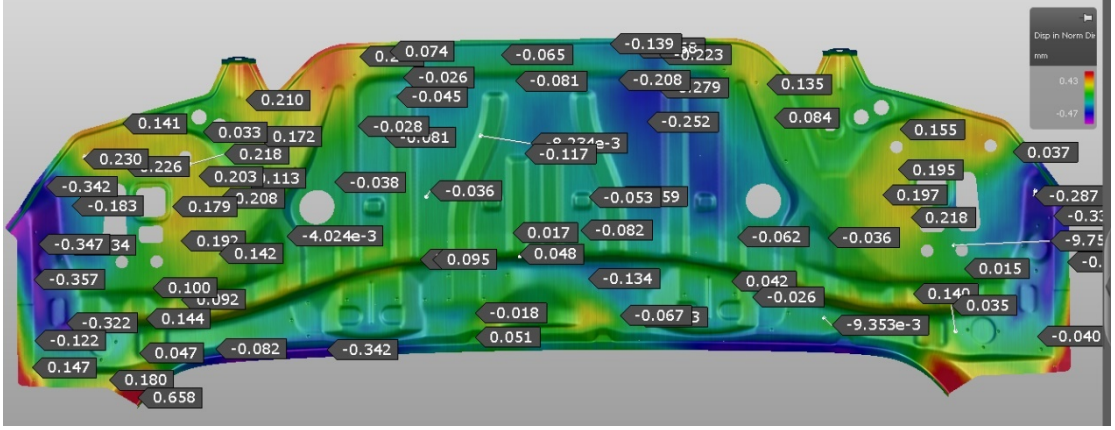
	Malzeme kalınlığı				
	t: 0,8	t: 1,2	t: 1,6	t: 2,0	t: 2,4
Sonlu elemanlar simülasyonu geri yaylanma sonuçları	0,11	0,17	0,22	0,23	0,27

5.4.5 Elastisite Modülünün Geri Yaylanma Davranışı Üzerindeki Etkisi

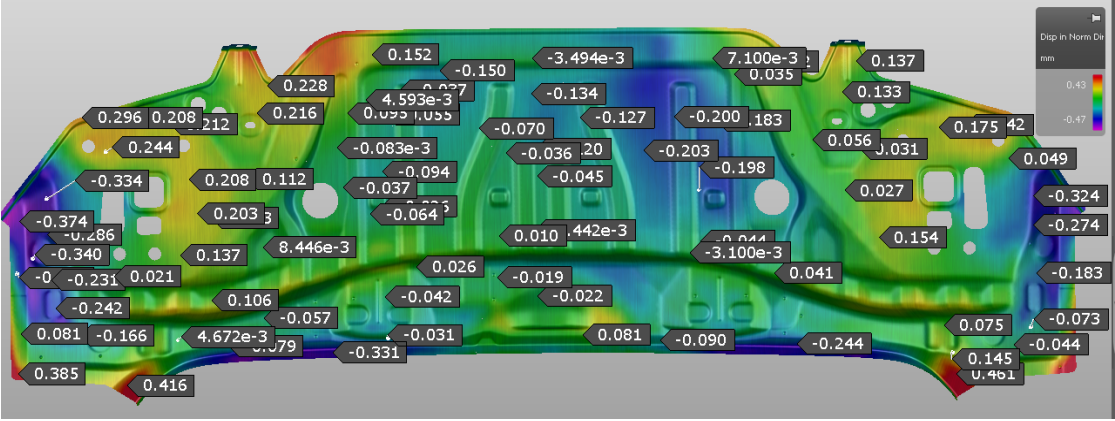
Autoform programında yapılan geri yaylanma simülasyon sonuçlarına göre elastisite modülünün geri yaylanma davranışı üzerine etkileri incelenmiştir. Malzemenin tüm özellikleri sabit tutularak sadece elastisite modülü parametresi değiştirilmiş sırasıyla 210000 MPa, 215000 MPa, 220000 MPa, 225000 MPa, 230000 MPa şeklinde değerler girilmiştir.



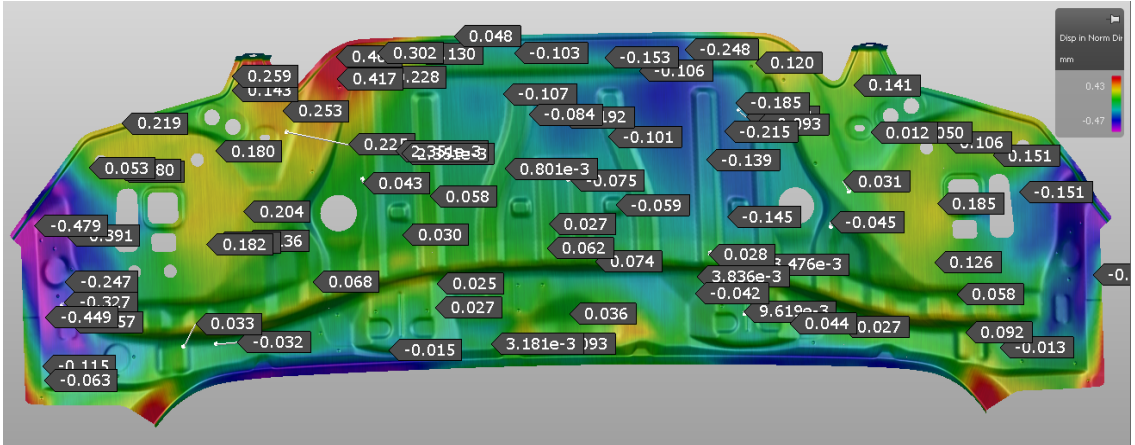
Şekil 5.26 Arka Araç Gövde Parçası_1 için Elastisite Modülü 210000 Mpa ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi



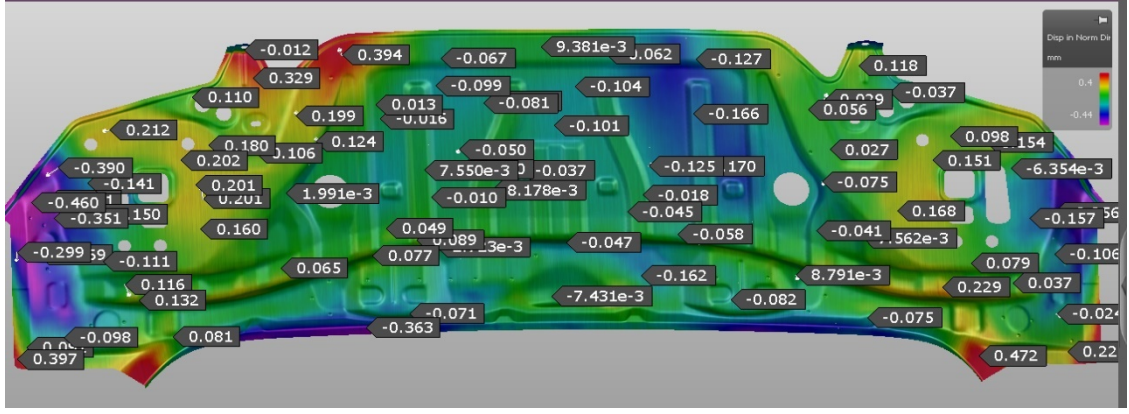
Şekil 5.27 Arka Araç Gövde Parçası_1 için Elastiste Modülü 215000 Mpa ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi



Şekil 5.28 Arka Araç Gövde Parçası_1 için Elastiste Modülü 220000 Mpa ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi



Şekil 5.29 Arka Araç Gövde Parçası_1 için Elastiste Modülü 225000 Mpa ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi



Şekil 5.30 Arka Araç Gövde Parçası_1 için Elastisite modülü 230000 Mpa ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi

Tablo 5.7 Arka Araç Gövde Parçası_1 için Elastisite Modülünün Geri Yaylanma Sonuçlarına Etkisi

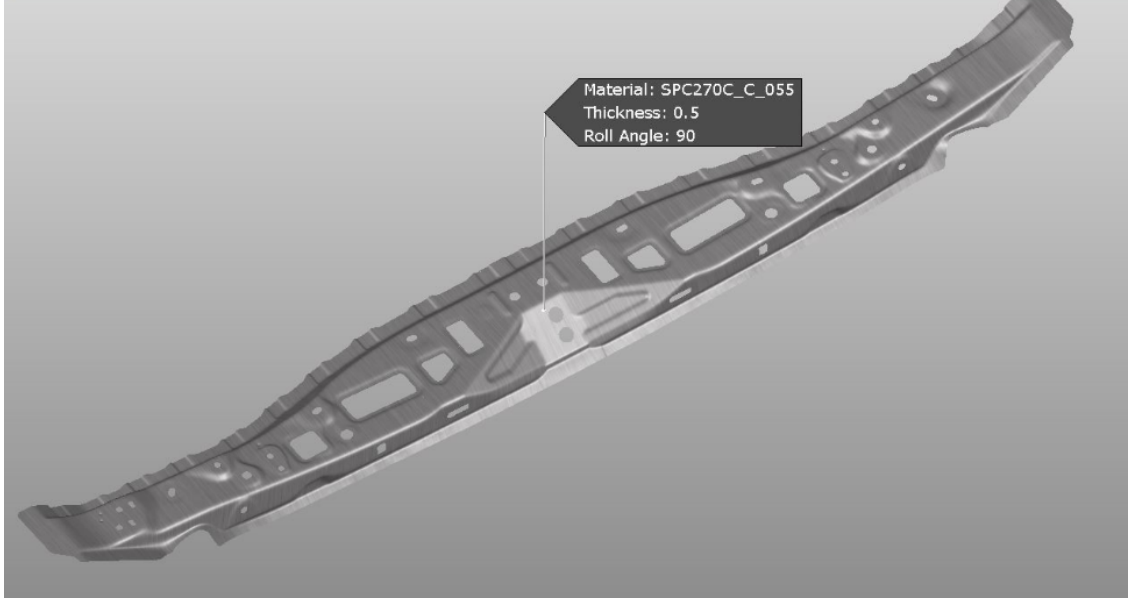
	Elastisite Modülü (Mpa)				
	210000	215000	220000	225000	230000
Sonlu elemanlar simülasyonu geri yaylanma sonuçları(mm)	0,154	0,154	0,154	0,154	0,18

5.4.6 Tartışma

Malzeme kalınlığı ve elastisite modülünün geri yaylanma davranışları incelendiğinde malzeme kalınlığı arttıkça geri yaylanma miktarının arttığı gözlemlenmiştir. Elastisite modülü arttıkça geri yaylanma miktarının değişmediği daha sonra azaldığı gözlemlenmiştir.

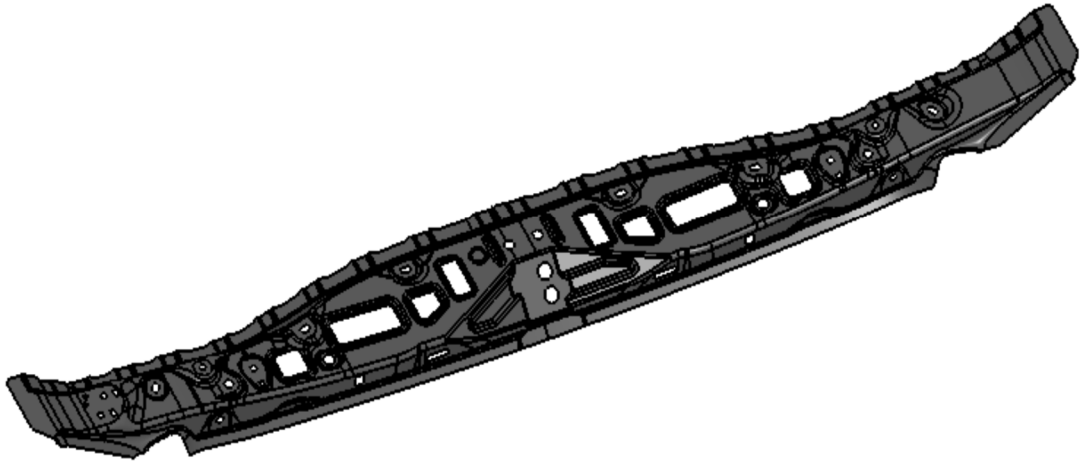
5.5 Arka Araç Gövde Parçası_2

Arka Araç Gövde Parçası_2 parçası 0,5 mm malzeme kalınlığına ve 270 MPa çekme dayanımına sahiptir.

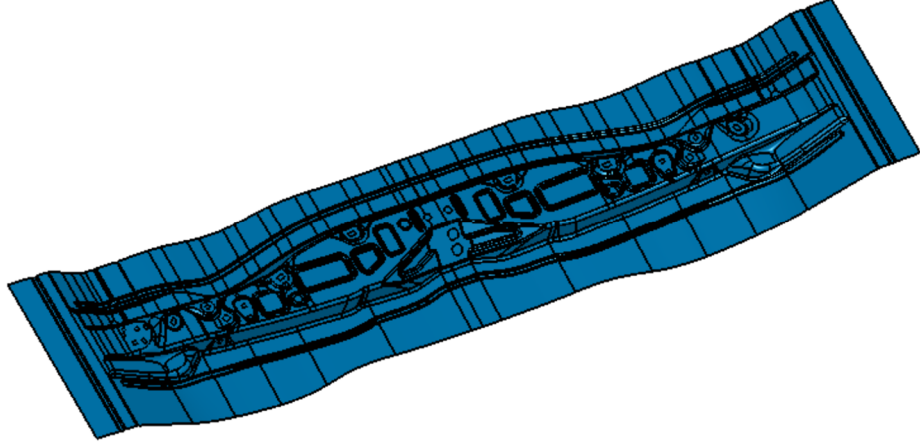


Şekil 5.31 Arka Araç Gövde Par ası_2

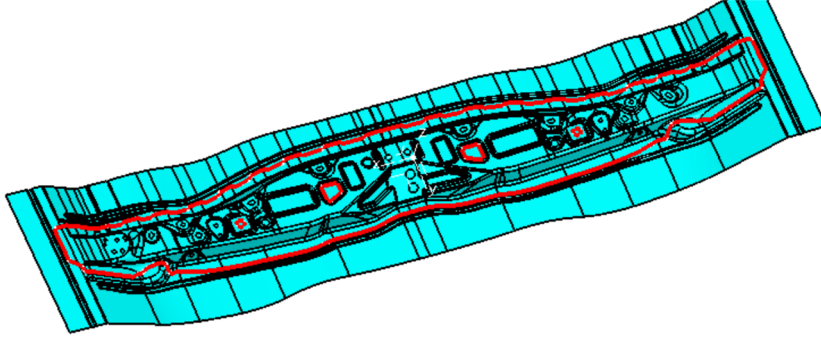
Parça,  ekme prosesiyle oluşturulduktan sonra delik delme ve kesme prosesleri yapılmıştır. Daha sonra etek kısmında büküm gerçekleştirilmiş bunu delme ile delme-kamlı delme prosesi izlemiştir. En son proseste ise kamlı bükme prosesi gerçekleştirilmiştir. Parça, toplam 6 proseste üretilmiştir.



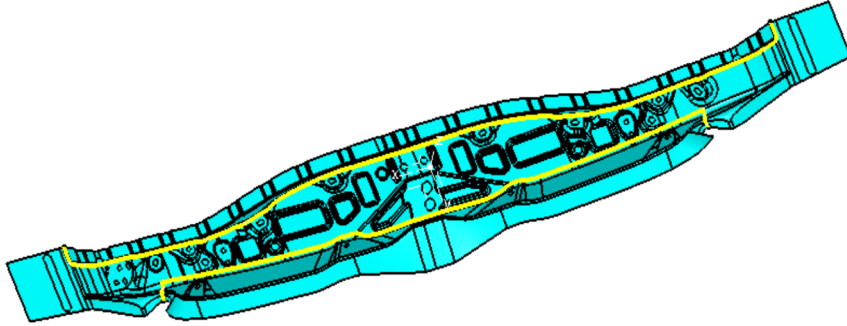
Şekil 5.32 Arka Araç Gövde Par ası_2 Cad Datası



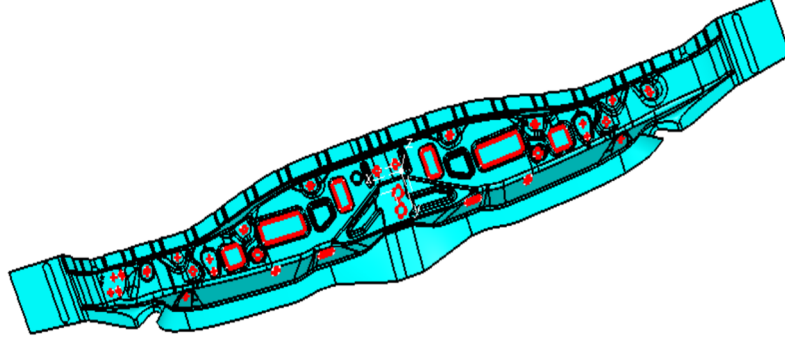
Şekil 5.33 Arka Araç Gövde Parçası_2 için Oluşturulan Çekme Prosesi Yüzeyi



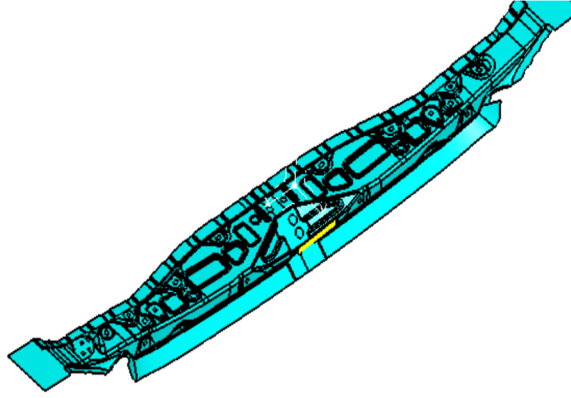
Şekil 5.34 Arka Araç Gövde Parçası_2 için Kesme ve Delme Hatları



Şekil 5.35 Arka Araç Gövde Parçası_2 için Kulak Büküm Hatları



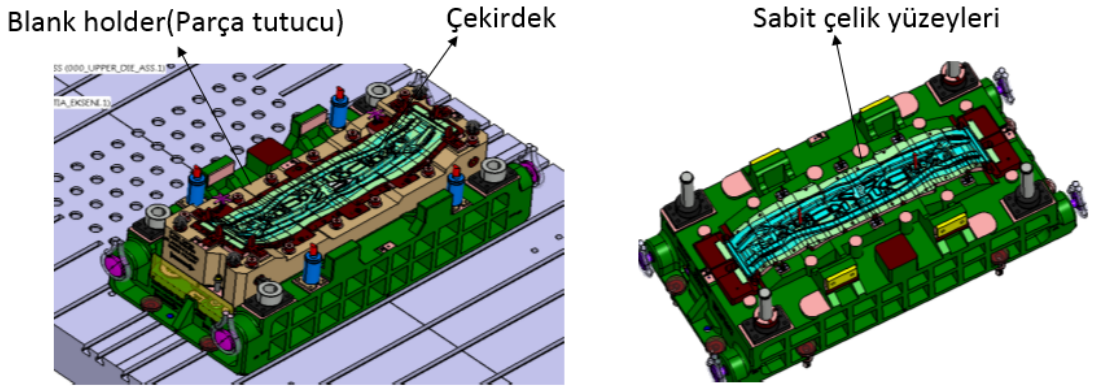
Şekil 5.36 Arka Araç Gövde Par ası_2 için Delme-Kamlı Delme Hatları



Şekil 5.37 Arka Araç Gövde Par ası_2 için Kamlı Büküm Hatları

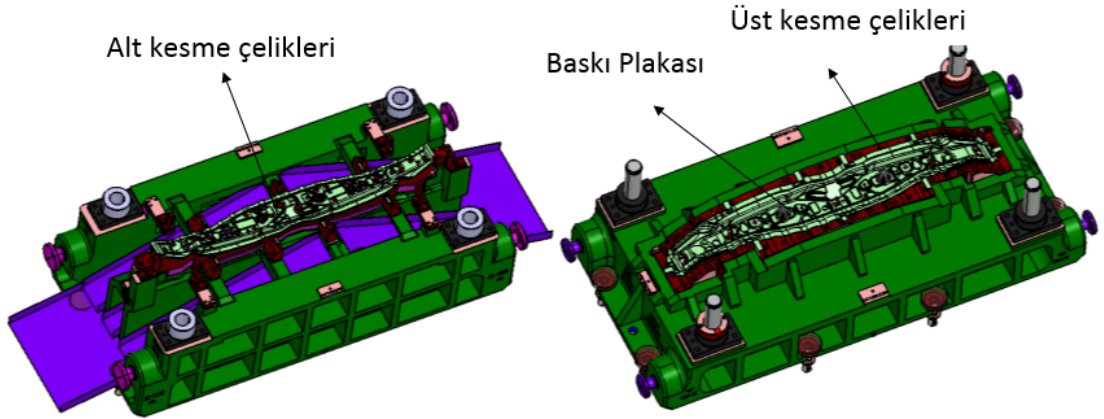
Bu parça, 6 farklı kalıp yapılarak üretilmiştir. Kalıplar, sırasıyla çekme prosesi, kesme-delme, bükme, delme, delme-kamlı delme ve kamlı bükme prosesleri kalıpları geli tirilirmi tir.

Parçanın formu çekme prosesi ile oluşturulmuştur. Çekme prosesi, parçaya formunu veren çekirdek, parça tutucu (blankholder) ve sabit üst kalıp yüzeyinden oluşmaktadır. Dişi kalıp, hareketli elemandır ve üst kısma yerleştirilmiştir. Parça tutucu gücünü presin alt kısmına yerleştirilmiş pres tablasından almaktadır.



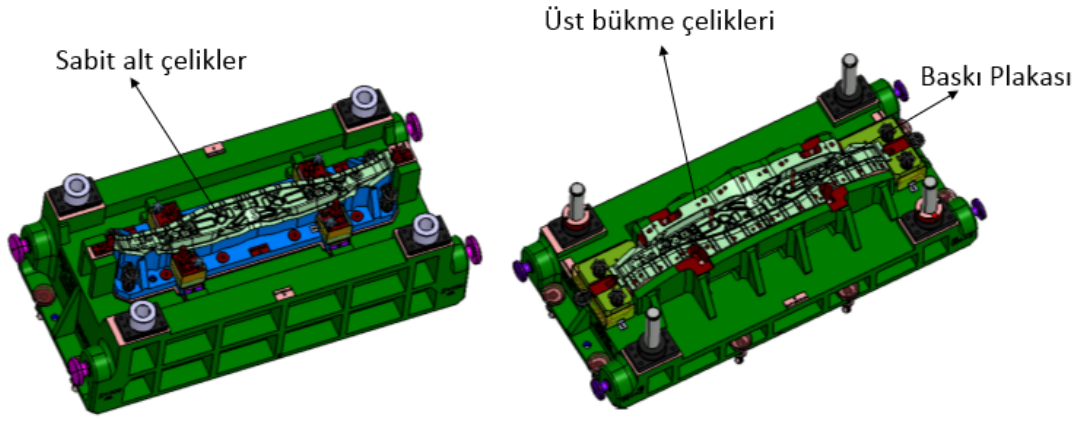
Şekil 5.38 Arka Araç Gövde Parçası_2 için Çekme Prosesi Alt ve Üst Kalıp

Bu parçanın diğer proseslerinde kesme ve delme yapılmış parçanın etrafında yer alan malzeme fazlalığı kesilmiştir. Kesme ve delme kalıbında ise parçayı tutma görevi gören baskı plakası, alt ve üst kesme çelikleri yer almaktadır. Baskı plakası gücünü yaylardan almaktadır. Üst kalıp hareketli elemandır. Kalıbı merkezleyen kolonlar kalıbın aynı ekseninde çalışmasını sağlamaktadır.



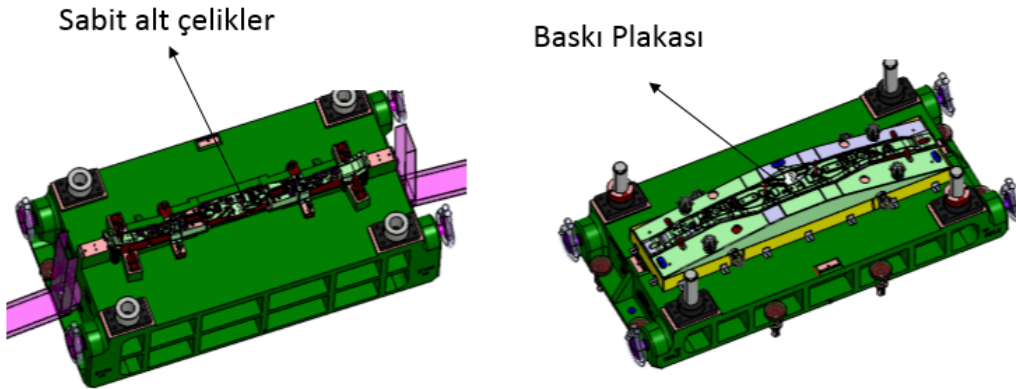
Şekil 5.39 Arka Araç Gövde Parçası_2 için Kesme ve Delme Prosesi Alt ve Üst Kalıp

Kalıbın sonraki prosesinde ise parçanın kulak ve etek kısımlarını bükmek amacıyla bükme kalıbı tasarlanmıştır. Bükme kalıbı, sabit alt çelikler, baskı plakası ve bükme çeliklerinden oluşmaktadır.

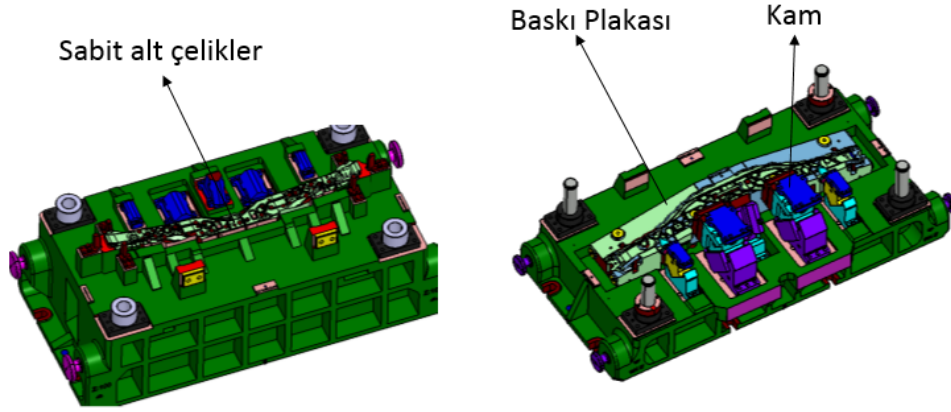


Şekil 5.40 Arka Araç Gövde Parası_2 için Bükme Prosesi Alt ve Üst Kalıp

Bükme prosesinden sonra ise delme ve delme-kamlı delme proses kalıbı yapılmıştır. Bu kalıplardan delme kalıbında temel elemanlar üst kalıpta yer alan baskı plakası ve delik delmeye yarayan zımbalar alt kalıpta ise sabit çeliklerdir. Delme-kamlı delme kalıbında ise en önemli eleman delmeyi açılı yapılmasını sağlayan kamdır. Aynı zamanda bu kalıpta sabit alt kesme çelikleri ile baskı plakası yer almaktadır.

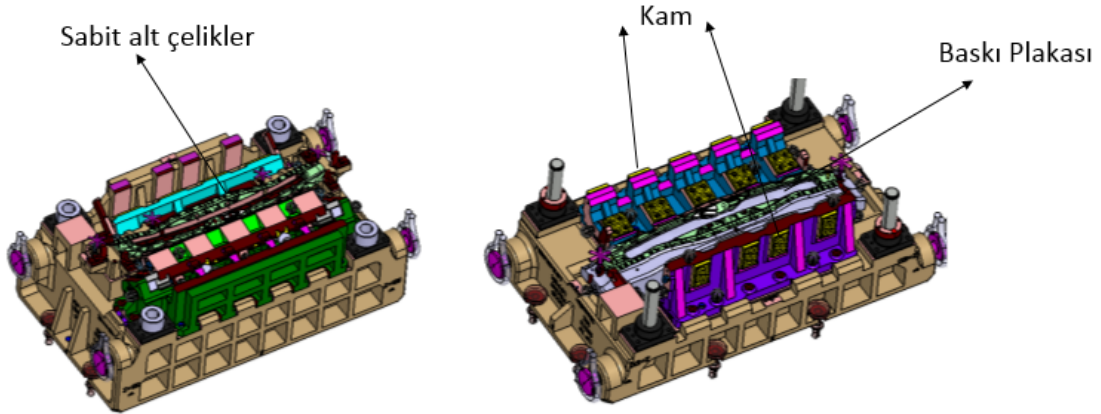


Şekil 5.41 Arka Araç Gövde Parası_2 için Delme Prosesi Alt ve Üst Kalıp



Şekil 5.42 Arka Araç Gövde Parçası_2 için Delme-Kamlı Delme Prosesi Alt ve Üst Kalıp

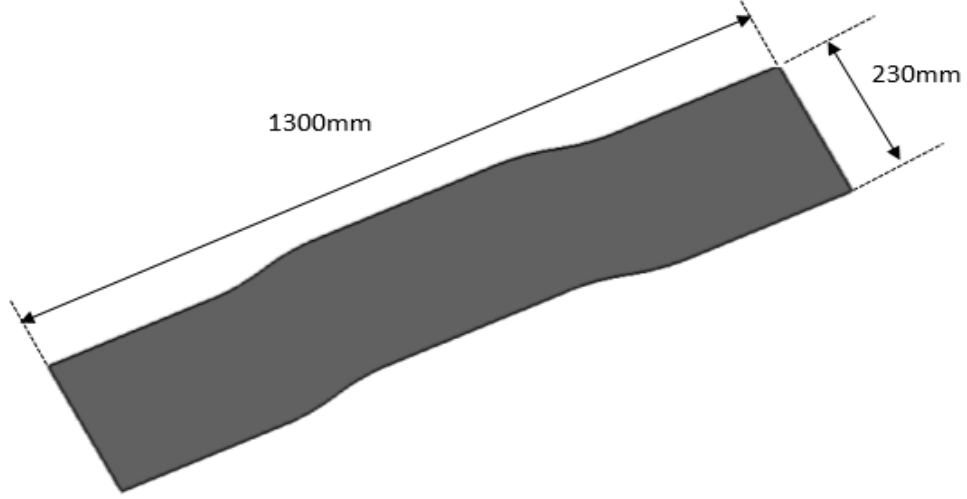
Kalıbın son prosesinde ise parçanın etek kısımlarında yer alan ters açıdan ötürü çift etkili kam tasarımı geliştirilmiştir. Tasarlanan kam sayesinde ters açıda yer alan bükme yapılmıştır. Kamlı bükme kalıbında, sabit alt çelikler, baskı plakası ve açılı bükmeyi sağlayan kamlar temel elemanları oluşturmaktadır.



Şekil 5.43 Arka Araç Gövde Parçası_2 için Kamlı Bükme Prosesi Alt ve Üst Kalıp

Yapılan deneylerde SPC270C_C-055 çelik malzeme kullanılmıştır. Sac 1300 mm genişliğinde ve 230 mm uzunluğundadır. Çekme prosesi kurs boyu olarak 70 mm, delme-kesme prosesi baskı plakası kurs boyu olarak 25 mm, bükme prosesi baskı plakası kurs boyu 50 mm delme prosesi baskı plakası kurs boyu 20 mm, delme-kamlı delme prosesi baskı plakası kurs boyu 25 mm ve son olarak kamlı bükme prosesi baskı plakası kurs boyu olarak 40 mm seçilmiştir. Tüm saclar haddeleme doğrultusu yönünde şekillendirilmiştir. Haddeleme yönü sacın üreticisi tarafından belirtilmiştir. Böylece, şekillendirilen tüm parçaların anizotropi yönleri

birbirleriyle uyumlu hale getirilmiştir. Deneylerde kullanılan SPC270C_C-055 çelik malzemenin boyut ve özellikleri aşağıdaki görsellerde verilmiştir. Malzeme özellikleri Autoform malzeme programından elde edilmiştir.



Şekil 5.44 Arka Araç Gövde Parçası_2 için Sac Malzemenin Boyutları

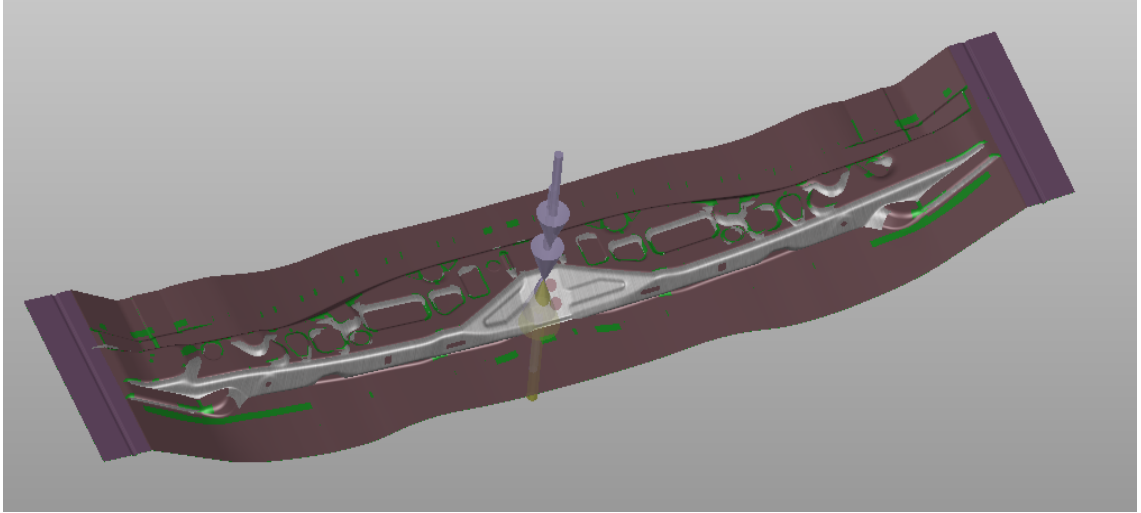
Tablo 5.8 SPC270C_C-055 Sac Malzemenin Özellikleri

g/cm ³	E(Mpa)	v	G0(Mpa)	R _m (Mpa)
7,8	206000	0,3	190	340,3

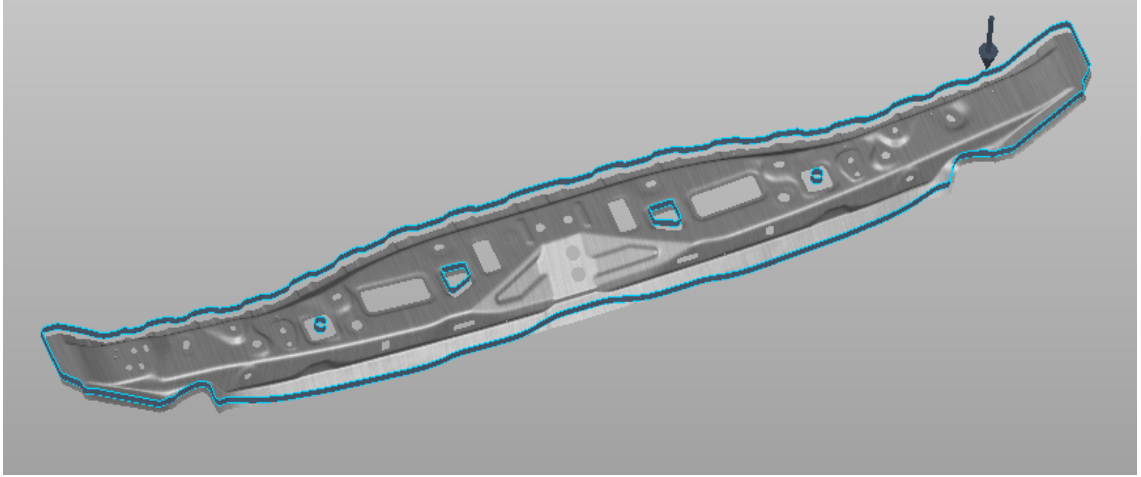
5.5.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Analiz iki farklı formülasyon kullanılarak, birbirini takip eden iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşama açık formülasyon kullanılarak şekil verme işlemi, ikinci aşama ise kapalı formülasyon kullanılarak geri yaylanmanın belirlenmesidir.

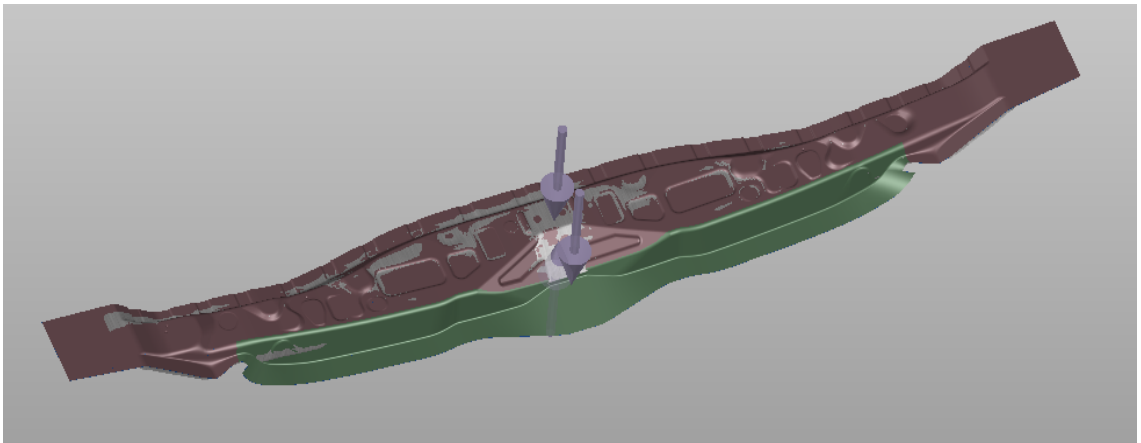
Parça Cad datası yardımıyla Catia V5 programında çekme prosesi için çekirdek, parça tutucu ve sabit üst kalıp yüzeyleri oluşturulmuştur. Oluşturulan yüzeyler Autoform programında import edilerek simülasyon yapılmıştır. Simülasyon çalışması yapılırken sürtünme katsayısı Toyotetsu tarafından 0,15 mm belirlenmiştir.



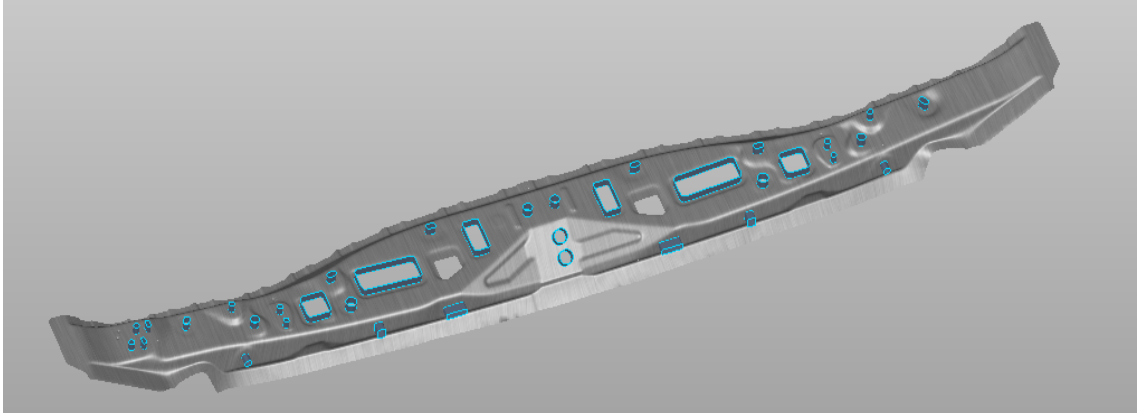
Şekil 5.45 Arka Araç Gövde Parçası_2 için Çekme Prosesi Simülasyonu



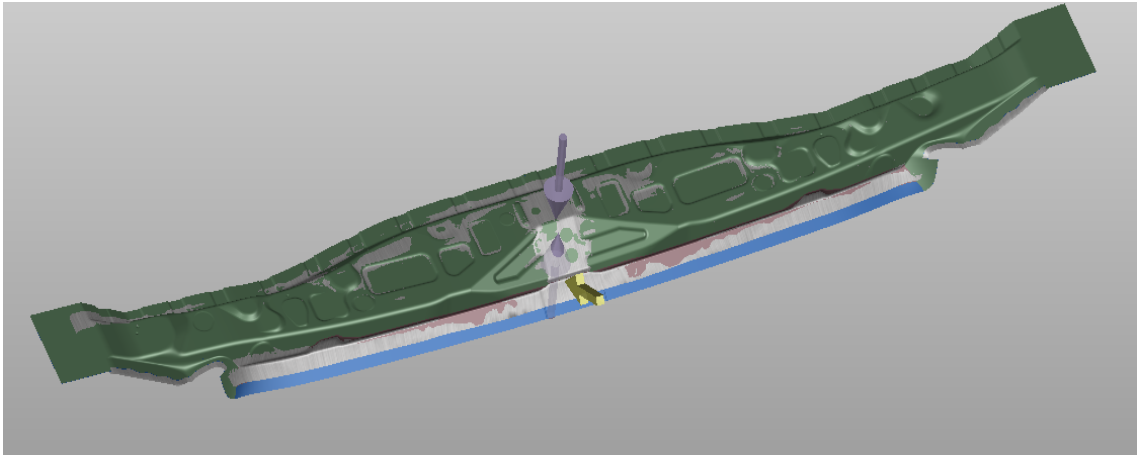
Şekil 5.46 Arka Araç Gövde Parçası_2 için Kesme ve Delme Prosesi Simülasyonu



Şekil 5.47 Arka Araç Gövde Parçası_2 için Bükme Prosesi Simülasyonu

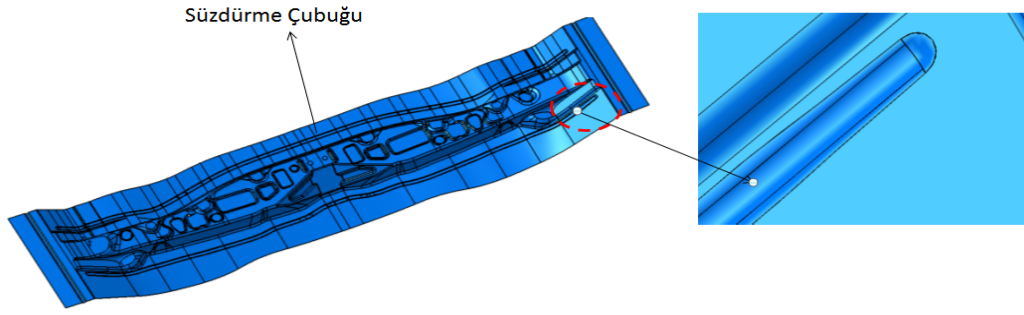


Şekil 5.48 Arka Araç Gövde Parçası_2 için Delme-Kamlı Delme Prosesi Simülasyonu

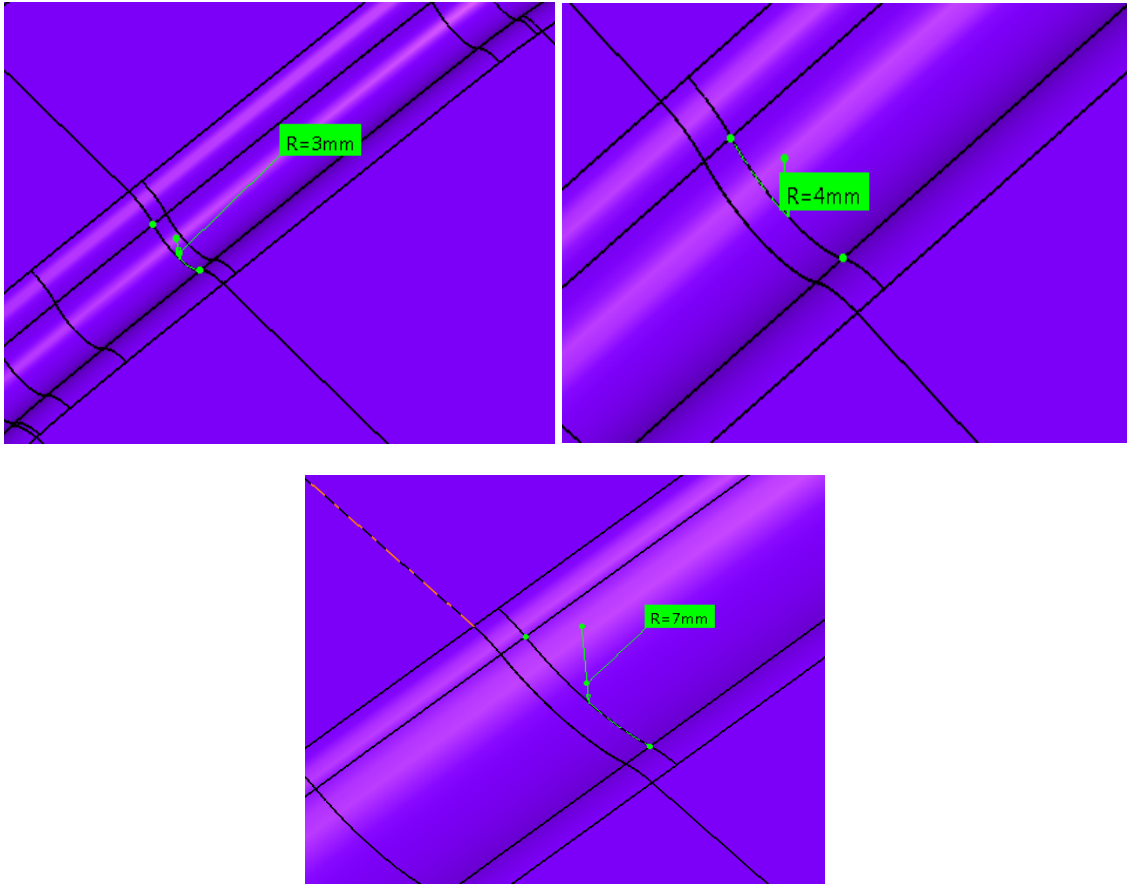


Şekil 5.49 Arka Araç Gövde Parçası_2 için Kamlı Bükme Prosesi Simülasyonu

Bu parçamız içinde geri yaylanma ve incelme seviyesini iyi ölçüde tutmak amacıyla sektörde oldukça kullanılan süzdürme çubuğu yarıçapı kullanılmıştır. Parçanın geometrik yapısını karmaşık olması itibariyle çeşitli proseslerden geri yaylanmalar için ölçümler alınmıştır. Bu parça Arka Araç Gövde Parçası_1 parçası ile kaynak ile birleştirildikten sonra araca monte edilmektedir. Parça geri yaylanma toleransımız $\pm 0,5$ mm'dir. Sonlu elemanlar simülasyon aşamasında malzeme yapısında minimum geri yaylanma elde edilmesi amacıyla süzdürme çubuksuz ve süzdürme çubuklu deneysel çalışmalar yapılmıştır.

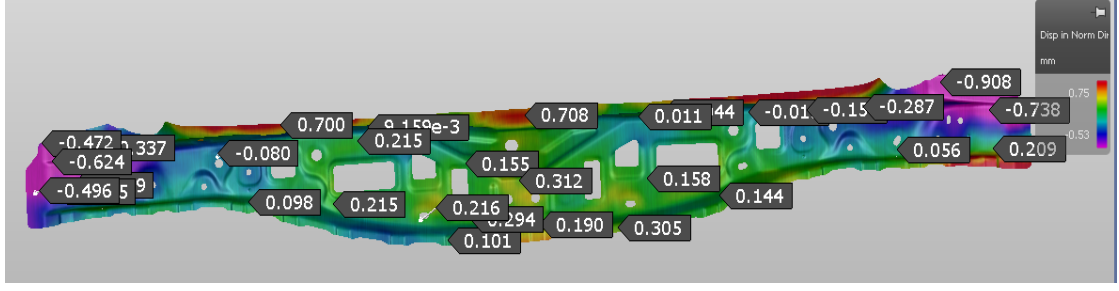


Şekil 5.50 Arka Araç Gövde Parçası_2 için Süzdürme Çubuğu

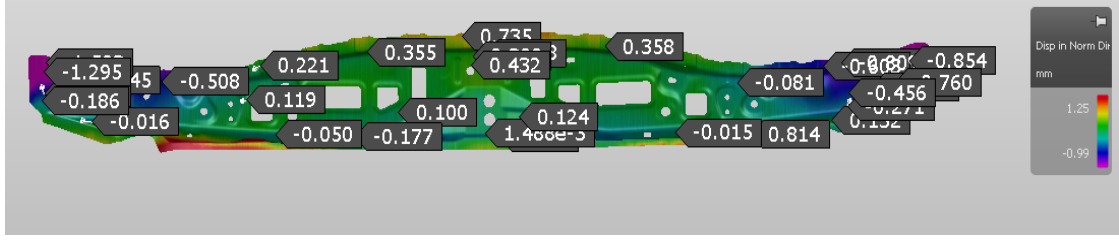


Şekil 5.51 Arka Araç Gövde Parçası_2 için Süzdürme Çubuğu Yarıçapları

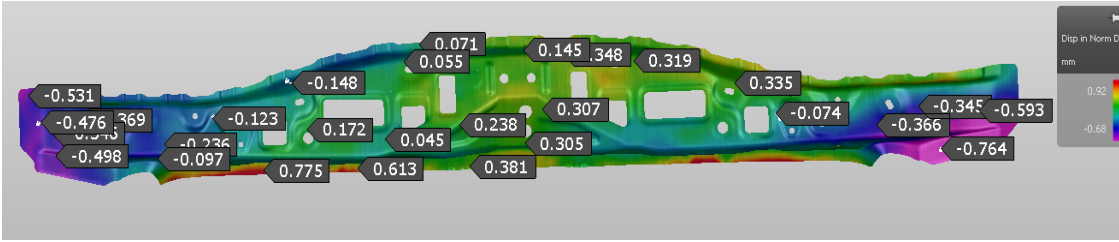
Tasarlanan süzdürme çubukları için sonlu elemanlar simülasyonu yapılmıştır. Öncelikle süzdürme çubuğu olmadan sonlu elemanlar simülasyonu gerçekleştirildikten sonra sırasıyla sırasıyla süzdürme yarıçapları 3, 4 ve 7 olacak şekilde sonlu elemanlar simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Süzdürme çubuk yarıçaplarının seçilmesinde tecrübeli Toyotetsu mühendislerinin bilgi birikiminden faydalanılmıştır.



Şekil 5.52 Arka Araç Gövde Parçası_2 için Süzdürme Çubuğu Kullanılmadan Yapılan Geri Yaylanma Analizi



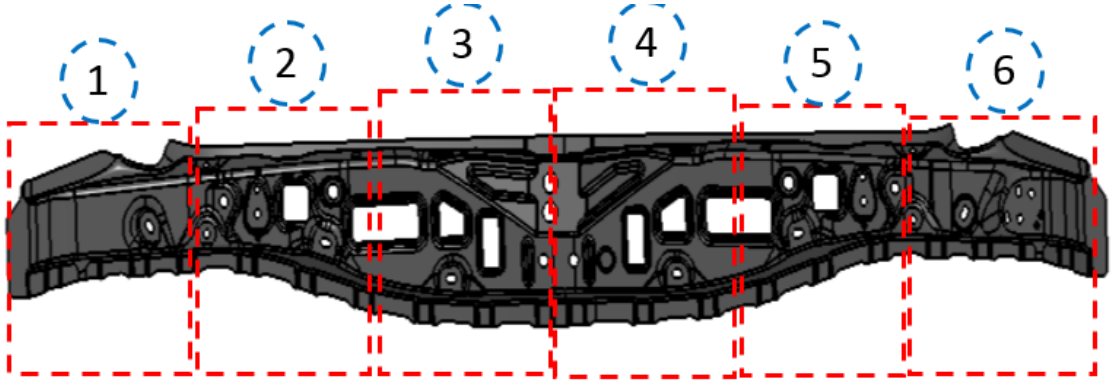
Şekil 5.53 Arka Araç Gövde Parçası_2 için Süzdürme Çubuğu Yarıçapı 3 Olacak Şekilde Yapılan Geri Yaylanma Analizi



Şekil 5.54 Arka Araç Gövde Parçası_2 için Süzdürme Çubuğu Yarıçapı 4 Olacak Şekilde Yapılan Geri Yaylanma Analizi



Şekil 5.55 Arka Araç Gövde Parçası_2 için Süzdürme Çubuğu Yarıçapı 7 Olacak Şekilde Yapılan Geri Yaylanma Analizi



Şekil 5.56 Arka Araç Gövde Parçası_2 için Sonlu Elemanlar Analizi için Yapılan Ölçüm Bölgeleri

Parça için 6 farklı bölgeden ayrı ayrı 200 noktadan ölçümler alınmıştır. Toplam 1200 noktadan ölçüm yapılmıştır. Parça geri yaylanma toleransımız $\pm 0,5$ mm'dir.

Tablo 5.9 Arka Araç Gövde Parçası_2 için Sonlu Elemanlar Simülasyon Sonuçlarının Ortalamasını mm Cinsinden İfade Eden Temsili Yüzeye Ait Geri Yaylanma Sonuçları

	Sonlu Elemanlar Simülasyonu Geri Yaylanma Ölçüm Sonuçları(mm)						
	1.Bölge	2.Bölge	3.Bölge	4.Bölge	5.Bölge	6.Bölge	Ortalama simülasyon sonuçları
Süzdürme çubuksuz	0,38	0,12	0,09	0,2	0,25	0,65	0,284
Süzdürme çubuğu yarıçapı R3	0,65	0,4	0,42	0,45	0,6	1	0,58
Süzdürme çubuğu yarıçapı R4	0,4	0,15	0,08	0,21	0,26	0,7	0,3
Süzdürme çubuğu yarıçapı R7	1,42	1,4	0,1	0,96	0,87	1,6	1,05

değerler kullanılarak normal mesafe hesaplanmıştır. Sac yüzeyi boyunca toplam 1200 ölçüm alınmıştır.

Tablo 5.10 Arka Araç Gövde Parçası_2 için Geri Yaylanma Sonlu Elemanlar Simülasyon Sonuçlarının Reel Ortamda Üretimi Yapılan Parça ile Karşılaştırılması

	Sonlu elemanlar simülasyonu geri yaylanma ortalaması	Reel ortamda üretimi yapılan parçanın geri yaylanma ortalaması
Sonuçlar	0,3	0,2

Karekök ortalama hata kare (KOHK) yönteminden faydalanarak, SPC270C_C-055 malzeme modelleri kullanılarak gerçekleştirilen sonlu elemanlar analiz sonuçlarının deneysel sonuca ne kadar yaklaştığı belirlenmiştir. KOHK yöntemi denklem 5.2’de verilmiştir. Bu denklemde n toplam ölçüm sayısını, x_i deney sonucunu, y_i ise benzetim sonucunu ifade etmektedir. KOHK yöntemi ile sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilmiş geri yaylanma yüzeyinin, deneysel olarak elde edilmiş yüzeye ne kadar yakın olduğu belirlenmiştir. KOHK değerinin sıfıra yaklaşması, sonlu elemanlar analizi tahminlerinin tutarlılığının yüksek olduğuna işaret etmektedir.

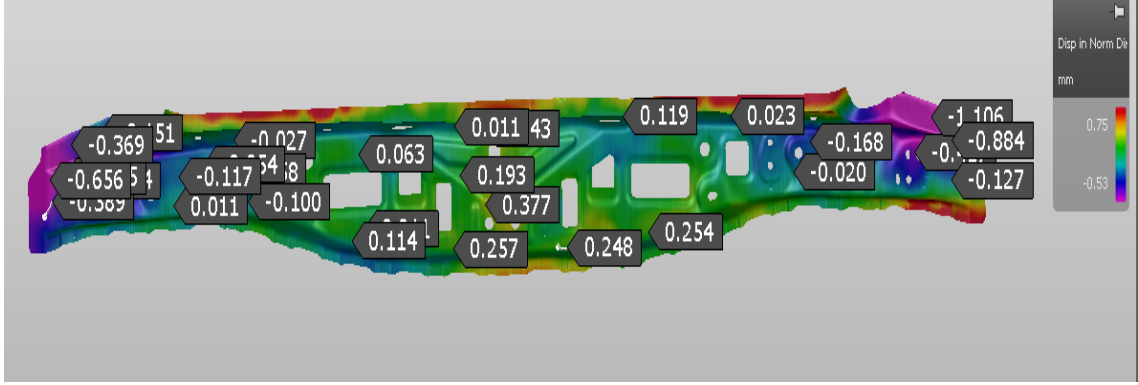
$$KOHK = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i^n (x_i - y_i)^2} = 0,08 \quad (5.2)$$

1200 noktadan alınan ölçüm sonuçlarına göre deney sonuçları ile Autoform programında yapılan simülasyon sonuçları arasındaki fark 0,1mm’dir. Malzeme geri yaylanma toleransının +,-0,5 mm tolerans aralığı düşünüldüğünde elde edilen sonuçlar geri yaylanma sonuçlarına yaklaşmıştır. Elde edilen simülasyon sonuçları ile reel ortamda gerçekleştirilen çıktılar birbirleri ile örtüşmektedir.

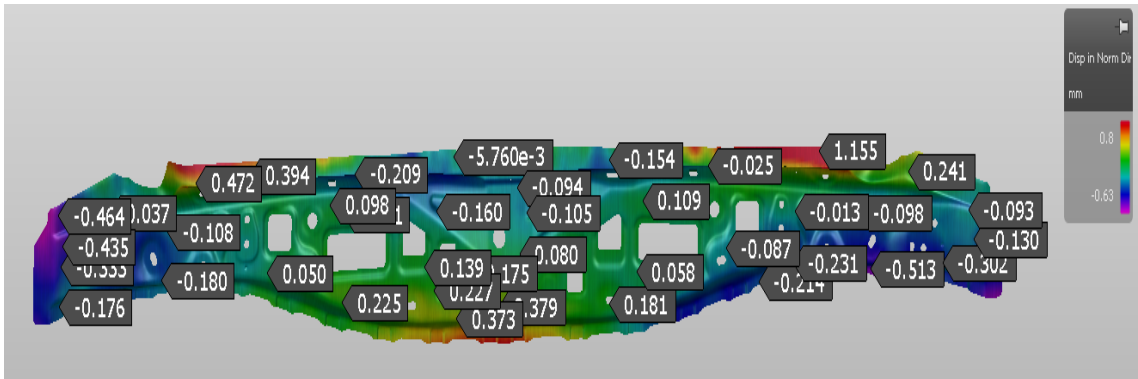
5.5.3 Malzeme Kalınlığının Geri Yaylanma Davranışı Üzerindeki Etkisi

Parametrik analizlerde, farklı kalınlıklardaki SPC270C_C-055 sac metaller için benzetim çalışmaları yapılmıştır. Autoform programında elde edilen simülasyon sonuçlarına göre geri yaylanma davranışları incelenmiştir. Autoform programında

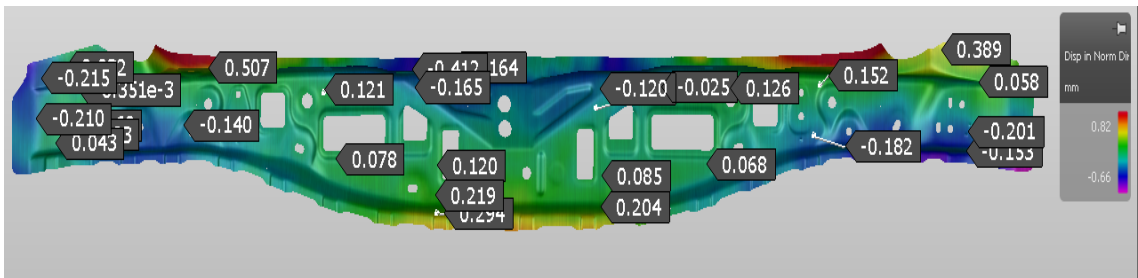
malzeme kalınlığı 0,5 - 0,9 - 1,3 - 1,8 ve 2,2 olacak şekilde malzeme kalınlıkları değiştirilmiştir. Yapılan çalışmada malzemenin diğer özellikleri sabit tutulmuştur.



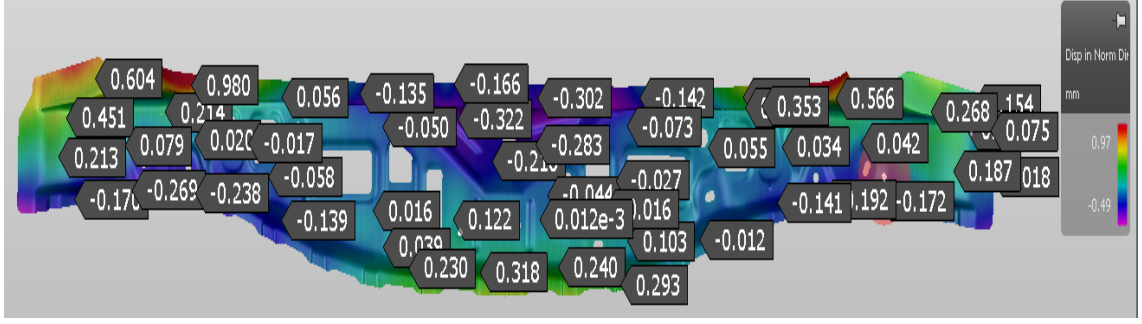
şekil 5.58 Arka Araç Gövde Parası_2 için Malzeme Kalınlığı 0,5 mm ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi



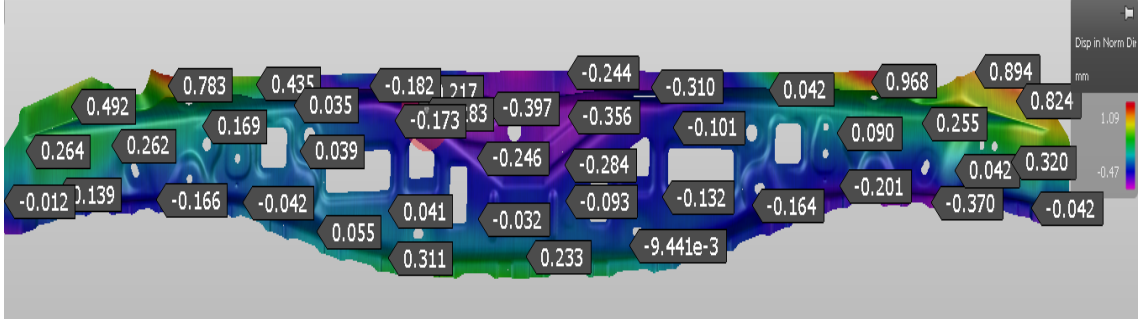
şekil 5.59 Arka Araç Gövde Parası_2 için Malzeme Kalınlığı 0,9 mm ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi



şekil 5.60 Arka Araç Gövde Parası_2 için Malzeme Kalınlığı 1,3 mm ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi



Şekil 5.61 Arka Araç Gövde Parçası_2 için Malzeme Kalınlığı 1,8 mm ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi



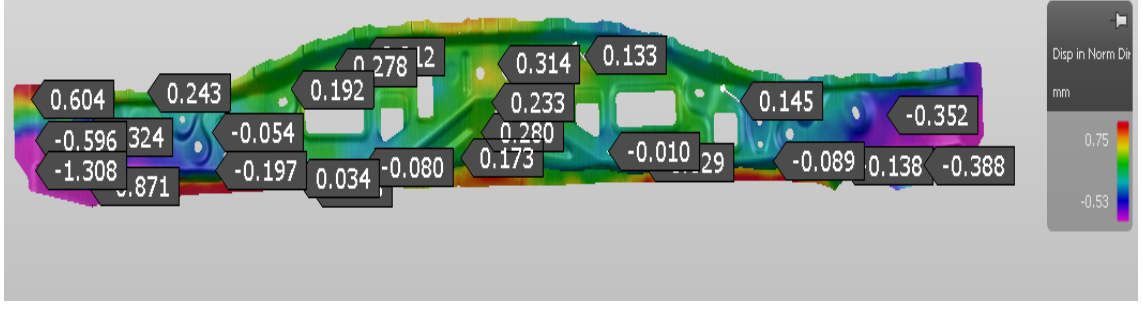
Şekil 5.62 Arka Araç Gövde Parçası_2 için Malzeme Kalınlığı 2,2 mm ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi

Tablo 5.11 Arka Araç Gövde Parçası_2 için Malzeme Kalınlığının Geri Yaylanma Sonuçlarına Etkisi

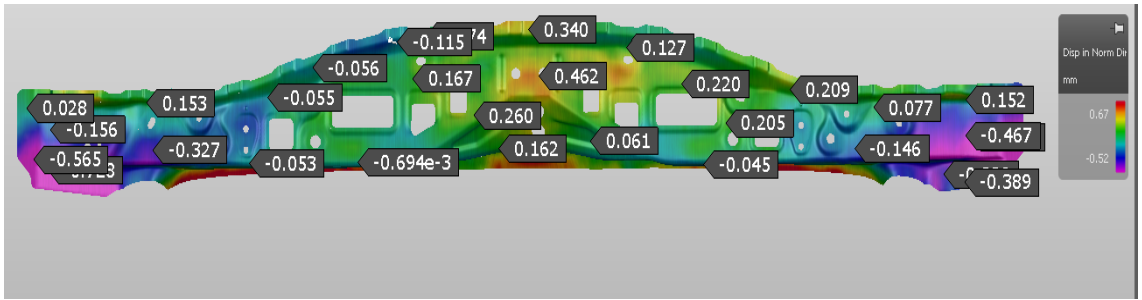
	Malzeme Kalınlığı(mm)				
	t: 0,5	t: 0,9	t: 1,3	t: 1,8	t: 2,2
Sonlu elemanlar simülasyonu geri yaylanma sonuçları	0,11	0,15	0,165	0,36	0,40

5.5.4 Elastisite Modülünün Geri Yaylanma Davranışı Üzerindeki Etkisi

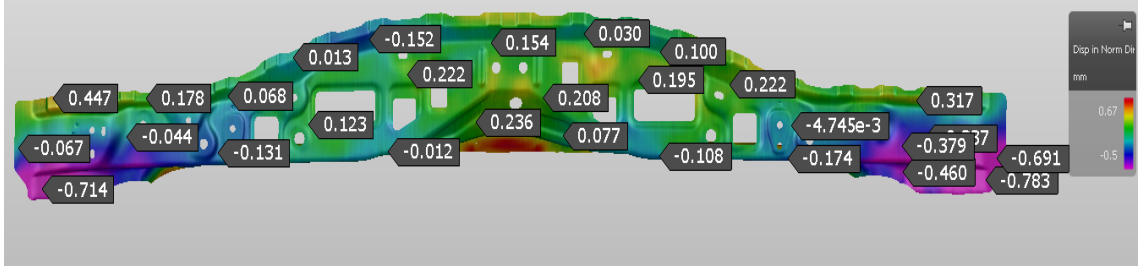
Autoform programında yapılan geri yaylanma simülasyon sonuçlarına göre elastisite modülünün geri yaylanma davranışı üzerine etkileri incelenmiştir. Malzemenin tüm özellikleri sabit tutularak sadece elastisite modülü parametresi değiştirilmiş sırasıyla 206000 MPa, 210000 MPa, 215000 MPa, 220000 MPa, 225000 MPa şeklinde değerler girilmiştir.



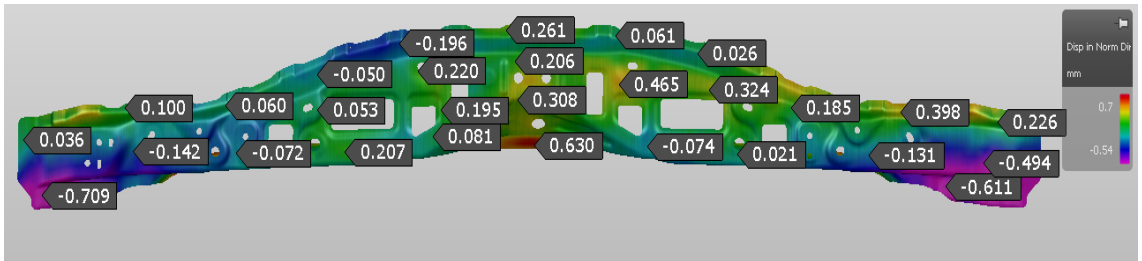
Şekil 5.63 Arka Araç Gövde Parçası_2 için Elastiste Modülü 206000 Mpa ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi



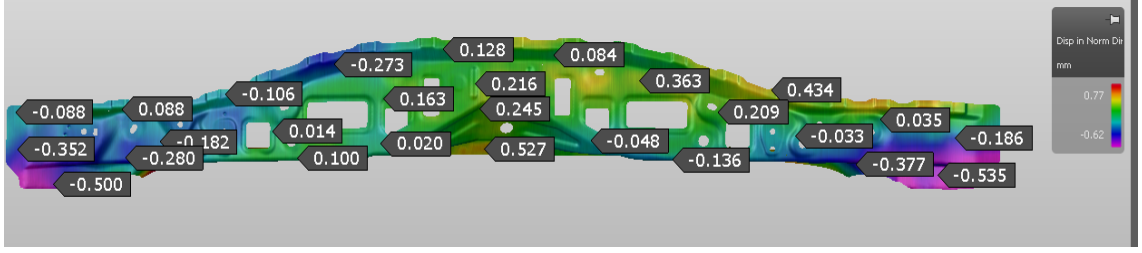
Şekil 5.64 Arka Araç Gövde Parçası_2 için Elastiste Modülü 210000 Mpa ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi



Şekil 5.65 Arka Araç Gövde Parçası_2 için Elastiste Modülü 215000 Mpa ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi



Şekil 5.66 Arka Araç Gövde Parçası_2 için Elastiste Modülü 220000 Mpa ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi



Şekil 5.67 Arka Araç Gövde Parçası_2 için Elastisite Modülü 225000 Mpa ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi

Tablo 5.12 Arka Araç Gövde Parçası_2 için Elastisite Modülünün Geri Yaylanma Sonuçlarına Etkisi

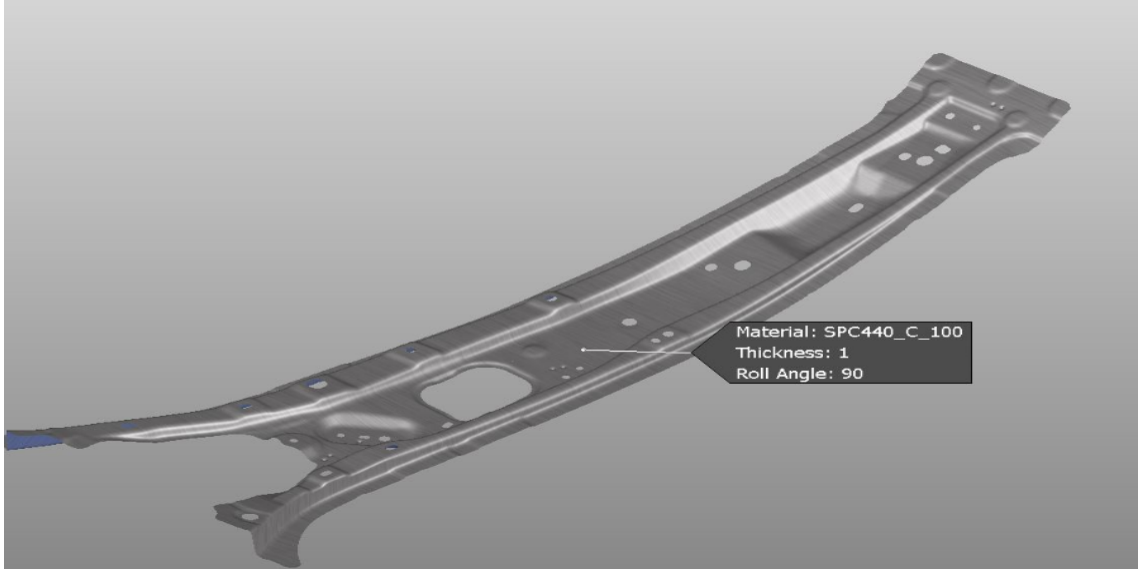
	Elastisite Modülü				
	206000	210000	215000	220000	225000
Sonlu elemanlar simülasyonu sonuçları (mm)	0,11	0,09	0,09	0,1	1,7

5.5.5 Tartışma

Malzeme kalınlığı ve elastisite modülünün geri yaylanma davranışları incelendiğinde malzeme kalınlığı arttıkça geri yaylanma miktarının arttığı gözlemlenmiştir. Elastisite modülünün geri yaylanmaya etkisi için 5 farklı elastisite modülünde değerleri ile sonlu elemanlar simülasyonu yapılmıştır. Elastisite modülü arttıkça sırasıyla geri yaylanma miktarının önce azaldığı daha sonra sabit kaldığı gözlemlenmiştir. 220000 MPa ve 225000 MPa değerinde geri yaylanma miktarı artmıştır. Elastisite modülünün arttıkça geri yaylanma miktarını artırıp ya da azalttığı ile ilgili kesin bilgi verilememektedir.

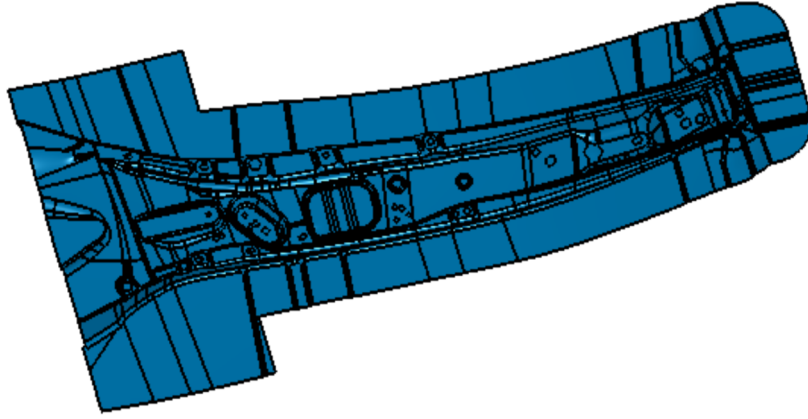
5.6 Orta Direk Parçası

Orta Direk Parçası, 1 mm malzeme kalınlığına ve 440 MPa çekme dayanımına sahiptir.

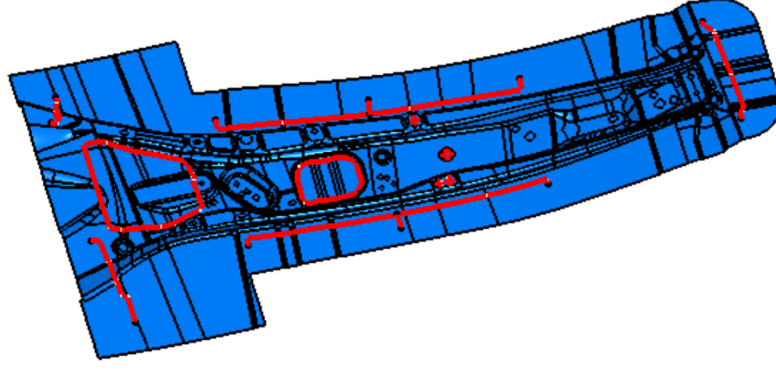


Şekil 5.68 Orta Direk Parçası

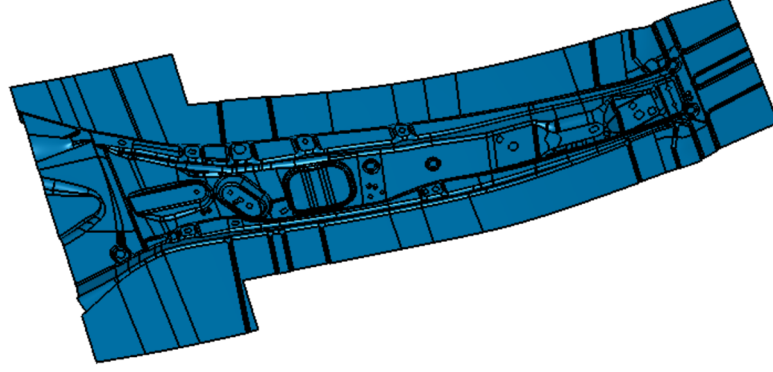
Parçanın formu form prosesi ile oluşturulmuştur. Form prosesi, sabit alt ve üst kalıp yüzeyinden oluşmaktadır. Orta Direk parçası form prosesi ile oluşturulduktan sonra delik delme ve kesme prosesleri ile etrafı kesilmiş daha sonra bükme prosesiyle bükme gerçekleştirilmiştir. En son proseste ise kesme-delme ve camlı kesme yapılmıştır. Toplam 4 prosesten oluşmaktadır.



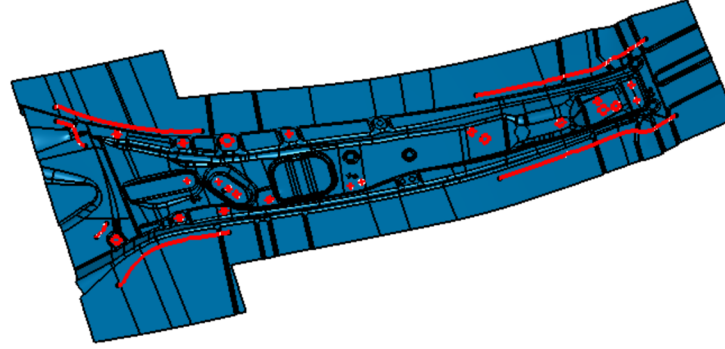
Şekil 5.69 Orta Direk Parçası için Oluşturulan Form Prosesi Yüzeyi



Şekil 5.70 Orta Direk Parçası için Oluşturulan Kesme ve Delme Hatları

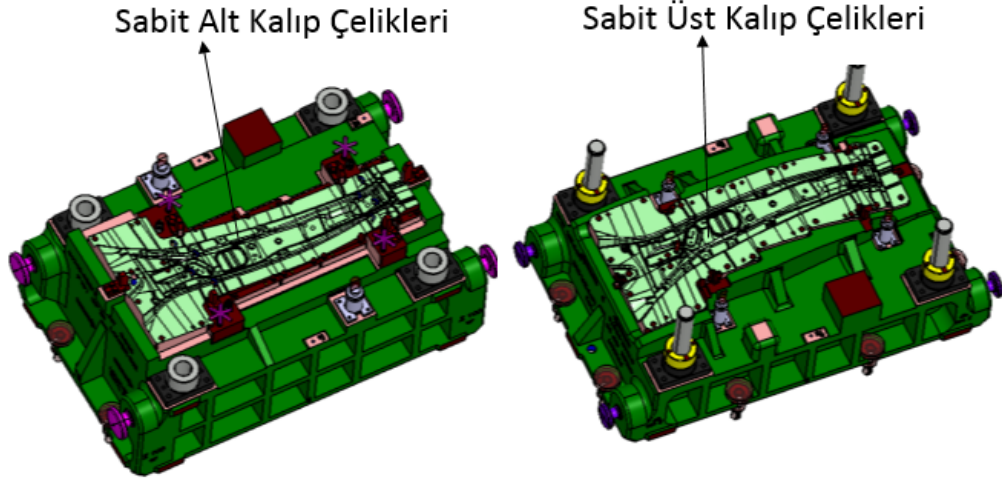


Şekil 5.71 Orta Direk Parçası için Oluşturulan Büküm Yüzeyi



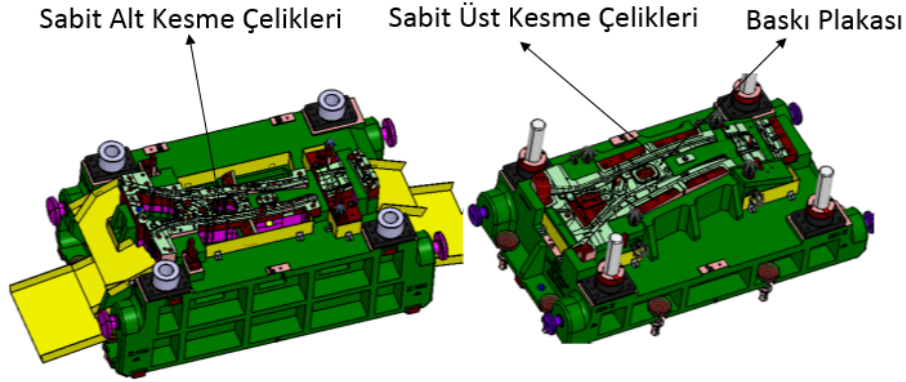
Şekil 5.72 Orta Direk Parçası için Oluşturulan Delme-Kamlı Delme-Kamlı Kesme Hataları

Bu parça, 4 farklı kalıp yapılarak üretilmiştir. Kalıplar, sırasıyla form prosesi, kesme-delme prosesi, bükme prosesi, delme-kamlı delme-kamlı kesme proseslerinden oluşmaktadır. Parçanın formu form prosesi ile oluşturulmuştur. Form prosesi, sabit alt ve üst kalıp yüzeyinden oluşmaktadır. Dişi kalıp, hareketli elemandır ve üst kısma yerleştirilmiştir.



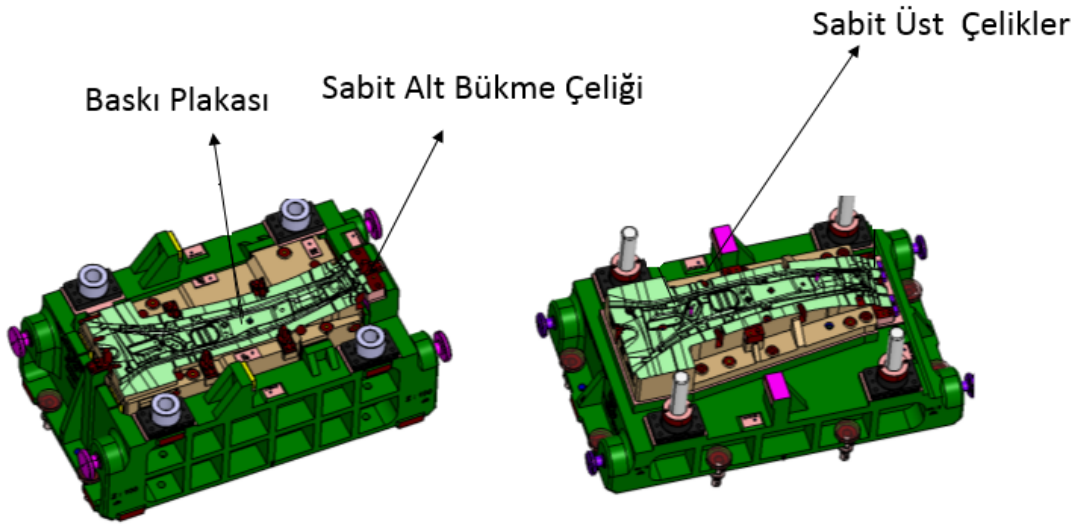
Şekil 5.73 Orta Direk Parçası için Form Prosesi Alt ve Üst Kalıp

Bu parçanın diğer proseslerinde kesme ve delme yapılmış parçanın etrafında yer alan malzeme fazlalığı kesilmiştir. Kesme ve delme kalıbında ise parçayı tutma görevi gören baskı plakası, alt ve üst kesme çelikleri yer almaktadır. Baskı plakası gücünü yaylardan almaktadır. Üst kalıp hareketli elemandır. Kalıbı merkezleyen kolonlar kalıbın aynı ekseninde çalışmasını sağlamaktadır.

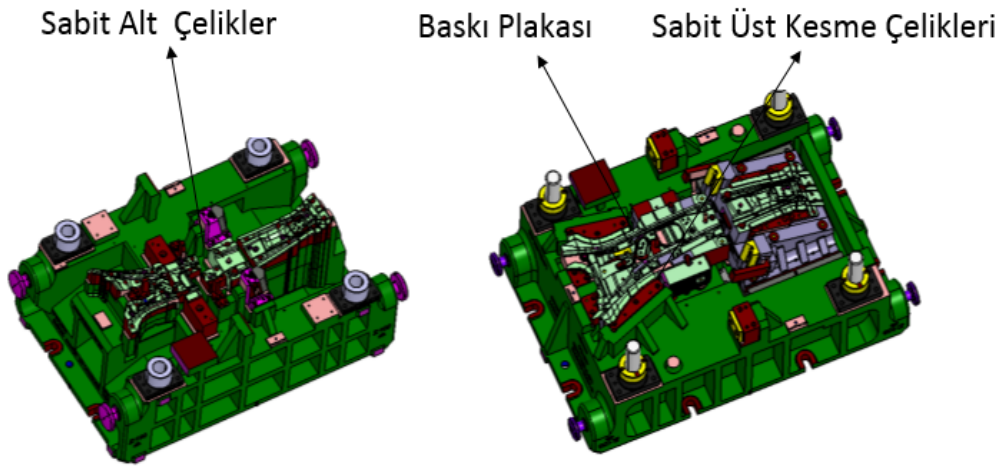


Şekil 5.74 Orta Direk Parçası için Delme-Kesme Prosesi Alt ve Üst Kalıp

Kalıbın diğer prosesinde ise parçanın uç kısımlarını bükme amacıyla bükme kalıbı tasarlanmıştır. Bükme kalıbı, sabit alt çelikler, baskı plakası ve bükme çeliklerinden oluşmaktadır.



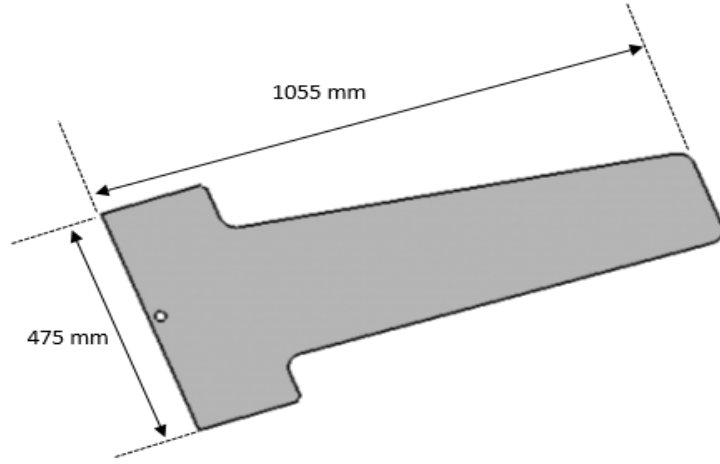
Şekil 5.75 Orta Direk Parçası için Bükme Prosesi Alt ve Üst Kalıp



Şekil 5.76 Orta Direk Parçası için Delme-Kamlı Delme ve Kamlı Kesme Prosesi Alt ve Üst Kalıp

Yapılan deneylerde SPC440_C_100 çelik malzeme kullanılmıştır. Sac 1055 mm genişliğinde ve 475 mm uzunluğundadır. Form prosesinde baskı plakası yer almamaktadır. Delme-kesme prosesi baskı plakası kurs boyu olarak 20 mm, bükme prosesi baskı plakası kurs boyu 20 mm delme-kamlı delme-kamlı kesme prosesi kurs boyu 25 mm seçilmiştir. Tüm saclar haddeleme doğrultusu yönünde şekillendirilmiştir. Haddeleme yönü sacın üreticisi tarafından belirtilmiştir. Böylece, şekillendirilen tüm parçaların anizotropi yönleri birbirleriyle uyumlu hale getirilmiştir.

Deneylerde kullanılan SPC440_C_100 çelik malzemenin boyut ve özellikleri aşağıdaki görsellerde verilmiştir. Malzeme özellikleri Autoform malzeme programından elde edilmiştir.



Şekil 5.77 Orta Direk Parçası için Sac Malzemenin Boyutları

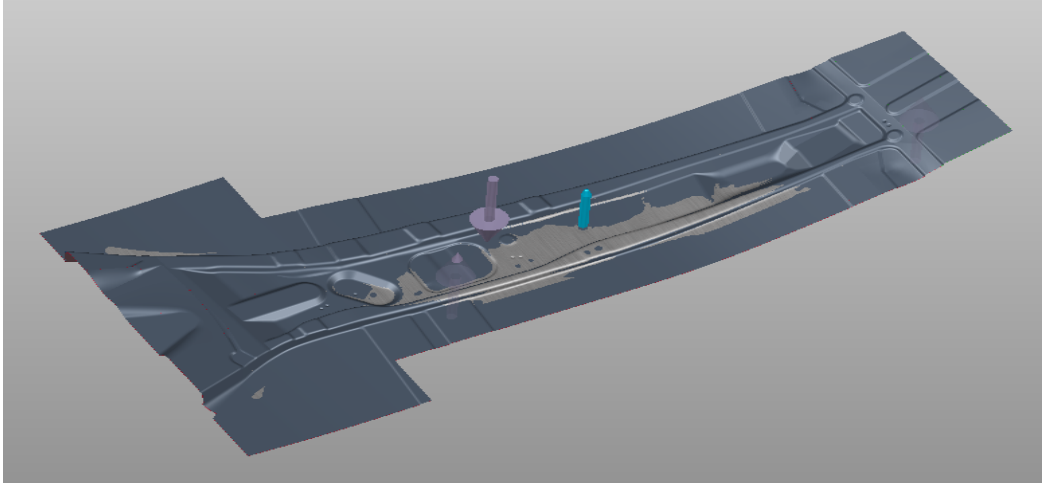
Tablo 5.13 SPC440_C_100 Sac Malzemenin Özellikleri

g/cm ³	E(Mpa)	v	G0(Mpa)	R _m (Mpa)
7,8	206000	0,3	330	465,2

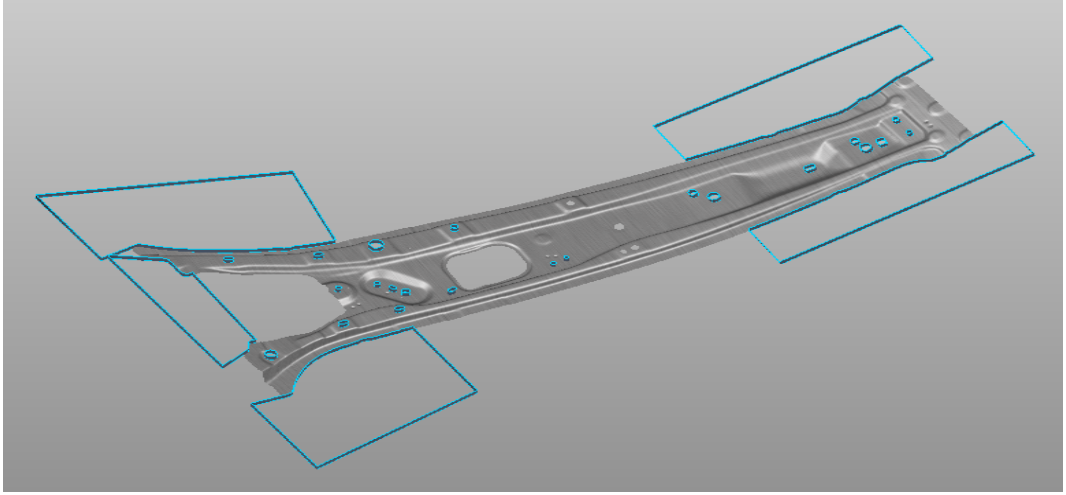
5.6.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Deneyler ile Doğrulama

Analiz iki farklı formülasyon kullanılarak, birbirini takip eden iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşama açık formülasyon kullanılarak şekil verme işlemi, ikinci aşama ise kapalı formülasyon kullanılarak geri yaylanmanın belirlenmesidir.

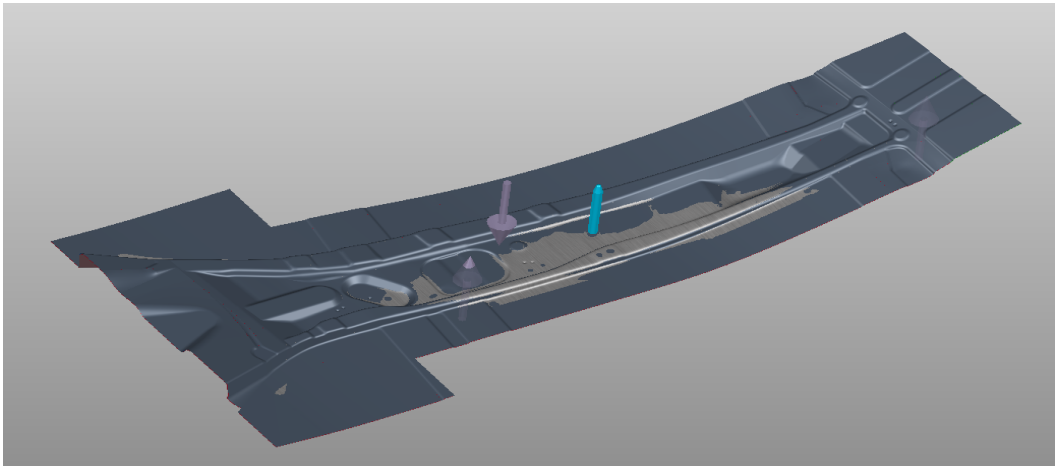
Parça Cad datası yardımıyla Catia V5 programında form prosesi için sabit alt ve üst kalıp yüzeyleri oluşturulmuştur. Oluşturulan yüzeyler Autoform programında import edilerek simülasyon yapılmıştır. Simülasyon çalışması yapılırken sürtünme katsayısı Toyotetsu tarafından 0,15 mm belirlenmiştir.



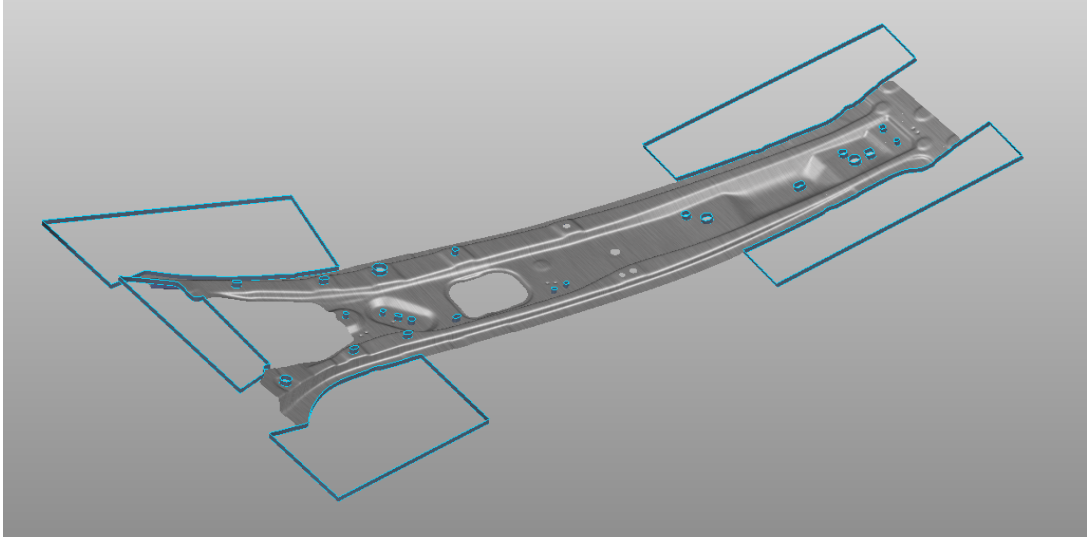
Şekil 5.78 Orta Direk Parçası için Form Prosesi Simülasyonu



Şekil 5.79 Orta Direk Parçası için Kesme ve Delme Prosesi Simülasyonu

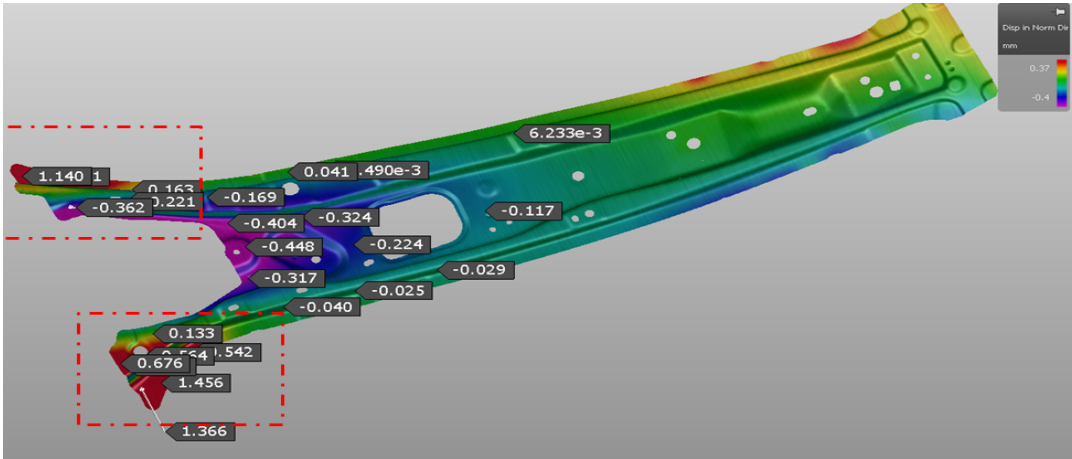


Şekil 5.80 Orta Direk Parçası için Bükme Prosesi Simülasyonu

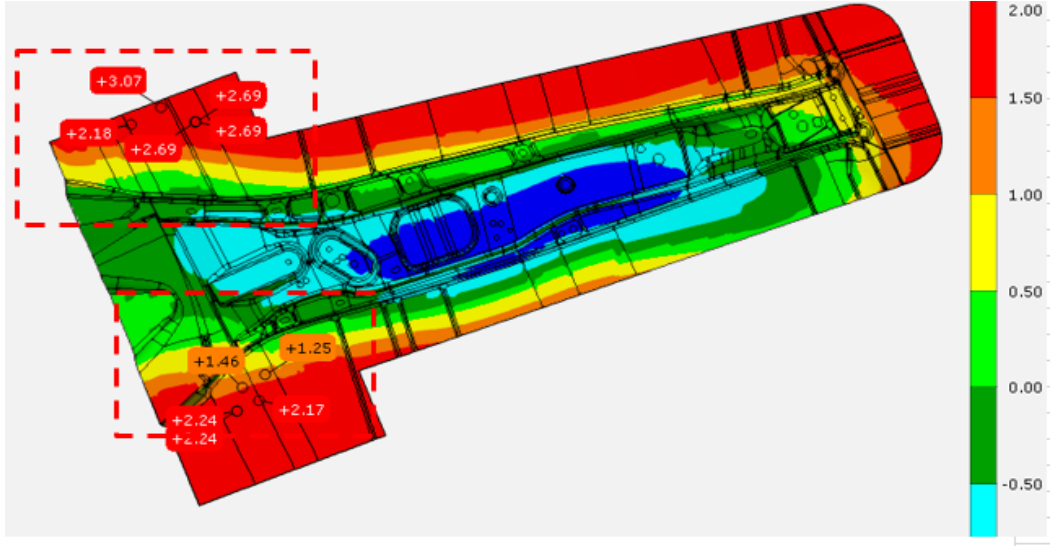


Şekil 5.81 Orta Direk Parçası için Kamlı Kesme, Delme ve Kamlı Delme Prosesi simülasyonu

Bu parçada sonlu elemanlar modeli oluşturulurken form prosesinde oldukça fazla geri yaylanma gözlemlenmiştir. Elde edilen geri yaylanma yüzeyi Autoform programında export edilmiştir. Elde edilen geri yaylanma yüzeyleri yer değiştirme yöntemi uygulanarak CatiaV5 programında değiştirilmiştir. Elde edilen geri yaylanma telafi yüzeyi ile tekrar sonlu elemanlar simülasyonu yapılmıştır. Sonlu elemanlar simülasyonunda parçanın form prosesinde meydana gelen geri yaylanması azaltılmıştır. Parçadan elde edilen geri yaylanma yüzeyleri $\pm 0,5$ tolerans seviyesine çekilmiştir.

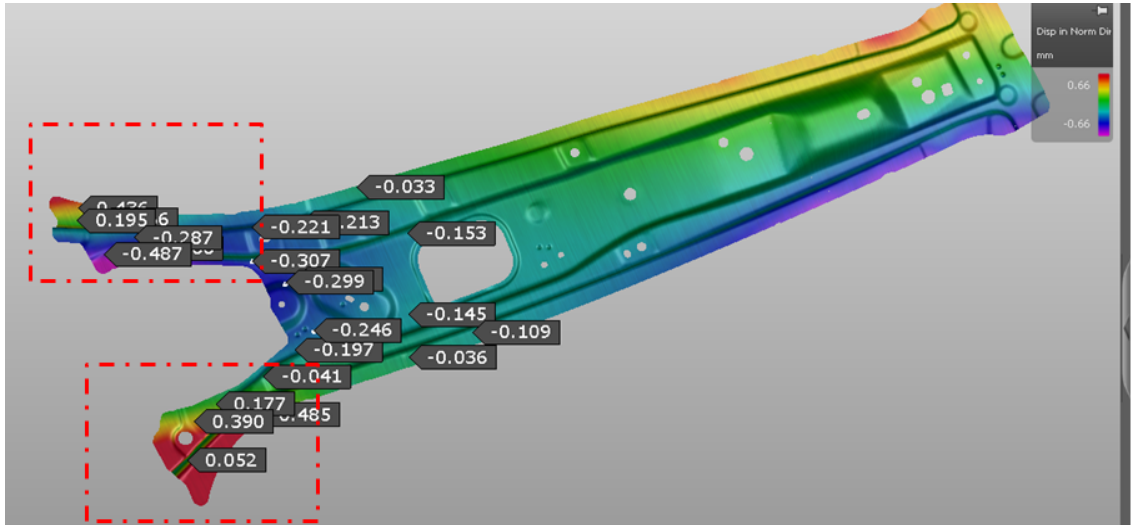


Şekil 5.82 Orta Direk Parçası için Parçada Tolerans Dışında Kalan Bölgelerin Geri Yaylanma Yüzeyleri

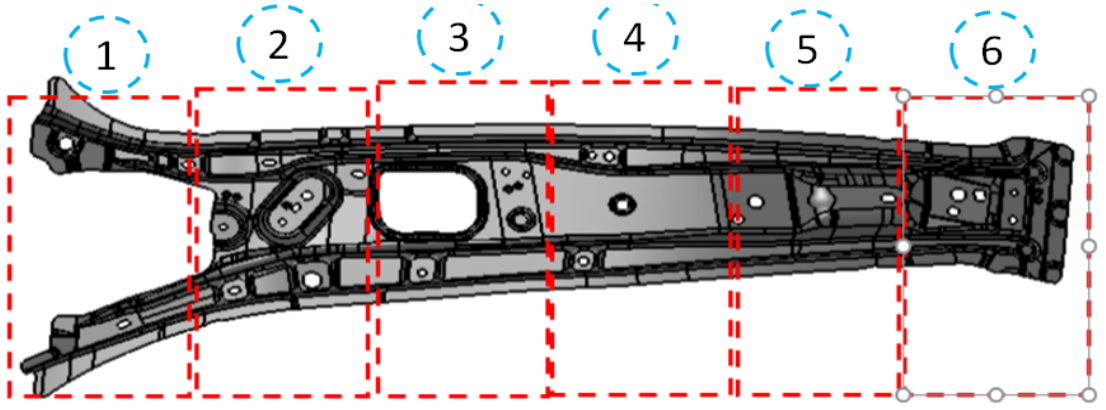


Şekil 5.83 Orta Direk Parçası için Geri Yaylanma Telafi Yüzeyi ile Referans Yüzeyin Gom Inspect Programında Karşılaştırılması

Sonlu elemanlar programında oluşturulan geri yaylanan yüzeyler referans yüzeyde yapılan yer değiştirme yöntemi ile telafi yüzeyi oluşturulmuştur.



Şekil 5.84 Orta Direk Parçası için Yer Değiştirme Yöntemi Uygulandıktan Sonra Geri Yaylanma Yüzeyleri



Şekil 5.85 Orta Direk Parçası için Sonlu Elemanlar Analizi için Yapılan Ölçüm Bölgeleri

Parça için 6 farklı bölgeden ayrı ayrı 200 noktadan ölçümler alınmıştır. Toplam 1200 noktadan ölçüm yapılmıştır. Parça geri yaylanma toleransımız $\pm 0,5$ mm'dir.

Tablo 5.14 Orta Direk Parçası için Sonlu Elemanlar Simülasyon Sonuçlarının Ortalamasını mm Cinsinden İfade Eden Temsili Yüzeye Ait Geri Yaylanma Sonuçları

	1.Bölge	2.Bölge	3.Bölge	4.Bölge	5.Bölge	6.Bölge	Ortalama simülasyon sonuçları
Telafi yüzeyi uygulanmadan önce yapılan sonlu elemanlar simülasyonu geri yaylanma sonucu	0,9	0,2	0,1	0,8	0,12	0,15	0,25
Telafi yüzeyi uygulandıktan sonra yapılan sonlu elemanlar simülasyonu geri yaylanma sonucu	0,46	0,18	0,09	0,068	0,11	0,146	0,175

5.6.2 Sonlu Elemanlar Simülasyon Çalışması Değerlendirilmesi ve Deneysel Karşılaştırma

Elde edilen sonlu elemanlar simülasyon sonuçlarına göre form prosesinde meydana gelen geri yaylanma yüzeyi geri yaylanma telafi algoritması uygulanarak değiştirilmiştir. Telafi yüzeyi tekrardan sonlu elemanlar simülasyonu yapılmıştır.

Geri yaylanma miktarı 1.bölgede azaltılarak uygun yüzey elde edilmiştir. Elde edilen yüzeyin kalıp yüzeyi olarak kullanılmasına karar verilmiştir.



Şekil 5.86 Orta Direk Parçası için Reel Ortamda Üretimi Yapılan Parçanın Cad Data ile Karşılaştırılması

Autoform programında yapılan simülasyon sonuçları ile parçanın proses süreçlerinin doğruluğu kanıtlanmıştır. Elde edilen proses yüzeylerinin reel ortamda ortaya çıkan nihai ürünle karşılaştırılması tarama programı olan Gom Inspect programında karşılaştırılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen geri yaylanmış yüzeyler, deney tarama yüzeyi ile Gom Inspect’de üst üste karşılaştırılmış ve yüzeyler arasındaki mesafe mm cinsinden ölçülmüştür. Bu yöntemde, aralarındaki normal mesafe en küçük olan her bir düğüm noktası arasındaki mesafenin dik koordinat sistemindeki üç bileşeni ölçülmüş ve bu değerler kullanılarak normal mesafe hesaplanmıştır. Sac yüzeyi boyunca toplam 1200 ölçüm alınmıştır.

Tablo 5.15 Orta Direk Parçası için Geri Yaylanma Sonlu Elemanlar Simülasyon Sonuçlarının Reel Ortamda Üretimi Yapılan Parça ile Karşılaştırılması

	Sonlu elemanlar simülasyonu geri yaylanma ortalaması	Reel ortamda üretimi yapılan parçanın geri yaylanma ortalaması
Sonuçlar	0,175	0,22

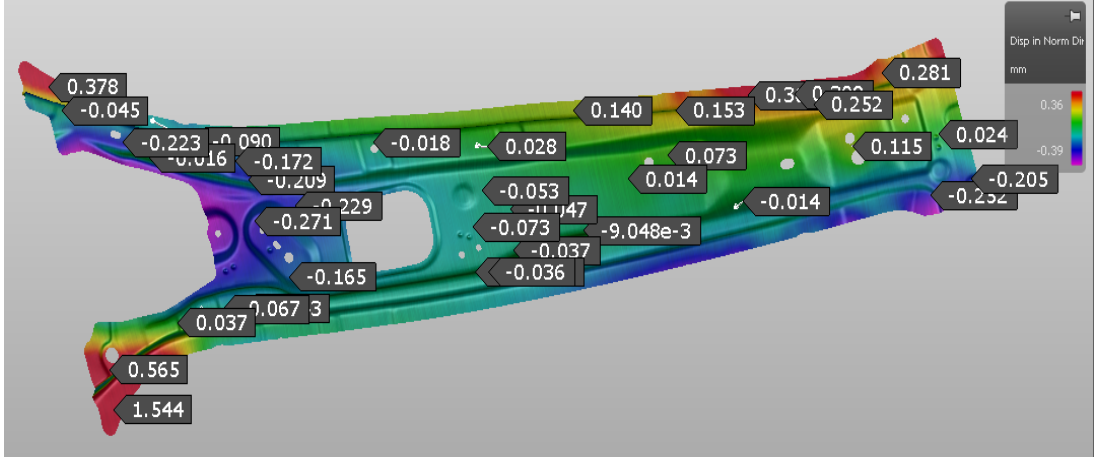
Karekök ortalama hata kare (KOHK) yönteminden faydalananarak, SPC440_C_100 malzeme modelleri kullanılarak gerçekleştirilen sonlu elemanlar analiz sonuçlarının deneysel sonuca ne kadar yaklaştığı belirlenmiştir. KOHK yöntemi denklem 5.3’de verilmiştir. Bu denklemde n toplam ölçüm sayısını, x_i deney sonucunu, y_i ise benzetim sonucunu ifade etmektedir. KOHK yöntemi ile sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilmiş geri yaylanma yüzeyinin, deneysel olarak elde edilmiş yüzeye ne kadar yakın olduğu belirlenmiştir. KOHK değerinin sıfıra yaklaşması, sonlu elemanlar analizi tahminlerinin tutarlılığının yüksek olduğuna işaret etmektedir.

$$KOHK = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i^n (x_i - y_i)^2} = 0,075 \quad (5.3)$$

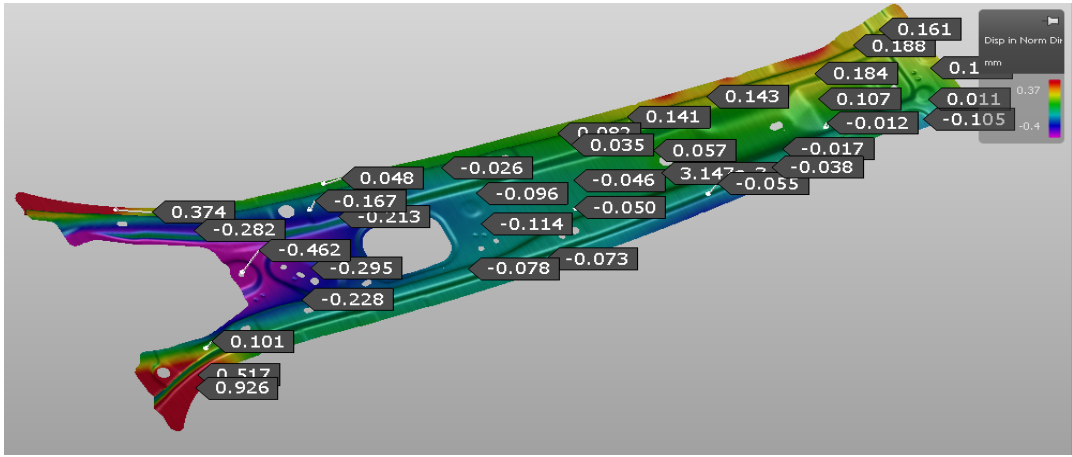
1200 noktadan alınan ölçüm sonuçlarına göre deney sonuçları ile Autoform programında yapılan simülasyon sonuçları arasındaki fark 0,045mm’dir. Malzeme geri yaylanma toleransının + -0,5 mm tolerans aralığı düşünüldüğünde elde edilen sonuçlar geri yaylanma sonuçlarına yaklaşmıştır. Elde edilen simülasyon sonuçları ile reel ortamda gerçekleştirilen çıktılar birbirleri ile örtüşmektedir.

5.6.3 Malzeme Kalınlığının Geri Yaylanma Davranışı Üzerindeki Etkisi

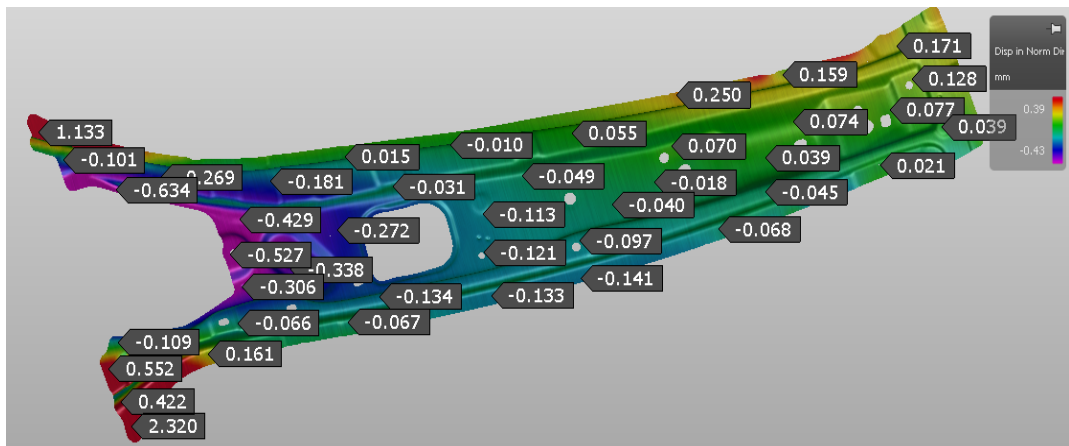
Parametrik analizlerde, farklı kalınlıklardaki SPC440_C_100 sac metaller için benzetim çalışmaları yapılmıştır. Autoform programında elde edilen simülasyon sonuçlarına göre geri yaylanma davranışları incelenmiştir. Autoform programında malzeme kalınlığı 0,6 – 1 - 1,4 - 1,8 ve 2,2 olacak şekilde malzeme kalınlıkları değiştirilmiştir. Yapılan çalışma için malzemenin diğer özellikleri sabit tutulmuştur. Elde edilen simülasyon sonuç görselleri aşağıda gösterilmiştir.



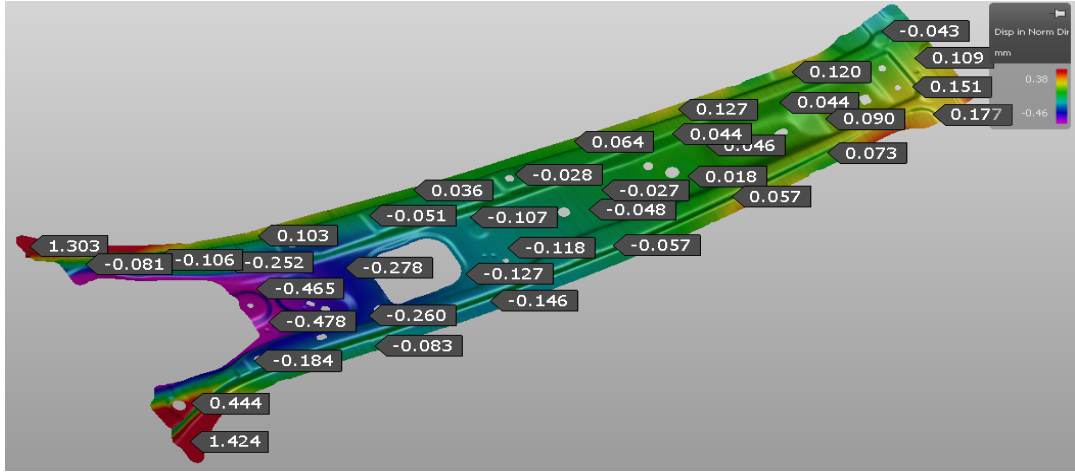
Şekil 5.87 Orta Direk Parçası için Malzeme Kalınlığı 0,6 mm ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi



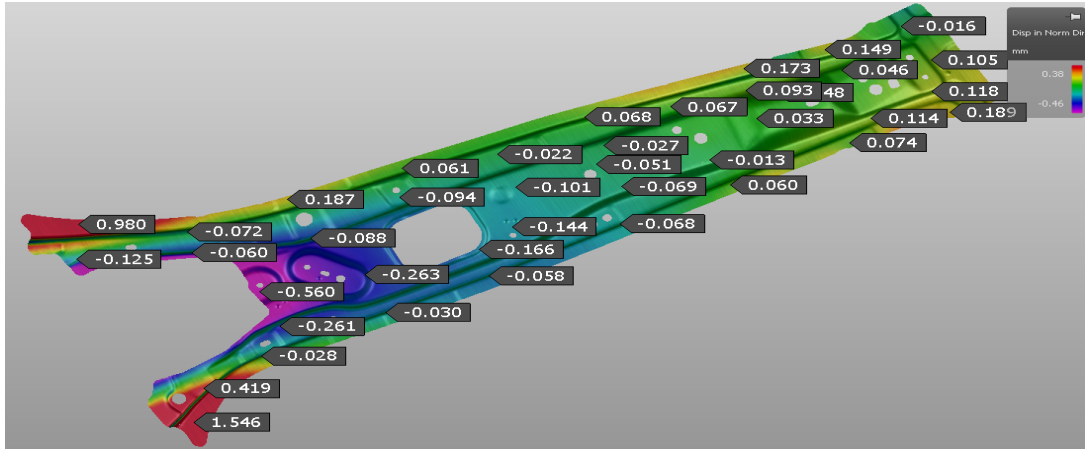
Şekil 5.88 Orta Direk Parçası için Malzeme Kalınlığı 1 mm ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi



Şekil 5.89 Orta Direk Parçası için Malzeme Kalınlığı 1,4 mm ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi



Şekil 5.90 Orta Direk Parçası için Malzeme Kalınlığı 1,8 mm ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi



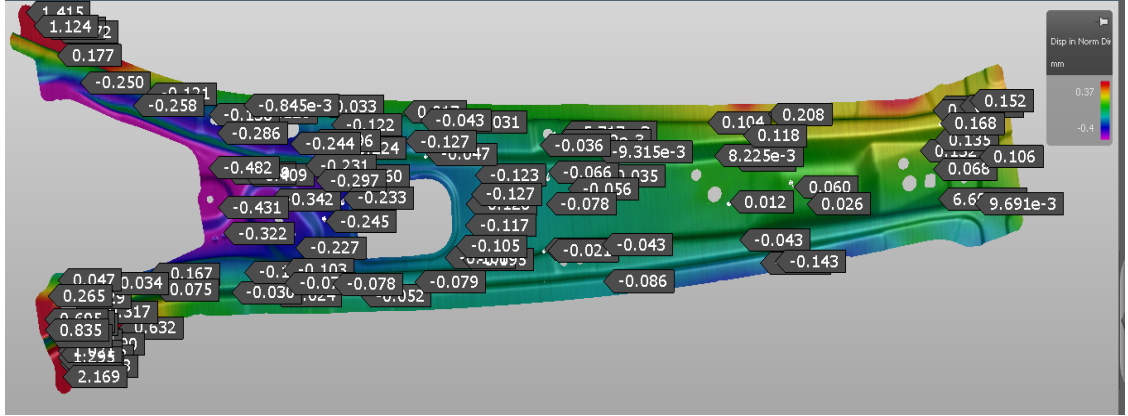
Şekil 5.91 Orta Direk Parçası için Malzeme Kalınlığı 2,2 mm ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi

Tablo 5.16 Arka Araç Gövde Parçası_2 için Malzeme Kalınlığının Geri Yaylanma Sonuçlarına Etkisi

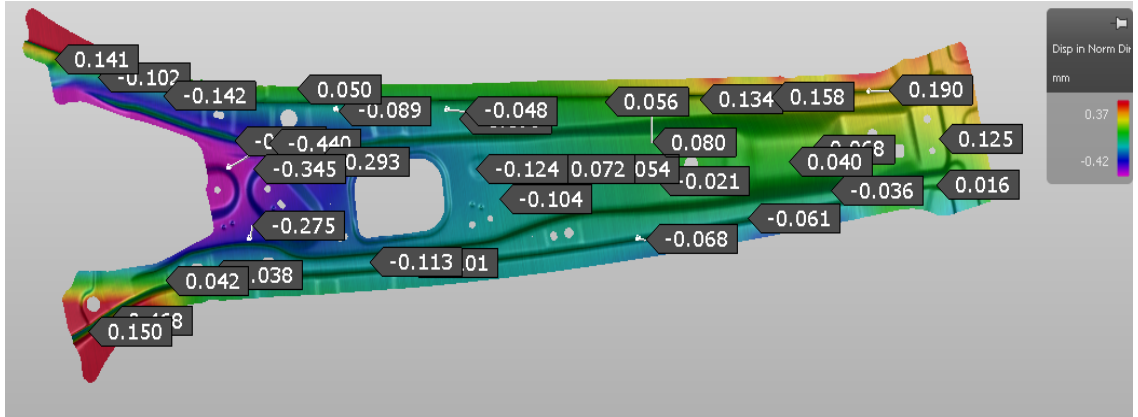
	Malzeme Kalınlığı (mm)				
	t: 0,6	t: 1	t: 1,4	t: 1,8	t: 2,2
Sonlu elemanlar simülasyonu geri yaylanma sonuçları	0,146	0,15	0,16	0,154	0,151

5.6.4 Elastisite Modülünün Geri Yaylanma Davranışı Üzerindeki Etkisi

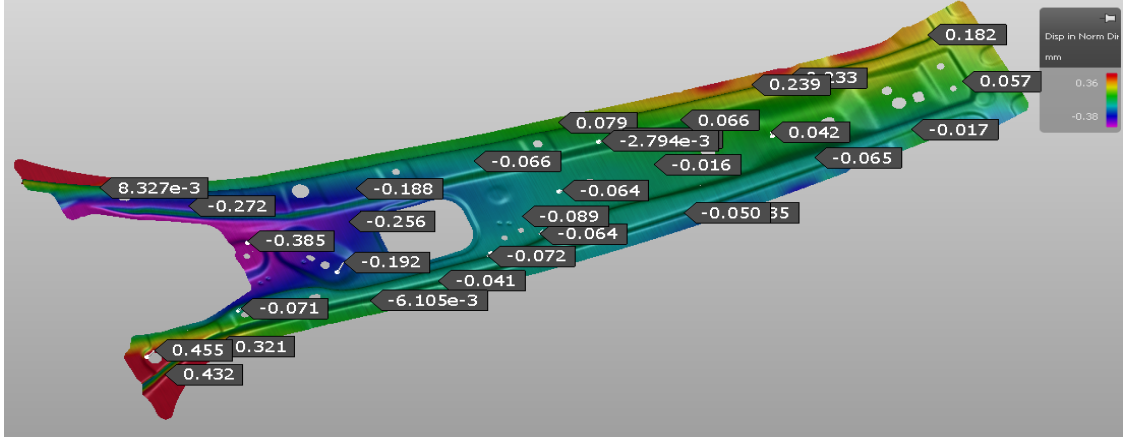
Autoform programında yapılan geri yaylanma simülasyon sonuçlarına göre elastisite modülünün geri yaylanma davranışı üzerine etkileri incelenmiştir. Malzemenin diğer özellikleri sabit tutularak çeşitli elastisite modüllerine göre geri yaylanma davranışları grafiklerde gösterilmiştir.



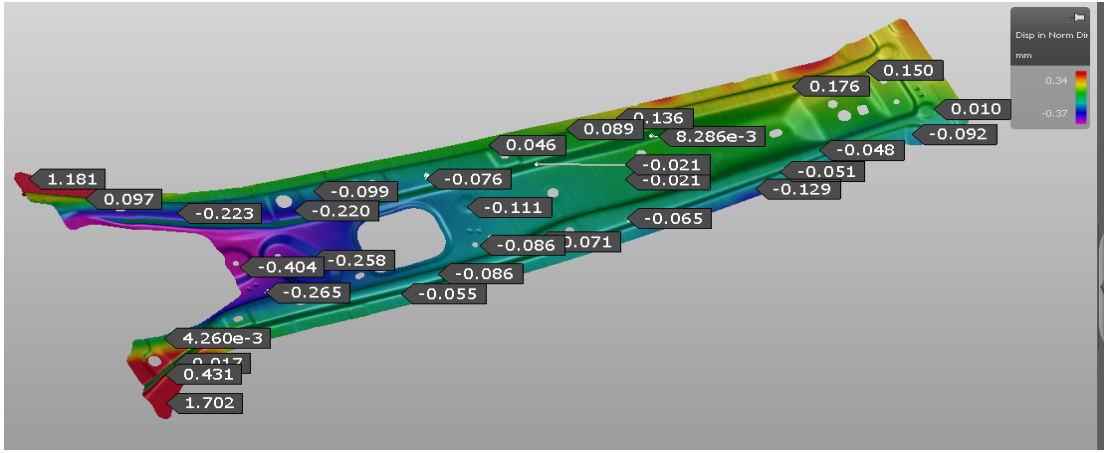
Şekil 5.92 Orta Direk Parçası için Elastisite Modülü 206000 Mpa ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi



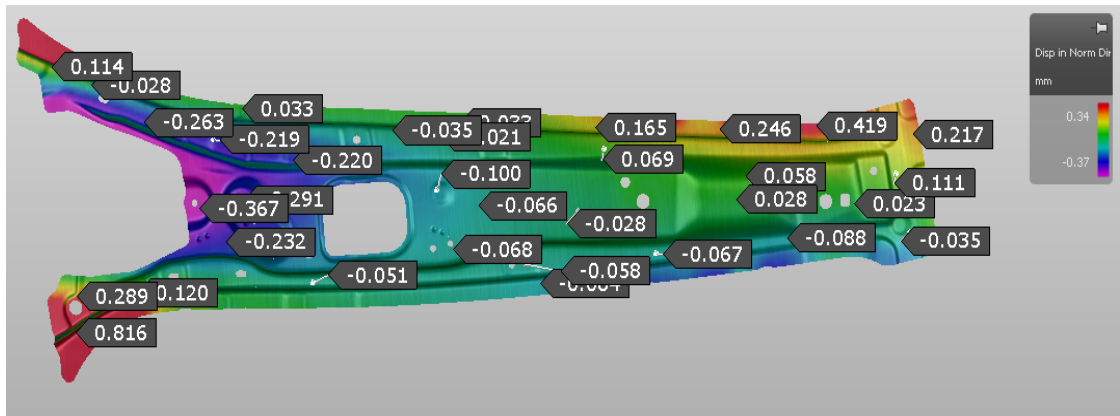
Şekil 5.93 Orta Direk Parçası için Elastisite Modülü 210000 Mpa ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi



Şekil 5.94 Orta Direk Parçası için Elastiste Modülü 215000 Mpa ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi



Şekil 5.95 Orta Direk Parçası için Elastiste Modülü 220000 Mpa ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi



Şekil 5.96 Orta Direk Parçası için Elastiste Modülü 225000 Mpa ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi

Tablo 5.17 Orta Direk Parçası için Elastisite Modülünün Geri Yaylanma Sonuçlarına Etkisi

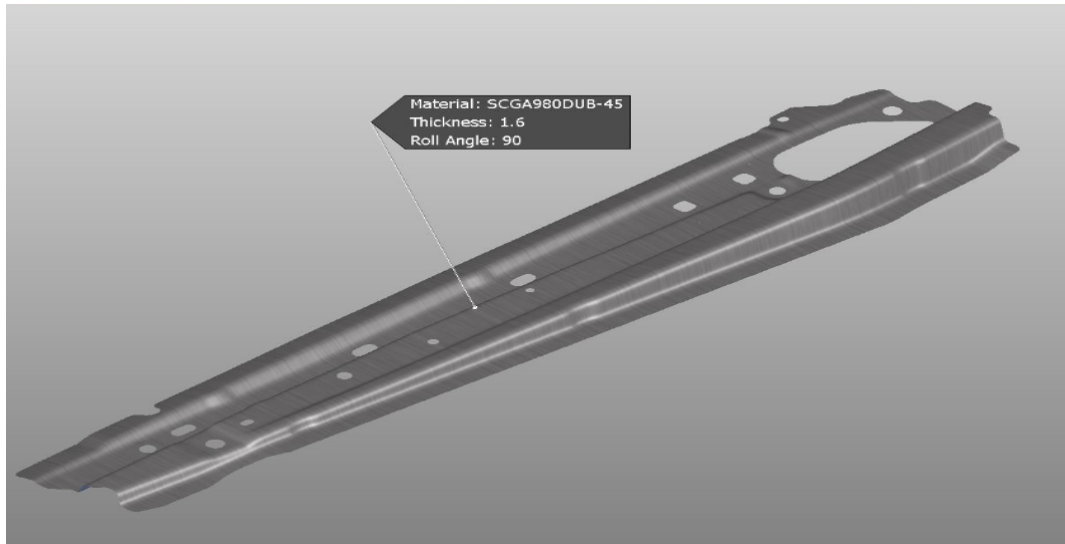
	Elastisite Modülü (Mpa)				
	206000	210000	215000	220000	225000
Sonlu elemanlar simülasyonu geri yaylanma sonuçları(mm)	0,15	0,145	0,13	0,12	0,1

5.6.5 Tartışma

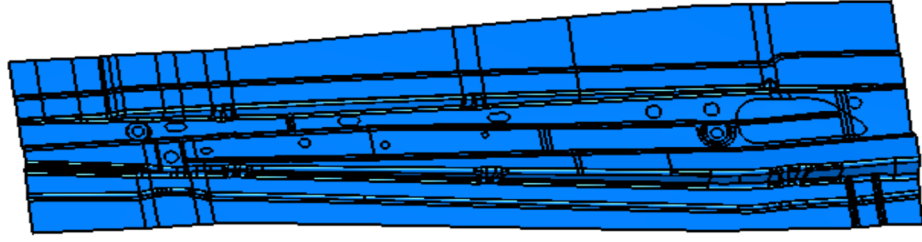
Malzeme kalınlığı ve elastisite modülünün geri yaylanma davranışları incelendiğinde malzeme kalınlığı artışının öncelikle geri yaylanma miktarını arttırdığı daha sonra malzeme kalınlığının 1,8 mm olduğunda geri yaylanma miktarının azaldığı gözlemlenmiştir. Elastisite modülü arttığında geri yaylanma miktarında artış görülmektedir.

5.7 Kapı Kolu Parçası

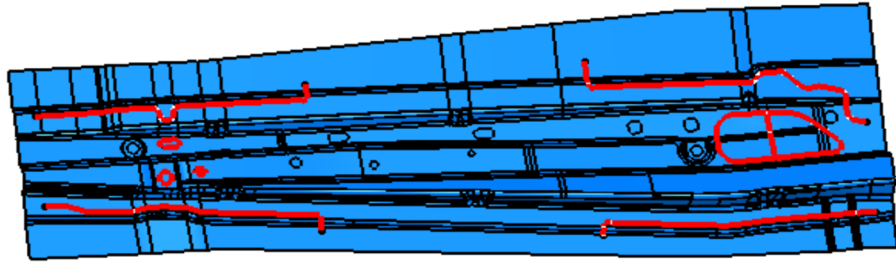
Kapı Kolu Parçası, 1,6 mm malzeme kalınlığına ve 980 MPa çekme dayanımına sahip yüksek mukavemetli parçadır.



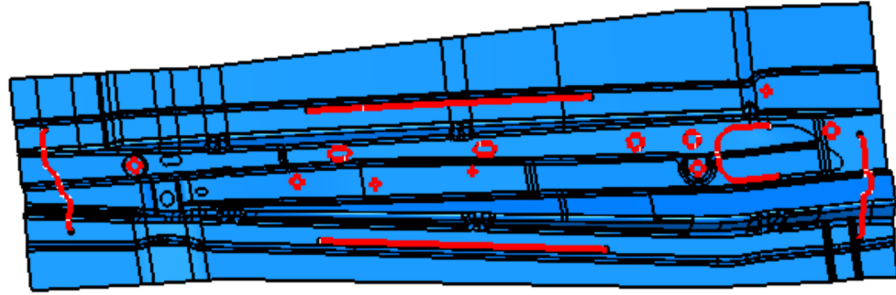
Şekil 5.97 Kapı Kolu Parçası



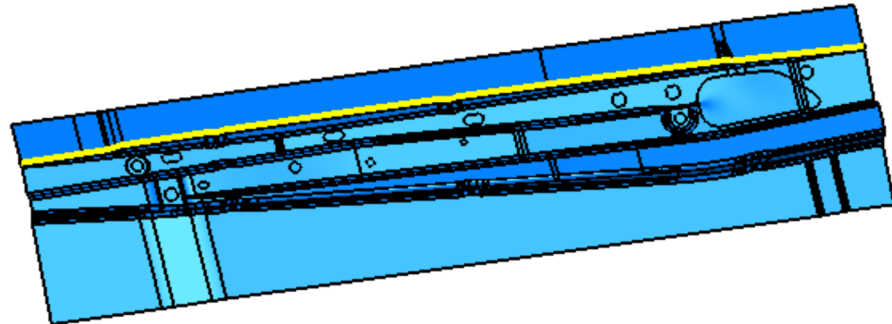
Şekil 5.98 Kapı Kolu Parçası Çekme Prosesi Yüzeyi



Şekil 5.99 Kapı Kolu Parçası için Oluşturulan Kesme ve Delme Hatları

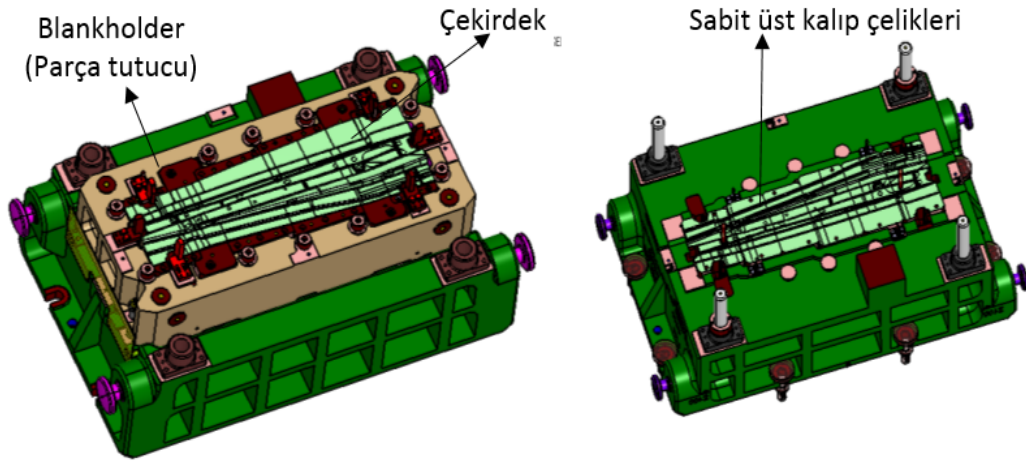


Şekil 5.100 Kapı Kolu Parçası için Kesme ve Delme Hatları



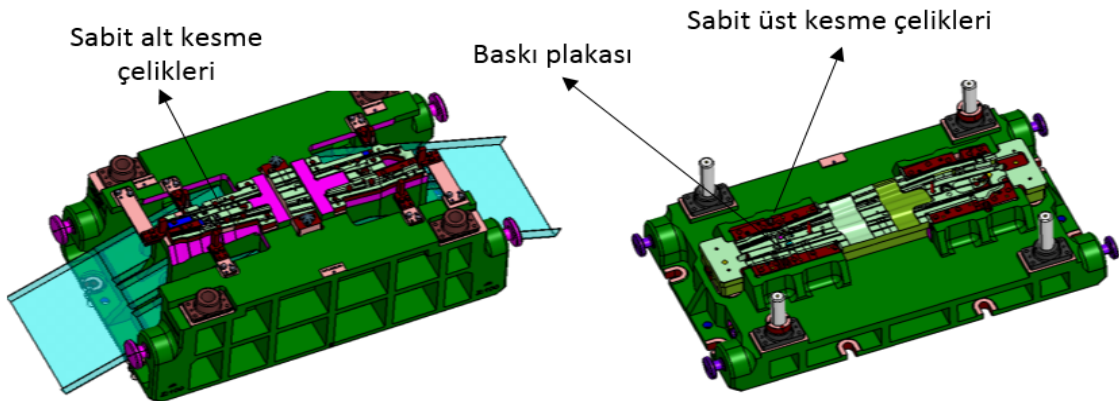
Şekil 5.101 Kapı Kolu Parçası için Bükme Hattı

Bu parça, 4 farklı kalıp yapılarak üretilmiştir. Kalıplar, sırasıyla çekme prosesi, 1. kesme-delme prosesi, 2. kesme-delme prosesi en son olarak bükme proseslerinden oluşmaktadır. Parçanın formu çekme prosesi ile oluşturulmuştur. Parçanın formu çekme prosesi ile oluşturulmuştur. Çekme prosesi, parçaya formunu veren çekirdek, parça tutucu (blankholder) ve sabit üst kalıp yüzeyinden oluşmaktadır. Dişi kalıp, hareketli elemandır ve üst kısma yerleştirilmiştir. Parça tutucu gücünü presin alt kısmına yerleştirilmiş pres tablasından almaktadır.

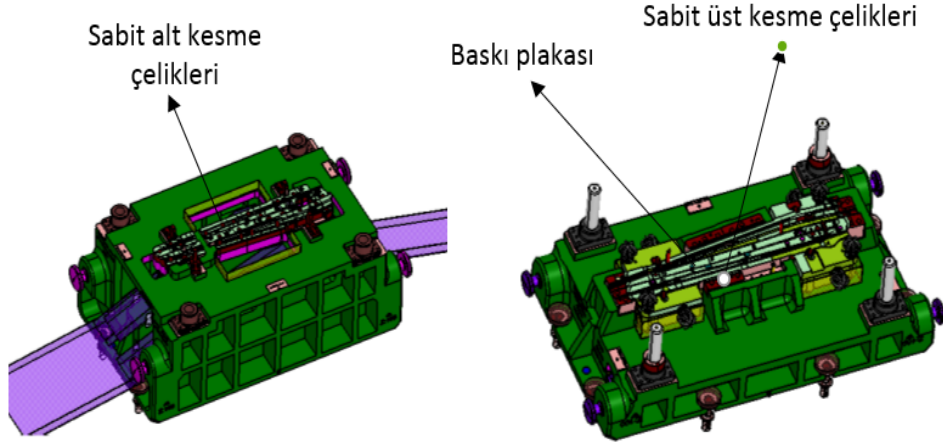


Şekil 5.102 Kapı Kolu Parçası için Çekme Prosesi Alt ve Üst Kalıp

Bu parçanın diğer proseslerinde kesme ve delme yapılmış parçanın etrafında yer alan malzeme fazlalığı kesilmiştir. Kesme ve delme kalıbında ise parçayı tutma görevi gören baskı plakası, alt ve üst kesme çelikleri yer almaktadır. Baskı plakası gücünü yaylardan almaktadır. Üst kalıp hareketli elemandır. Kalıbı merkezleyen kolonlar kalıbın aynı ekseninde çalışmasını sağlamaktadır.

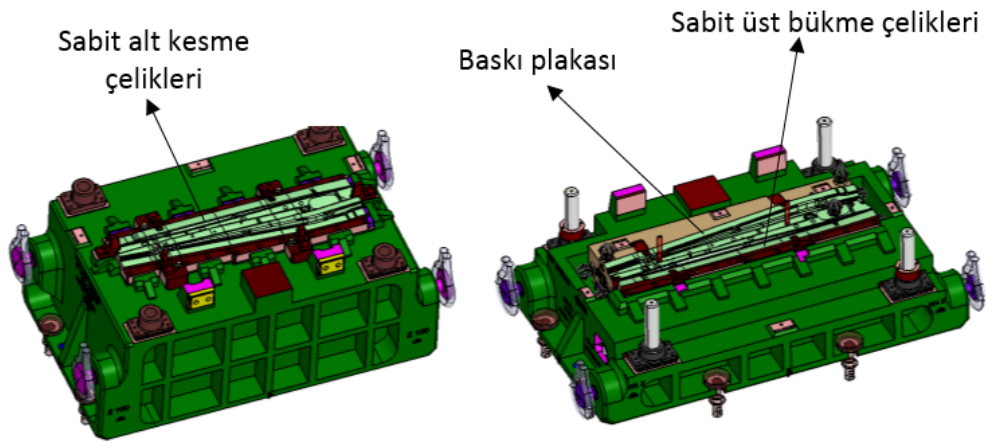


Şekil 5.103 Kapı Kolu Parçası 1. Kesme-Delme Prosesi Alt ve Üst Kalıp



Şekil 5.104 Kapı Kolu Parçası 2. Kesme-Delme Prosesi Alt ve Üst Kalıp

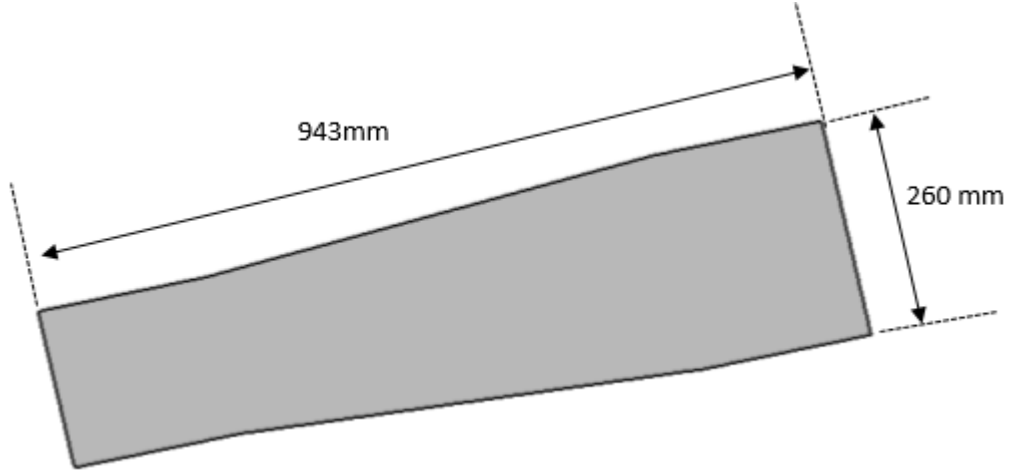
Kalıbın sonraki prosesinde ise parçanın etek kısımlarını bükme amacıyla bükme kalıbı tasarlanmıştır. Bükme kalıbı, sabit alt çelikler, baskı plakası ve bükme çeliklerinden oluşmaktadır.



Şekil 5.105 Kapı Kolu Parçası Bükme Prosesi Alt ve Üst Kalıp

Yapılan deneylerde SCGA980DUB-45 yüksek mukavemetli çelik malzeme kullanılmıştır. Sac 943 mm genişliğinde ve 260 mm uzunluğundadır. Çekme prosesi kurs boyu olarak 50 mm, 1. delme-kesme prosesi baskı plakası kurs boyu olarak 11 mm, 2. delme-kesme prosesi baskı plakası kurs boyu olarak 26 mm bükme prosesi kurs boyu 31 mm seçilmiştir. Tüm saclar haddeleme doğrultusu yönünde şekillendirilmiştir. Haddeleme yönü sacın üreticisi tarafından belirtilmiştir. Böylece, şekillendirilen tüm parçaların anizotropi yönleri birbirleriyle uyumlu hale getirilmiştir. Deneylerde kullanılan SCGA980DUB-45

elik malzemenin boyut ve özellikleri aşağıdaki görsellerde verilmiştir. Malzeme zellikleri Autoform malzeme programından elde edilmiştir.



şekil 5.106 Kapı Kolu Parçası Sac Malzeme Boyutları

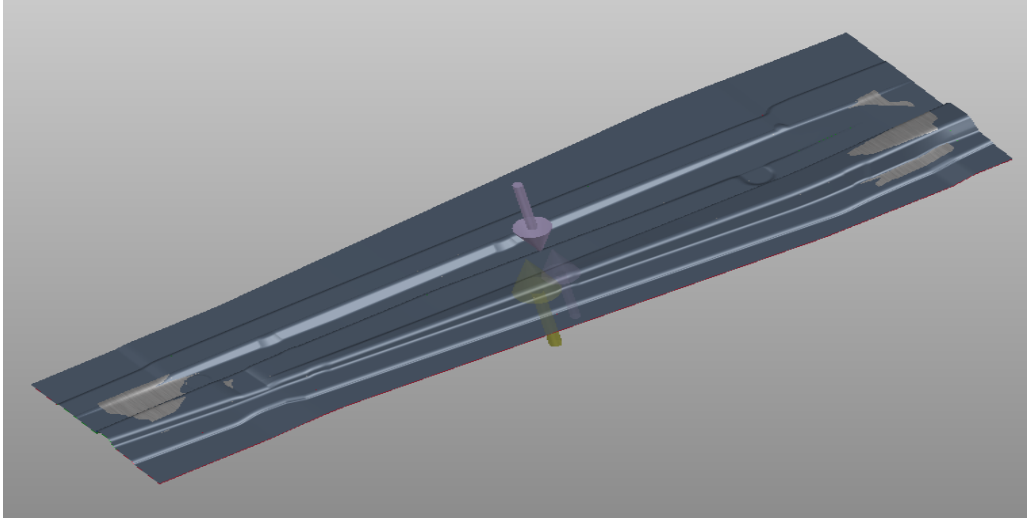
Tablo 5.18 SCGA980DUB-45 Sac Malzemenin zellikleri

g/cm3	E(Mpa)	v	G0(Mpa)	R _m (Mpa)
7,9	210000	0,3	666,8	1045

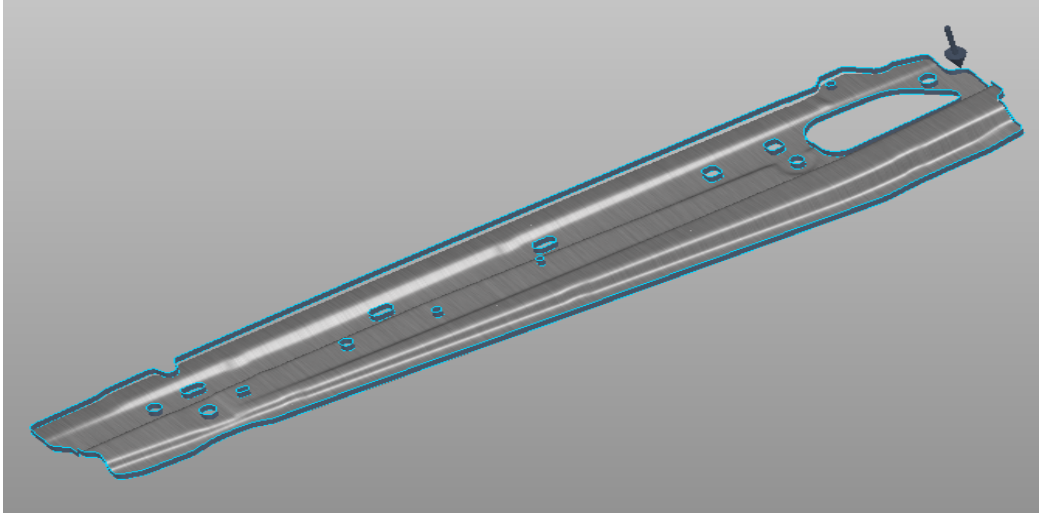
5.7.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Analiz iki farklı formülasyon kullanılarak, birbirini takip eden iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşama açık formülasyon kullanılarak şekil verme işlemi, ikinci aşama ise kapalı formülasyon kullanılarak geri yaylanmanın belirlenmesidir.

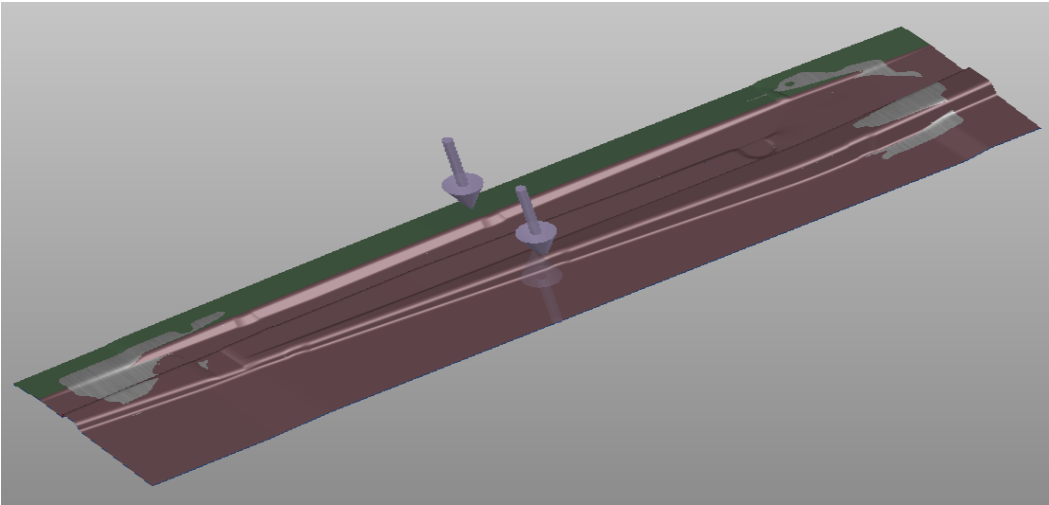
Parça Cad datası yardımıyla Catia V5 programında çekme prosesi için çekirdek, parça tutucu ve sabit st kalıp yüzeyleri oluşturulmuştur. Oluşturulan yüzeyler Autoform programında import edilerek simülasyon yapılmıştır. Simülasyon alışması yapılırken sürtünme katsayısı Toyotetsu tarafından 0,15 mm belirlenmiştir.



Şekil 5.107 Kapı Kolu Parçası Çekme Prosesi Simülasyonu

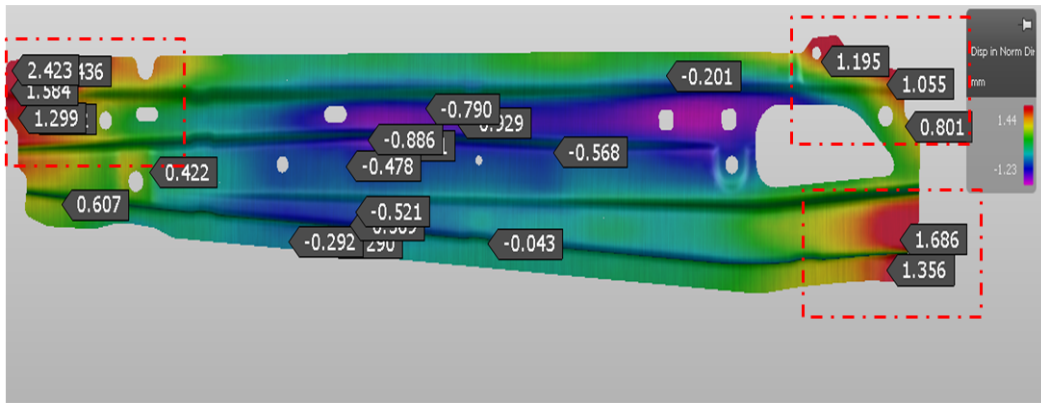


Şekil 5.108 Kapı Kolu Parçası 1.ve 2. Kesme ve Delme Prosesi Simülasyonu

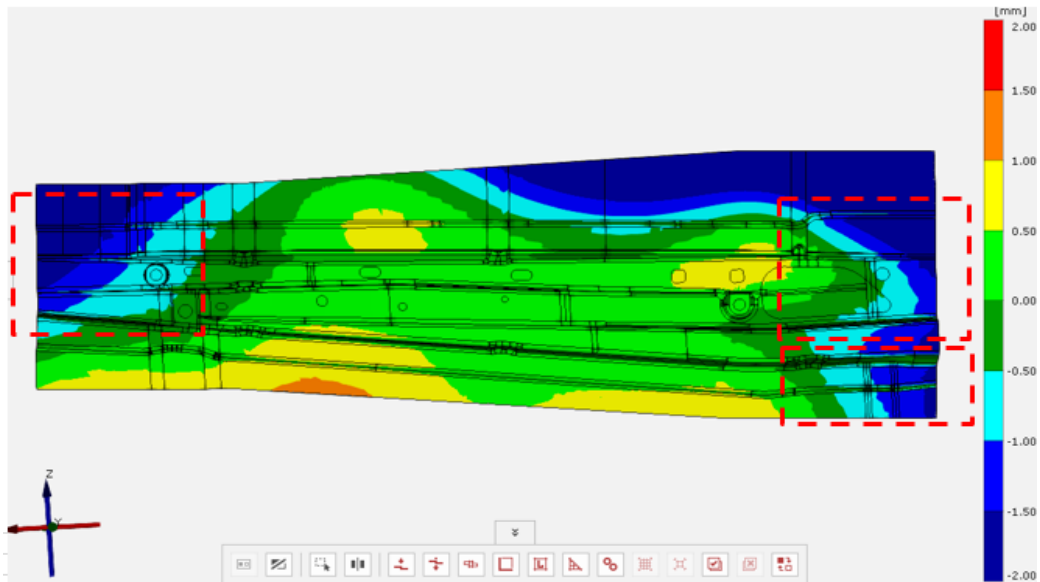


Şekil 5.109 Kapı Kolu Parçası Bükme Prosesi Simülasyonu

Bu parçada sonlu elemanlar modeli oluşturulurken malzemenin yüksek mukavemetli olmasından ötürü çekme prosesinde oldukça fazla geri yaylanma gözlemlenmiştir. Elde edilen geri yaylanma yüzeyi Autoform programında export edilmiştir. Elde edilen geri yaylanma yüzeyleri yer değiştirme yöntemi uygulanarak CatiaV5 programında değiştirilmiştir. Elde edilen geri yaylanma telafi yüzeyi ile tekrar sonlu elemanlar simülasyonu yapılmıştır. Sonlu elemanlar simülasyonunda parçanın çekme prosesinde meydana gelen geri yaylanması azaltılmıştır. Parçadan elde edilen geri yaylanma yüzeyleri $\pm 0,5$ tolerans seviyesine çekilmiştir.

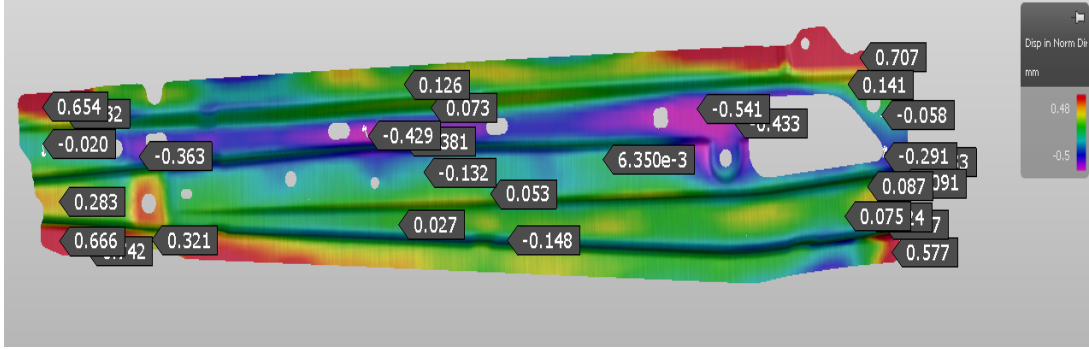


Şekil 5.110 Kapı Kolu Parçası için Parçada Tolerans Dışında Kalan Bölgelerin Geri Yaylanma Yüzeyleri

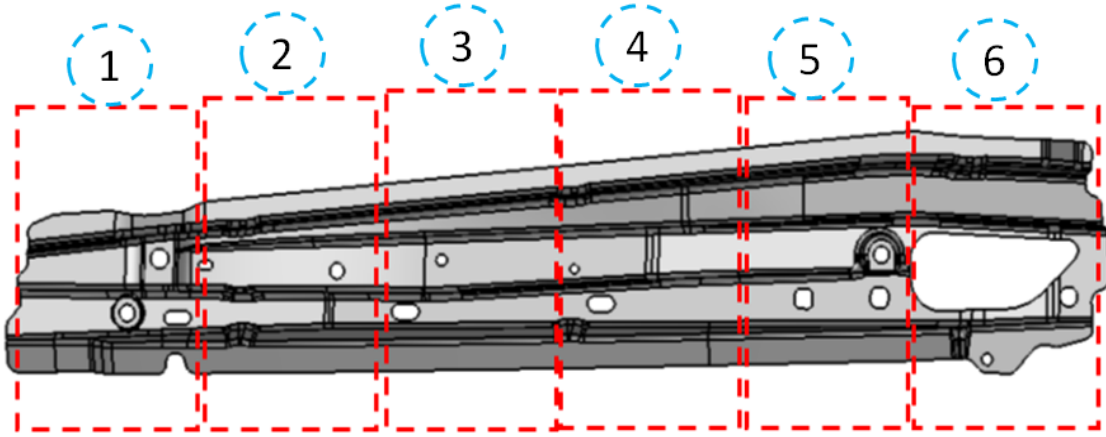


Şekil 5.111 Kapı Kolu Parçası için Geri Yaylanma Telafi Yüzeyi ile Referans Yüzeyin

Sonlu elemanlar programında oluşturulan geri yaylanan yüzeyler referans yüzeyde yapılan yer değiştirme yöntemi ile telafi yüzeyi oluşturulmuştur.



Şekil 5.112 Kapı Kolu Parçası için Yer Değiştirme Yöntemi Uygulandıktan Sonra Geri Yaylanma Yüzeyleri



Şekil 5.113 Kapı Kolu Parçası için Sonlu Elemanlar Analizi için Yapılan Ölçüm Bölgeleri

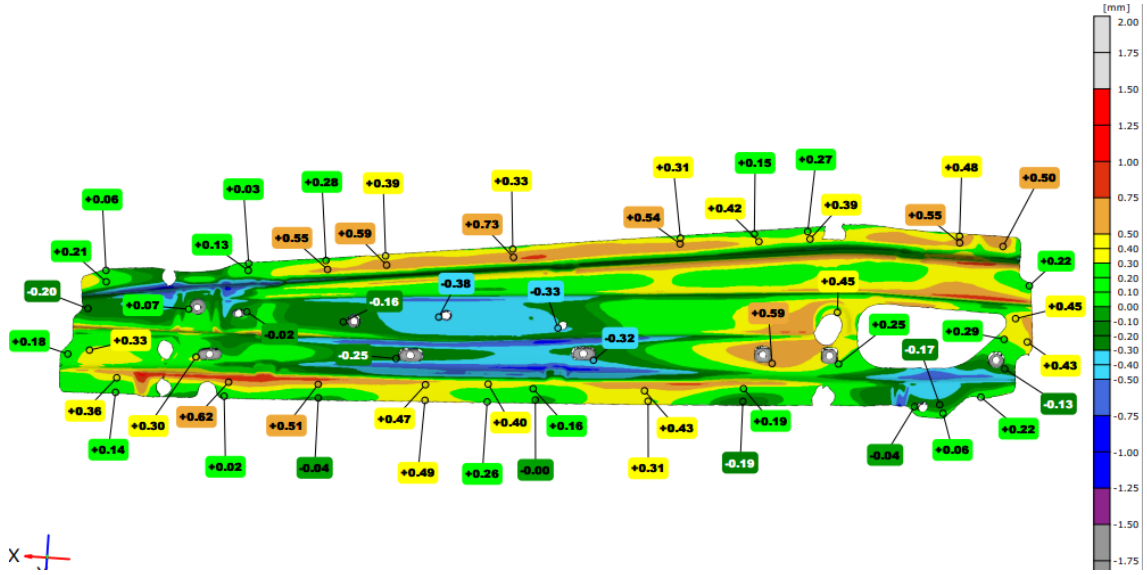
Parça için 6 farklı bölgeden ayrı ayrı 200 noktadan ölçümler alınmıştır. Toplam 1200 noktadan ölçüm yapılmıştır. Parça geri yaylanma toleransımız $\pm 0,5$ mm'dir.

Tablo 5.19 Kapı Kolu Parçası için Sonlu Elemanlar Simülasyon Sonuçlarının Ortalamasını mm Cinsinden İfade Eden Temsili Yüzeye Ait Geri Yaylanma Sonuçları

	1.Bölge	2.Bölge	3.Bölge	4.Bölge	5.Bölge	6.Bölge	Ortalama simülasyon sonuçları
Telafi yüzeyi uygulanmadan önce yapılan sonlu elemanlar simülasyonu geri yaylanma sonucu(mm)	1,12	0,268	0,4	0,446	0,52	0,8	0,59
Telafi yüzeyi uygulandıktan sonra yapılan sonlu elemanlar simülasyonu geri yaylanma sonucu(mm)	0,32	0,257	0,37	0,4	0,45	0,25	0,34

5.7.2 Sonlu Elemanlar Simülasyon Çalışması Değerlendirilmesi ve Deneysel Karşılaştırma

Elde edilen sonlu elemanlar simülasyon sonuçlarına göre çekme prosesinde meydana gelen geri yaylanma yüzeyi geri yaylanma telafi algoritması uygulanarak değiştirilmiştir. Telafi yüzeyi tekrardan sonlu elemanlar simülasyonu yapılmıştır. Geri yaylanma miktarı 1 ve 6. bölgede azaltılarak uygun yüzey elde edilmiştir. Elde edilen yüzeyin kalıp yüzeyi olarak kullanılmasına karar verilmiştir.



Şekil 5.114 Kapı Kolu Parçası için Reel Ortamda Üretimi Yapılan Parçanın Cad Data ile Karşılaştırılması

Tablo 5.20 Kapı Kolu Parçası için Geri Yaylanma Sonlu Elemanlar Simülasyon Sonuçlarının Reel Ortamda Üretimi Yapılan Parça ile Karşılaştırılması

	Sonlu elemanlar simülasyonu geri yaylanma ortalaması	Reel ortamda üretimi yapılan parçanın geri yaylanma ortalaması
Sonuçlar	0,34	0,38

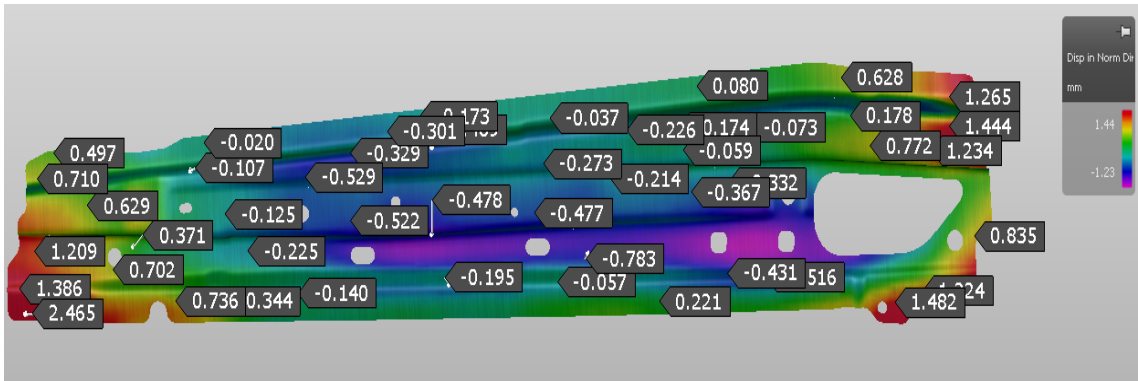
Karekök ortalama hata kare (KOHK) yönteminden faydalanarak, SPC440_C_100 malzeme modelleri kullanılarak gerçekleştirilen sonlu elemanlar analiz sonuçlarının deneysel sonuca ne kadar yaklaştığı belirlenmiştir. KOHK yöntemi denklem 5.4'de verilmiştir. Bu denklemde n toplam ölçüm sayısını, x_i deney sonucunu, y_i ise benzetim sonucunu ifade etmektedir. KOHK yöntemi ile sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilmiş geri yaylanma yüzeyinin, deneysel olarak elde edilmiş yüzeye ne kadar yakın olduğu belirlenmiştir. KOHK değerinin sıfıra yaklaşması, sonlu elemanlar analizi tahminlerinin tutarlılığının yüksek olduğuna işaret etmektedir.

$$KOHK = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} = 0,12 \quad (5.4)$$

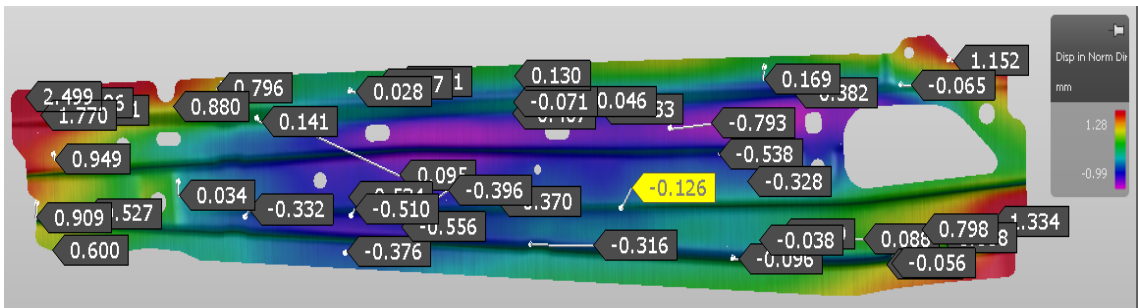
1200 noktadan alınan ölçüm sonuçlarına göre deney sonuçları ile Autoform programında yapılan simülasyon sonuçları arasındaki fark 0,04mm'dir. Malzeme geri yaylanma toleransının $\pm 0,5$ mm tolerans aralığı düşünüldüğünde elde edilen sonuçlar geri yaylanma sonuçlarına yaklaşımıştır. Elde edilen simülasyon sonuçları ile reel ortamda gerçekleştirilen çıktılar birbirleri ile örtüşmektedir.

5.7.3 Malzeme Kalınlığının Geri Yaylanma Davranışı Üzerindeki Etkisi

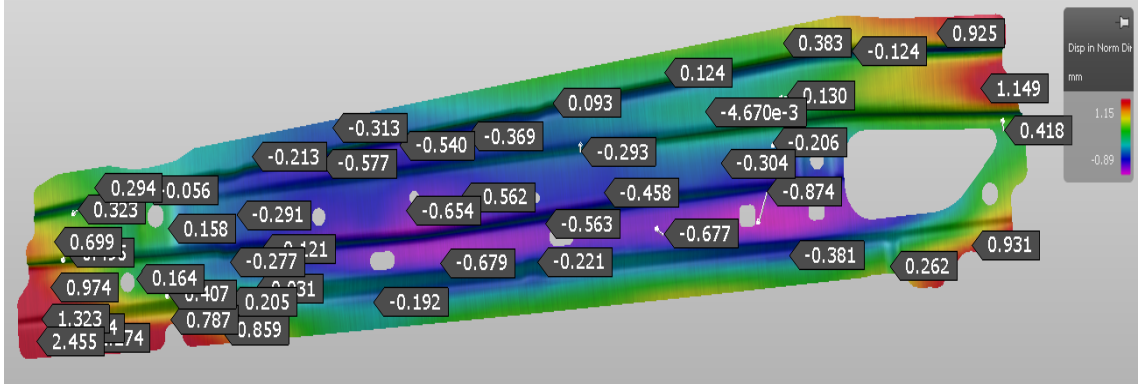
Parametrik analizlerde, farklı kalınlıklardaki SCGA980DUB-45 sac metaller için benzetim çalışmaları yapılmıştır. Autoform programında elde edilen simülasyon sonuçlarına göre geri yaylanma davranışları incelenmiştir. Autoform programında malzeme kalınlığı 1,6 - 2 - 2,4 - 2,8 ve 3,2 olacak şekilde malzeme kalınlıkları değiştirilmiştir. Yapılan çalışma için malzemenin diğer özellikleri sabit tutulmuştur. Elde edilen simülasyon sonuç görselleri aşağıda gösterilmiştir.



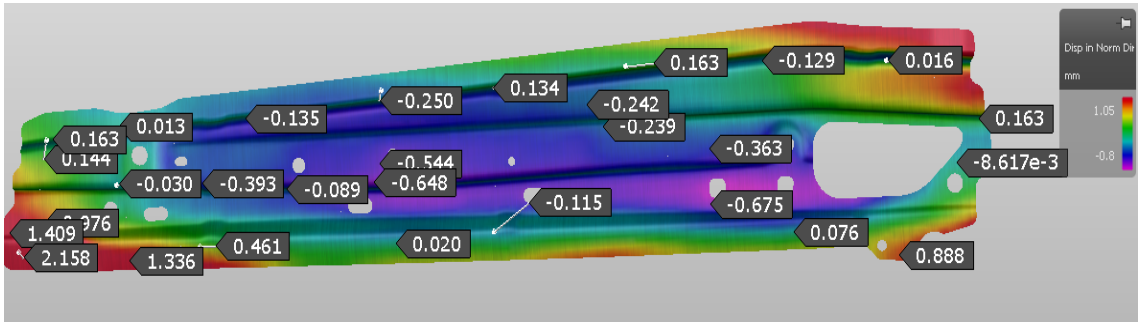
Şekil 5.115 Kapı Kolu Parçası için Malzeme Kalınlığı 1,6 mm ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi



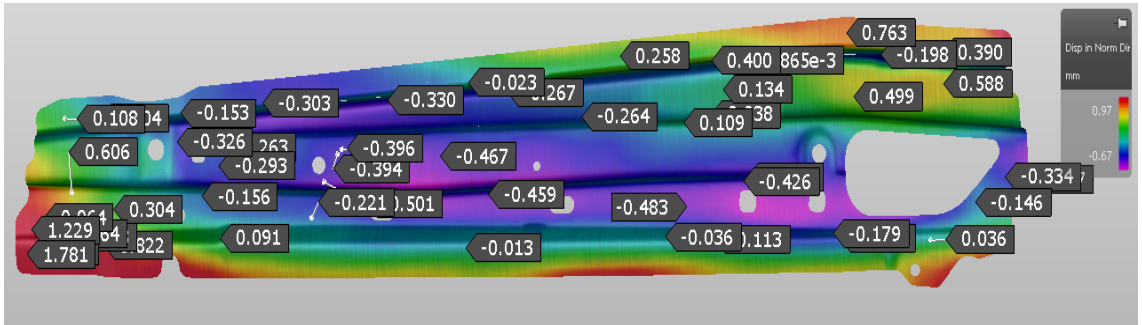
Şekil 5.116 Kapı Kolu Parçası için Malzeme Kalınlığı 2 mm ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi



Şekil 5.117 Kapı Kolu Parçası için Malzeme Kalınlığı 2,4 mm ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi



Şekil 5.118 Kapı Kolu Parçası için Malzeme Kalınlığı 2,8 mm ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi



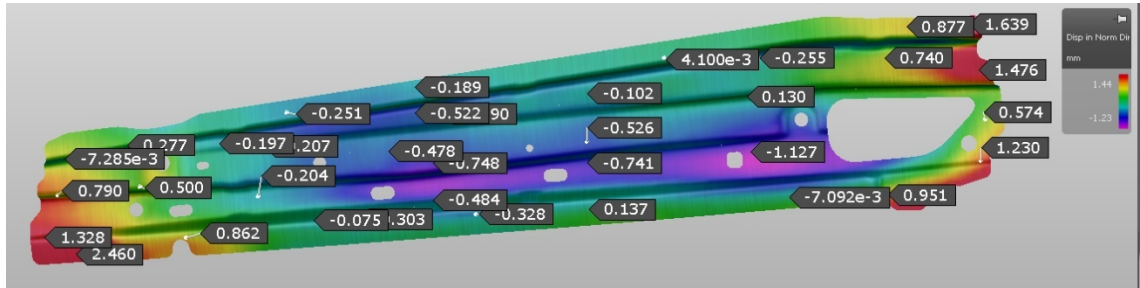
Şekil 5.119 Kapı Kolu Parçası için Malzeme Kalınlığı 3,2 mm ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi

Tablo 5.21 Kapı Kolu Parçası için Malzeme Kalınlığının Geri Yaylanma Sonuçlarına Etkisi

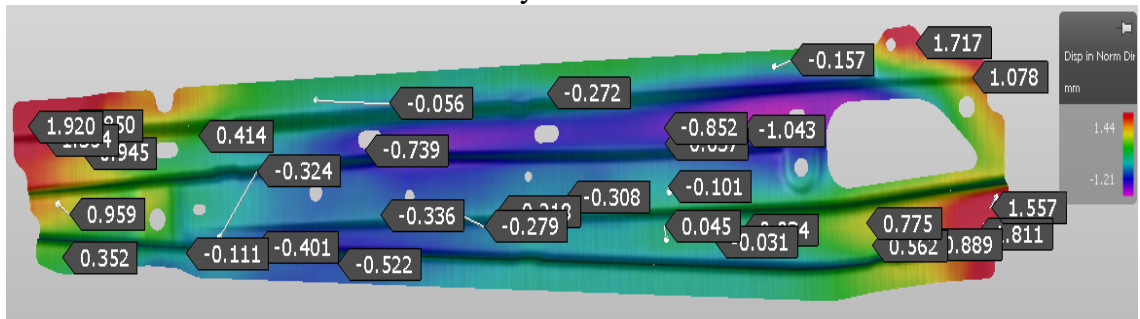
	Malzeme Kalınlığı(mm)				
	t: 1,6	t: 2	t: 2,4	t: 2,8	t: 3,2
Sonlu elemanlar simülasyonu geri yaylanma sonuçları(mm)	0,59	0,42	0,35	0,31	0,25

5.7.4 Elastisite Modülünün Geri Yaylanma Davranışı Üzerindeki Etkisi

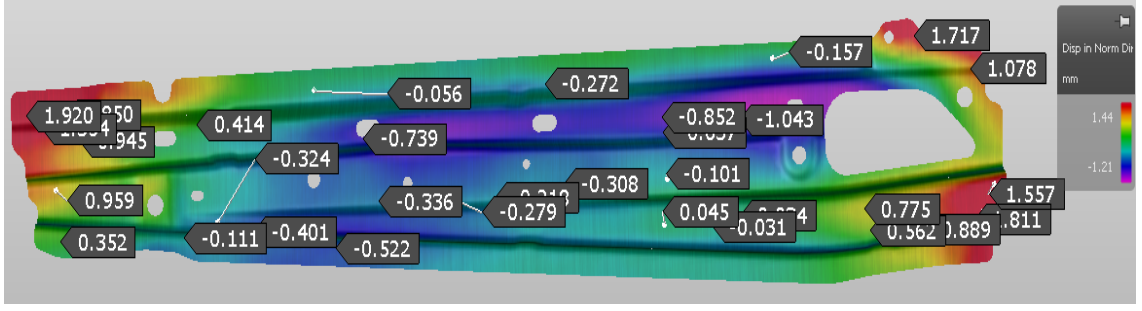
Autoform programında yapılan geri yaylanma simülasyon sonuçlarına göre elastisite modülünün geri yaylanma davranışı üzerine etkileri incelenmiştir. Malzemenin diğer özellikleri sabit tutularak çeşitli elastisite modüllerine göre geri yaylanma davranışları grafiklerde gösterilmiştir.



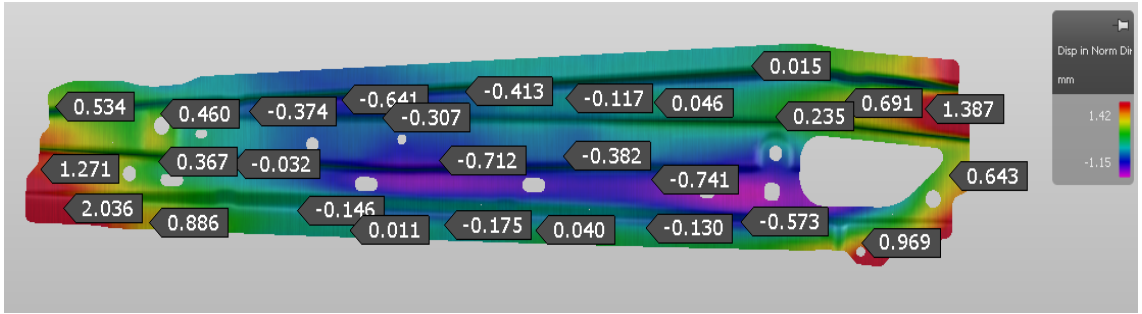
Şekil 5.120 Kapı Kolu Parçası için Elastisite Modülü 210000 Mpa ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi



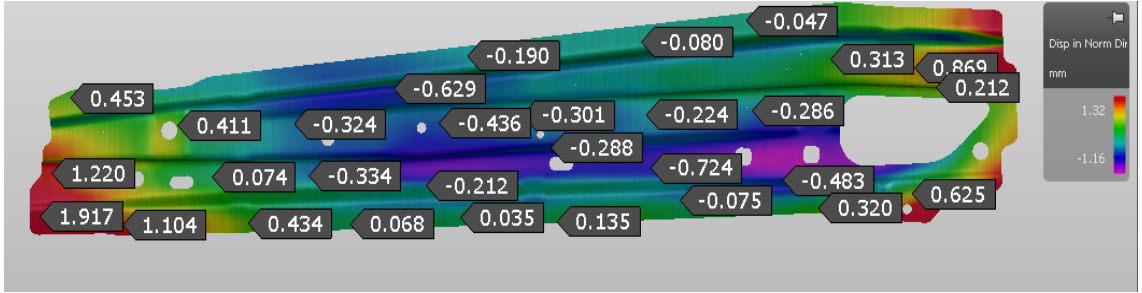
Şekil 5.121 Kapı Kolu Parçası için Elastisite Modülü 215000 Mpa ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi



Şekil 5.122 Kapı Kolu Parçası için Elastisite Modülü 220000 Mpa ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi



Şekil 5.123 Kapı Kolu Parçası için Elastisite Modülü 225000 Mpa ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi



Şekil 5.124 Kapı Kolu Parçası için Elastisite Modülü 230000 Mpa ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi

Tablo 5.22 Kapı Kolu Parçası için Elastisite Modülünün Geri Yaylanma Sonuçlarına Etkisi

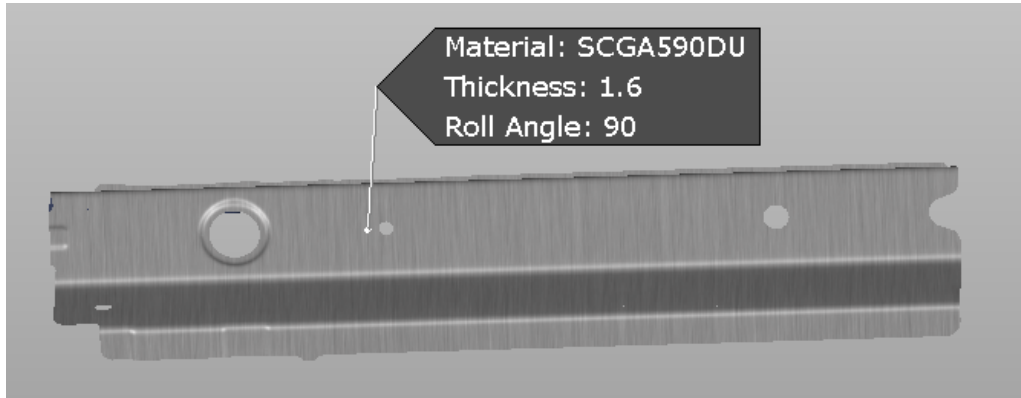
	Elastisite Modülü (Mpa)				
	210000	215000	220000	225000	230000
Sonlu elemanlar simülasyonu geri yaylanma sonuçları(mm)	0,59	0,566	0,55	0,538	0,42

5.7.5 Tartışma

Malzeme kalınlığı ve elastisite modülünün geri yaylanma davranışları incelendiğinde malzeme kalınlığı ve elastisite modülünün artışının geri yaylanma miktarını azalttığı gözlemlenmiştir.

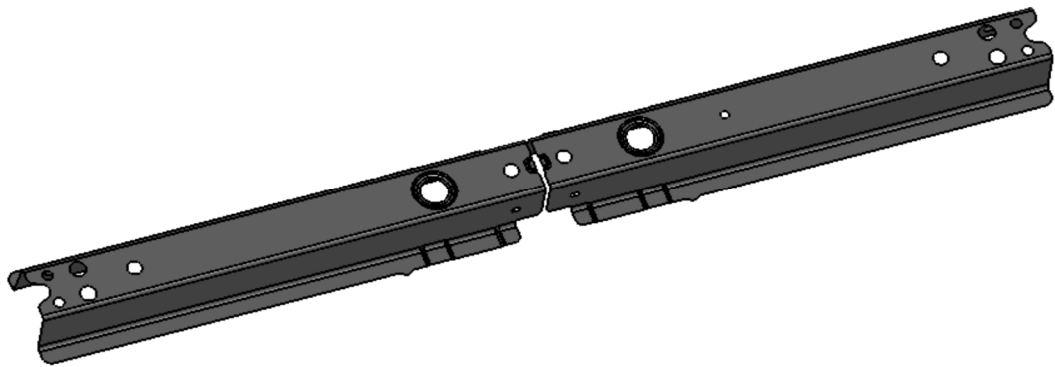
5.8 Zemin Yan Üye Parçası

Zemin üye parçası, 1,6 mm malzeme kalınlığına ve 590 MPa çekme dayanımına sahiptir.

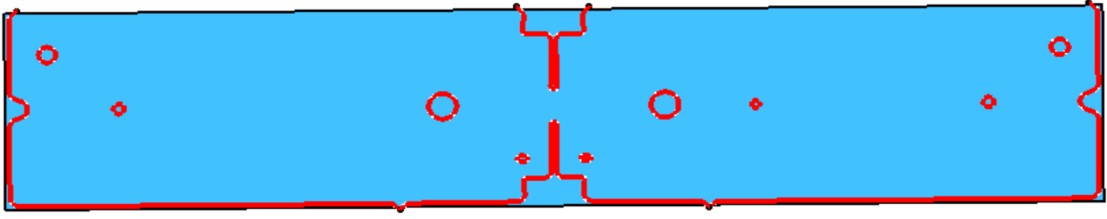


Şekil 5.125 Zemin Üye Parçası

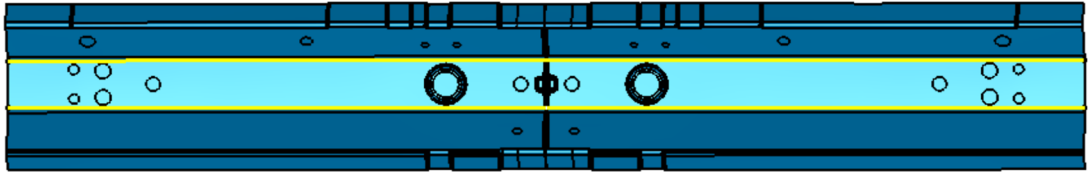
Zemin üye parçasında öncelikle delik delme ve kesme prosesi yapılmıştır. Parçanın formu bükme-form prosesi ile gerçekleşmiş sırasıyla kamlı bükme prosesi, delme-kamlı delme-ayırma prosesi uygulanmıştır. Toplam 4 procesten oluşmaktadır.



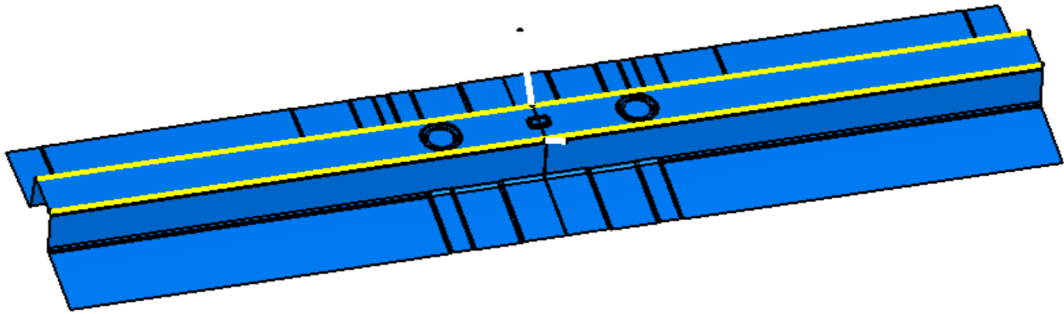
Şekil 5.126 Zemin Üye Parçası Cad Datası



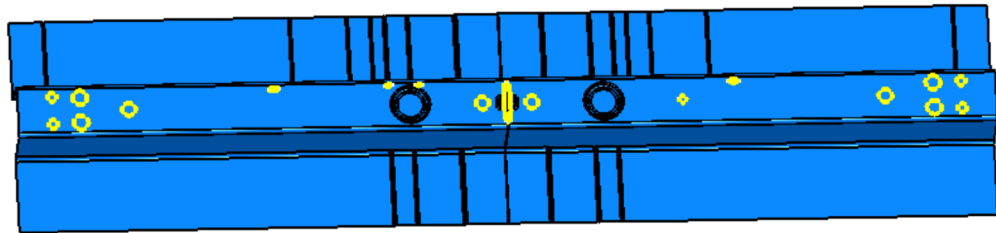
Şekil 5.127 Zemin Üye Parçası için Kesme ve Delme Hatları



Şekil 5.128 Zemin Üye Parçası için Bükme Hatları



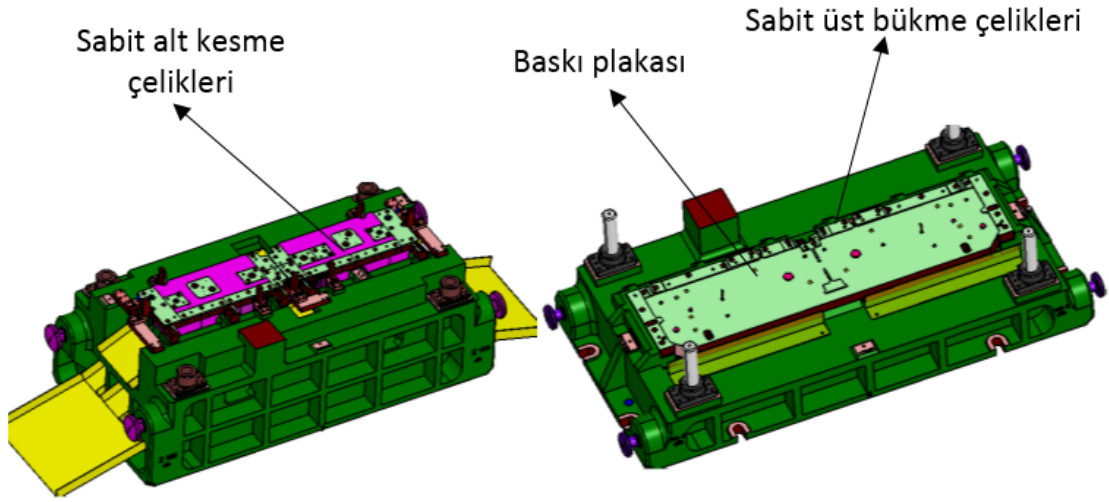
Şekil 5.129 Zemin Üye Parçası için Kamlı Bükme Hatları



Şekil 5.130 Zemin Üye Parçası için Delme-Kamlı Delme ve Ayırma Hatları

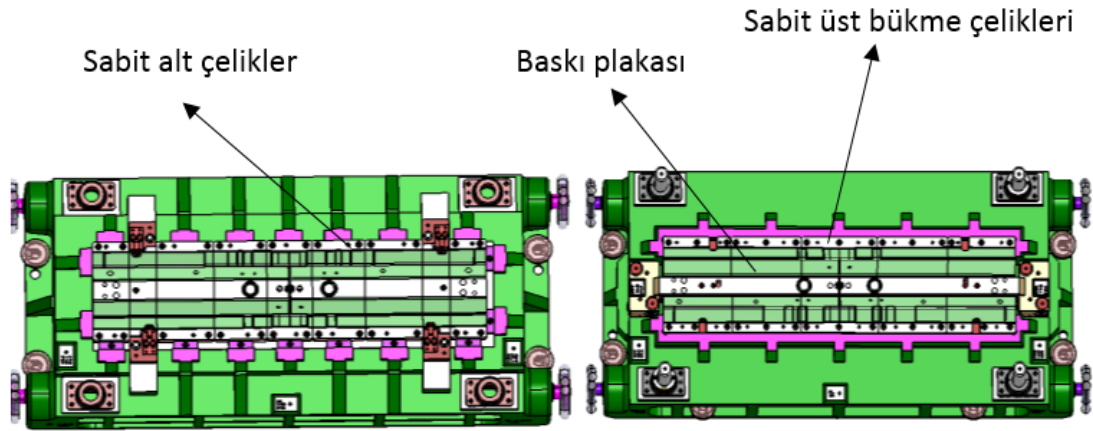
Bu parça, 4 farklı kalıp yapılarak üretilmiştir. Bu parçada öncelikle parçanın etrafında delme-kesme uygulanmıştır. Parçanın formu form-bükme prosesi ile oluşturulmuştur. Sırasıyla kamlı bükme, delme-kamlı delme ve ayırma prosesleri

uygulanmıştır. Kesme-delme kalıbında alt kalıp için sabit alt kesme çelikleri üst kalıpta ise baskı plakası ve üst kesme çelikleri yer almaktadır.



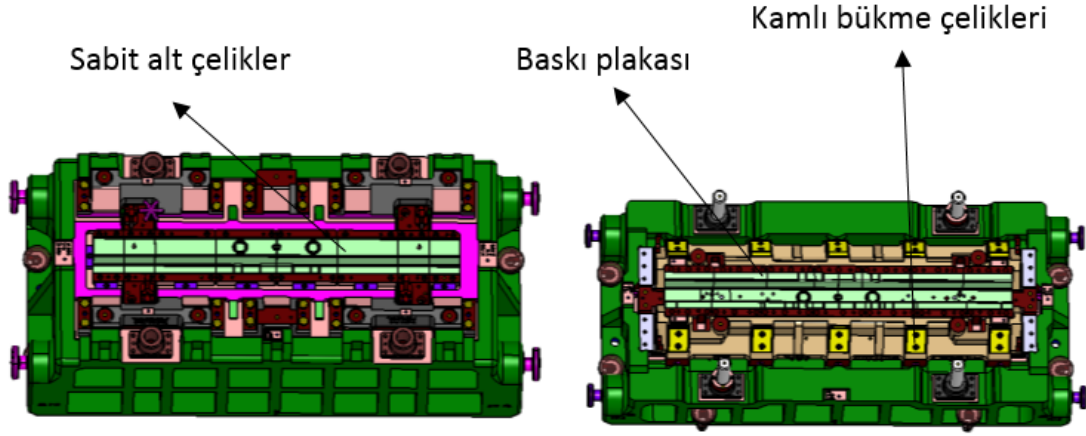
Şekil 5.131 Zemin Üye Parçası için Kesme-Delme Kalıbı

Parçanın formu form-bükme prosesi, sabit alt ve üst kalıp yüzeyinden oluşmaktadır. Dişi kalıp, hareketli elemandır ve üst kısma yerleştirilmiştir.



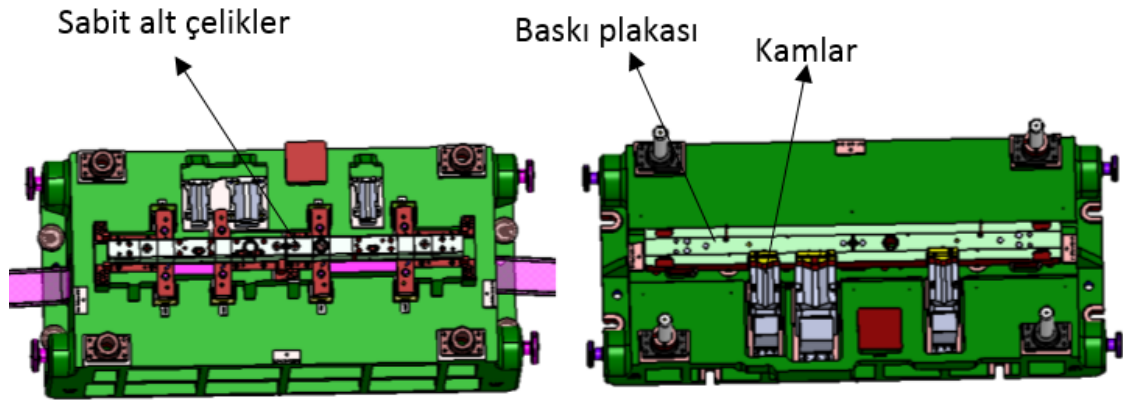
Şekil 5.132 Zemin Üye Parçası için Form-Bükme Kalıbı

Parçanın formu form-bükme prosesi ile oluşturulduktan sonra bükmenin tamamlanabilmesi amacıyla kamlı bükme prosesi yapılmıştır. Bu kalıpta ise alt kalıp sabit çelikler, üst kalıp baskı plakası ve kamlar kalıbın temel elemanıdır.



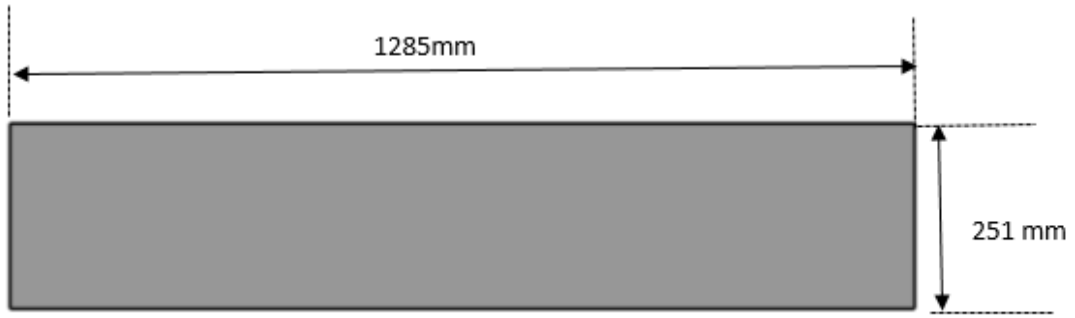
Şekil 5.133 Zemin Üye Parçası için Kamlı Bükme Kalıbı

Kalıbın son prosesinde delme-kamlı delme-ayırma prosesi uygulanmıştır. Alt sabit çelikler, üst baskı plakası ve kamlar kalıbın temel elemanlarıdır.



Şekil 5.134 Zemin Üye Parçası için Delme-Kamlı Delme-Ayırma Kalıbı

Yapılan deneylerde SCGA590DU-45 çelik malzeme kullanılmıştır. Sac 1285 mm genişliğinde ve 251 mm uzunluğundadır. Kesme-delme prosesi kurs boyu olarak 20 mm, form-bükme prosesi baskı plakası kurs boyu olarak 51 mm, kamlı bükme prosesi baskı plakası kurs boyu 5 mm delme-kamlı delme ve ayırma prosesi baskı plakası kurs boyu 30 mm seçilmiştir. Tüm saclar haddeleme doğrultusu yönünde şekillendirilmiştir. Haddeleme yönü sacın üreticisi tarafından belirtilmiştir. Böylece, şekillendirilen tüm parçaların anizotropi yönleri birbirleriyle uyumlu hale getirilmiştir.



Şekil 5.135 Zemin Üye Parçası için Sac Malzemenin Boyutları

Tablo 5.23 SCGA590DU-45 Sac Malzemenin Özellikleri

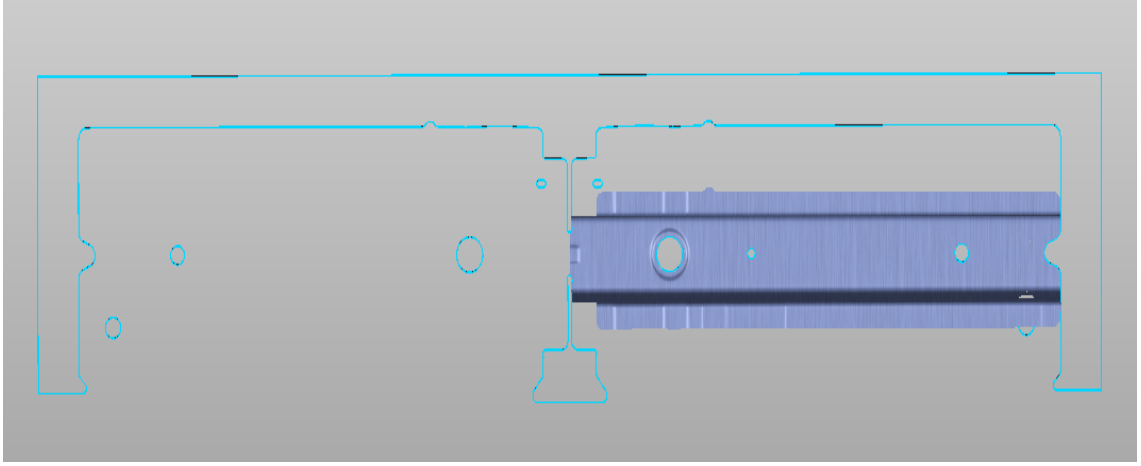
g/cm ³	E(Mpa)	v	G0(Mpa)	R _m (Mpa)
7,8	206000	0,3	360	645,8

5.8.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi

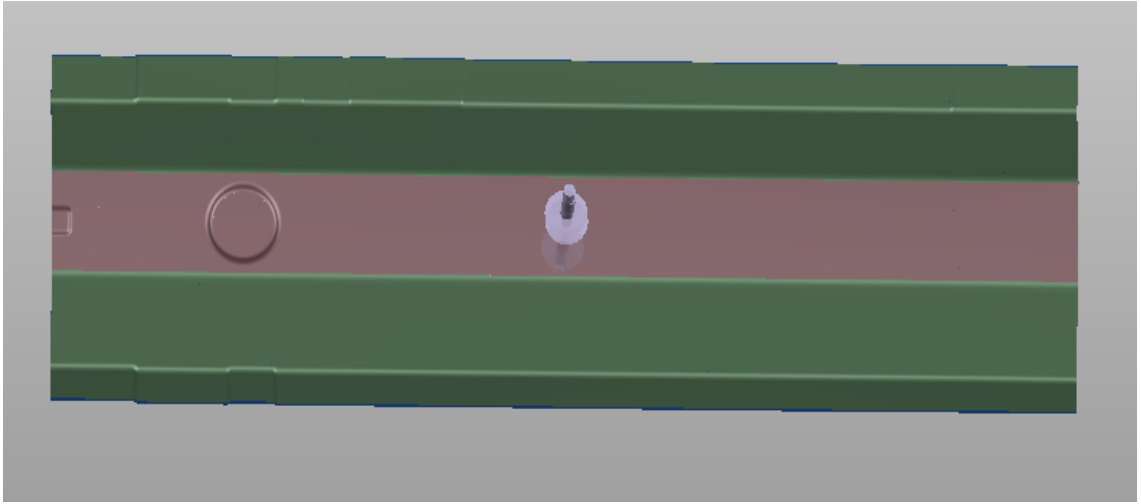
Analiz iki farklı formülasyon kullanılarak, birbirini takip eden iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşama açık formülasyon kullanılarak şekil verme işlemi, ikinci aşama ise kapalı formülasyon kullanılarak geri yaylanmanın belirlenmesidir.

Şekillendirme işlemini daha iyi kavrayabilmek, işlem parametrelerinin ve malzeme özelliklerinin geri yaylanma davranışını nasıl etkilediğini gözlemleyebilmek için literatürdeki analitik modeller incelenmiştir. Analitik model uygulanırken aşağıdaki kabuller yapılmıştır.

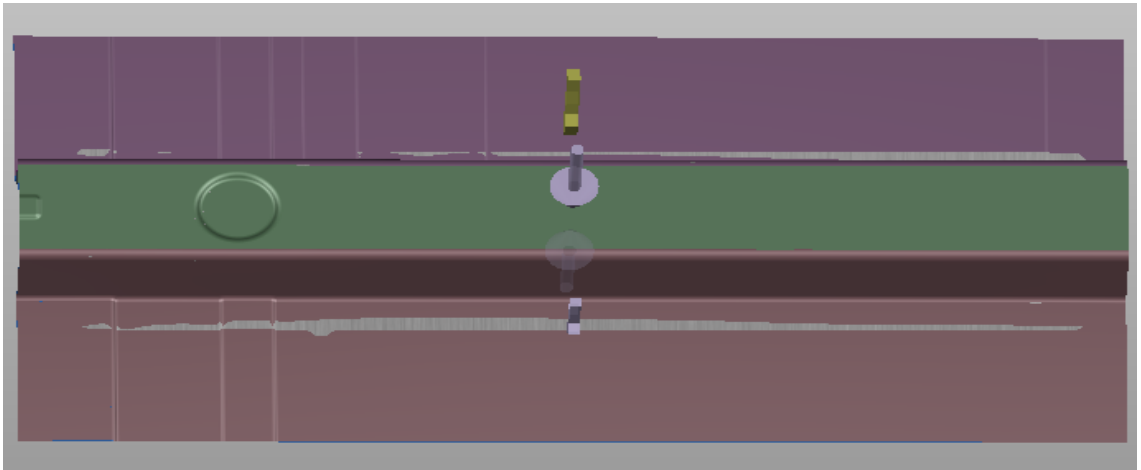
Parça Cad datası yardımıyla Catia V5 programında çekme prosesi için çekirdek, parça tutucu ve sabit üst kalıp yüzeyleri oluşturulmuştur. Oluşturulan yüzeyler Autoform programında import edilerek simülasyon yapılmıştır. Simülasyon çalışması yapılırken sürtünme katsayısı Toyotetsu tarafından 0,15 mm belirlenmiştir.



Şekil 5.136 Zemin Üye Parçası için Kesme-Delme Prosesi Simülasyonu



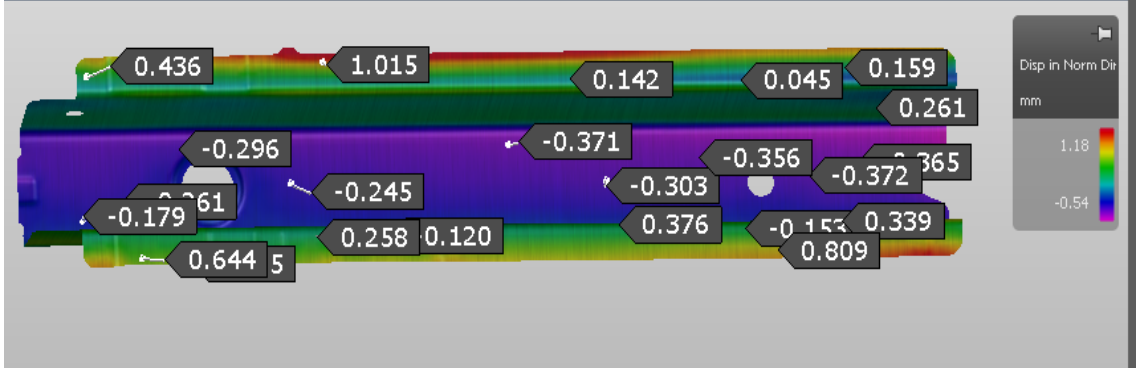
Şekil 5.137 Zemin Üye Parçası için Form-Bükme Prosesi Simülasyonu



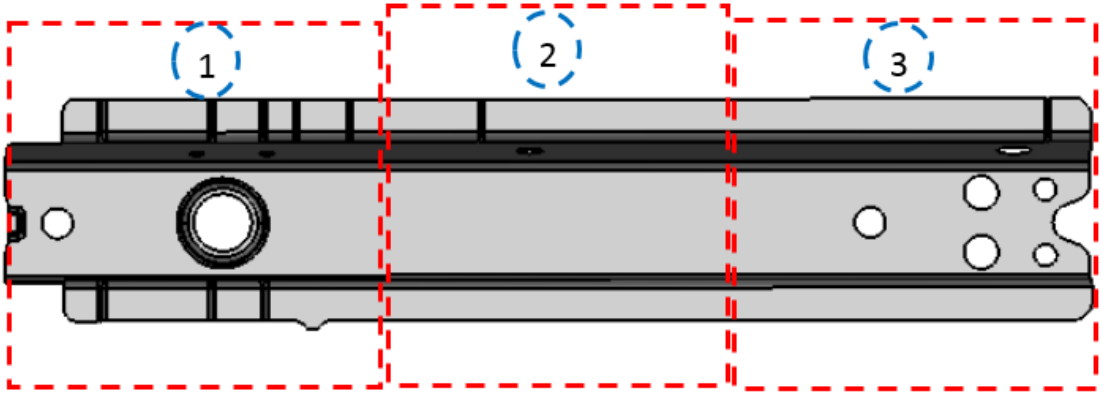
Şekil 5.138 Zemin Üye Parçası için Kamlı Bükme Prosesi Simülasyonu

Zemin yan destek parçası sonlu elemanlar simülasyonu yapılırken öncelikle trim hattı oluşturulmuş bükmenin yapılabilmesi 2 proste gerçekleşmiştir. Sonlu

elemanlar simülasyon aşamasında sadece sağ parçada simülasyon yapılmıştır. Tek bir parça kullanılmasının temel sebebi sağ ve sol parçanın simetri olmasıdır. Böylelikle sonlu elemanlar simülasyon hesaplama süresi azaltılmıştır.



Şekil 5.139 Zemin Üye Parçası için Geri Yaylanma Simülasyon Sonuçları



Şekil 5.140 Zemin Üye Parçası için Sonlu Elemanlar Analizi Yapılan Ölçüm Bölgeleri

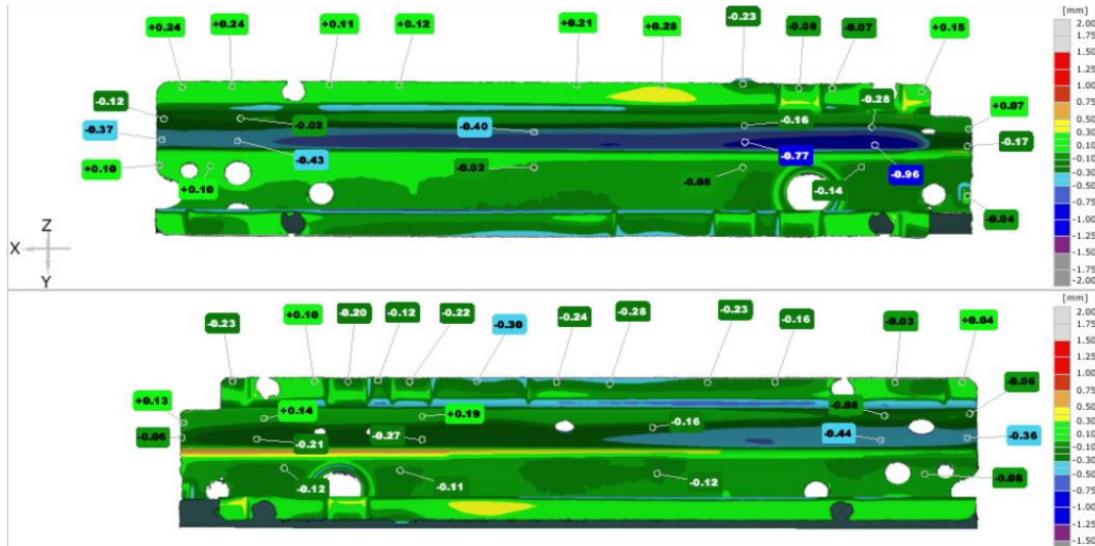
Simülasyon sonuçlarının göre parça için 3 farklı bölgeden ayrı ayrı 200 noktadan ölçümler alınmıştır. Toplam 600 noktadan ölçüm yapılmıştır. Parça geri yaylanma toleransımız $\pm 0,5$ mm'dir.

Tablo 5.24 Zemin Üye Parçası için Sonlu Elemanlar Simülasyon Sonuçlarının Ortalamasını mm Cinsinden İfade Eden Temsili Yüzeye Ait Geri Yaylanma Sonuçları

	1.Bölge	2.Bölge	3.Bölge	Ortalama simülasyon sonuçları
Sonlu elemanlar simülasyonu geri yaylanma sonucu	0,32	0,268	0,35	0,32

5.8.2 Sonlu Elemanlar Simülasyon Çalışması Değerlendirilmesi ve Deneysel Karşılaştırma

Elde edilen sonlu elemanlar simülasyon sonuçlarına göre form-bükme prosesinde meydana gelen geri yaylanma oldukça azdır. Sonlu elemanlar simülasyon sonuçlarına göre malzemede neredeyse hiç geri yaylanma görülmemiştir. Simülasyon sonuçlarına göre bu yüzeylerin kalıp yüzeyinde kullanılmasına karar verilmiştir



Şekil 5.141 Zemin Üye Parçası için Reel Ortamda Üretimi Yapılan Parçanın Cad Data ile Karşılaştırılması

Autoform programında yapılan simülasyon sonuçları ile parçanın proses süreçlerinin doğruluğu kanıtlanmıştır. Elde edilen proses yüzeylerinin reel

ortamda ortaya çıkan nihai ürünle karşılaştırılması tarama programı olan Gom Inspect programında karşılaştırılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen geri yaylanmış yüzeyler, deney tarama yüzeyi ile Gom Inspect’de üst üste çakıştırılmış ve yüzeyler arasındaki mesafe mm cinsinden ölçülmüştür. Bu yöntemde, aralarındaki normal mesafe en küçük olan her bir düğüm noktası arasındaki mesafenin dik koordinat sistemindeki üç bileşeni ölçülmüş ve bu değerler kullanılarak normal mesafe hesaplanmıştır. Sac yüzeyi boyunca toplam 600 ölçüm alınmıştır.

Tablo 5.25 Zemin Üye Parçası için Geri Yaylanma Sonlu Elemanlar Simülasyon Sonuçlarının Reel Ortamda Üretimi Yapılan Parça ile Karşılaştırılması

	Sonlu elemanlar simülasyonu geri yaylanma ortalaması	Reel ortamda üretimi yapılan parçanın geri yaylanma ortalaması
Sonuçlar	0,32	0,25

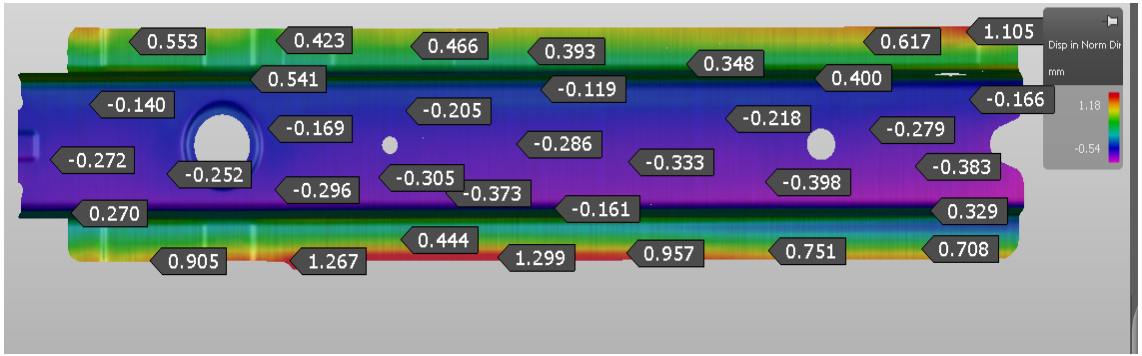
Karekök ortalama hata kare (KOHK) yönteminden faydalanarak, SCGA590DU-45 malzeme modelleri kullanılarak gerçekleştirilen sonlu elemanlar analiz sonuçlarının deneysel sonuca ne kadar yaklaştığı belirlenmiştir. KOHK yöntemi denklem 5.4’de verilmiştir. Bu denklemde n toplam ölçüm sayısını, xi deney sonucunu, yi ise benzetim sonucunu ifade etmektedir. KOHK yöntemi ile sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilmiş geri yaylanma yüzeyinin, deneysel olarak elde edilmiş yüzeye ne kadar yakın olduğu belirlenmiştir. KOHK değerinin sıfıra yaklaşması, sonlu elemanlar analizi tahminlerinin tutarlılığının yüksek olduğuna işaret etmektedir.

$$KOHK = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} = 0,13 \quad (5.5)$$

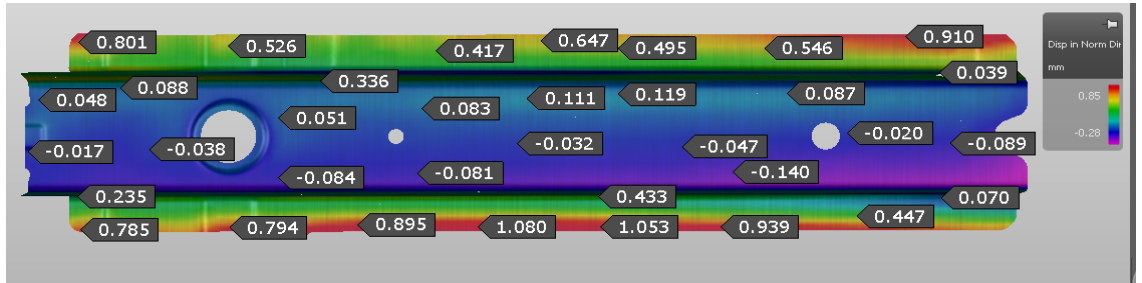
600 noktadan alınan ölçüm sonuçlarına göre deney sonuçları ile Autoform programında yapılan simülasyon sonuçları arasındaki fark 0,07 mm’dir. Malzeme geri yaylanma toleransının + -0,5 mm tolerans aralığı düşünüldüğünde elde edilen sonuçlar geri yaylanma sonuçlarına yaklaşmıştır. Elde edilen simülasyon sonuçları ile reel ortamda gerçekleştirilen çıktılar birbirleri ile örtüşmektedir.

5.8.3 Malzeme Kalınlığının Geri Yaylanma Davranışı Üzerindeki Etkisi

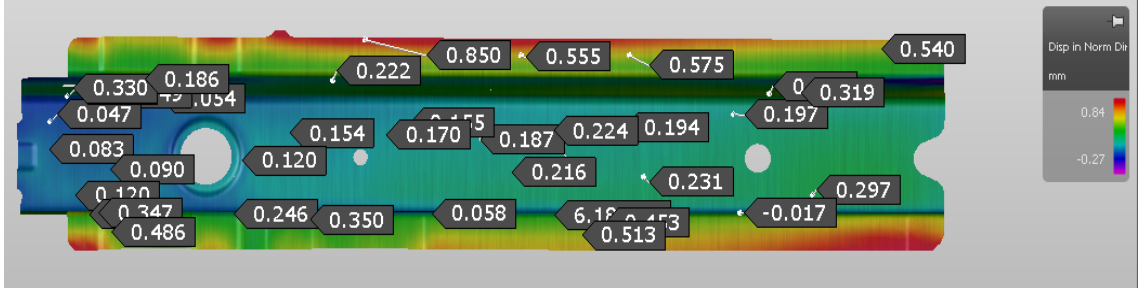
Parametrik analizlerde, farklı kalınlıklardaki SCGA270C-45 sac metaller için benzetim çalışmaları yapılmıştır. Autoform programında elde edilen simülasyon sonuçlarına göre geri yaylanma davranışları incelenmiştir. Autoform programında malzeme kalınlığı 1,6 - 2,0 - 2,4 - 2,8 ve 3,2 olacak şekilde malzeme kalınlıkları değiştirilmiştir. Yapılan çalışma için malzemenin diğer özellikleri sabit tutulmuştur. Elde edilen simülasyon sonuç görselleri aşağıda gösterilmiştir.



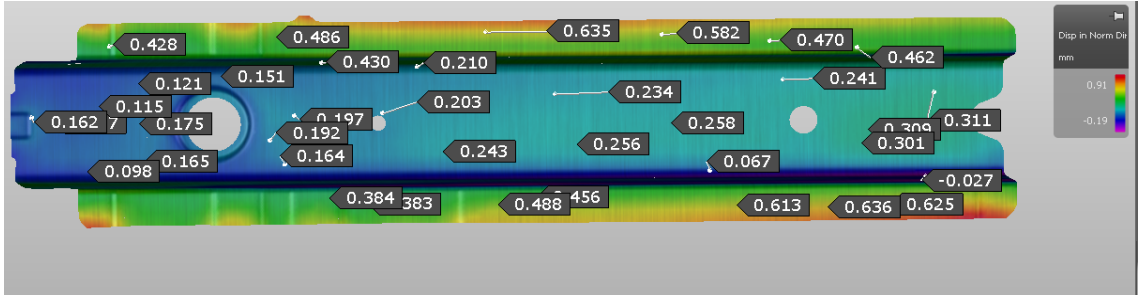
Şekil 5.142 Zemin Üye Parçası için Malzeme Kalınlığı 1,6 mm ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi



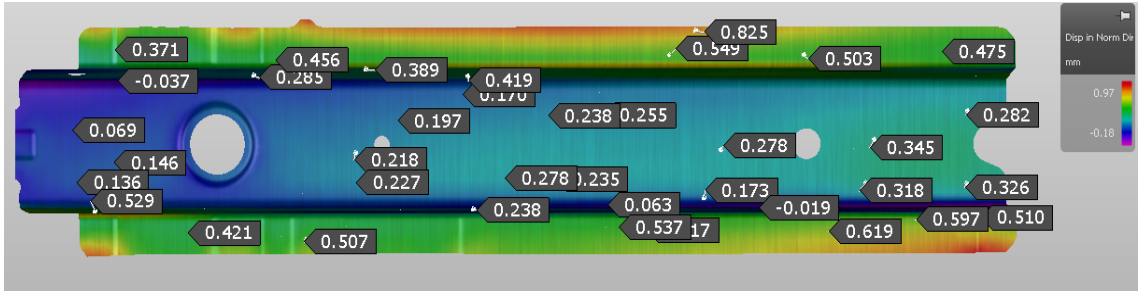
Şekil 5.143 Zemin Üye Parçası için Malzeme Kalınlığı 2 mm ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi



Şekil 5.144 Zemin Üye Parçası için Malzeme Kalınlığı 2,4 mm ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi



Şekil 5.145 Zemin Üye Parçası için Malzeme Kalınlığı 2,8 mm ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi



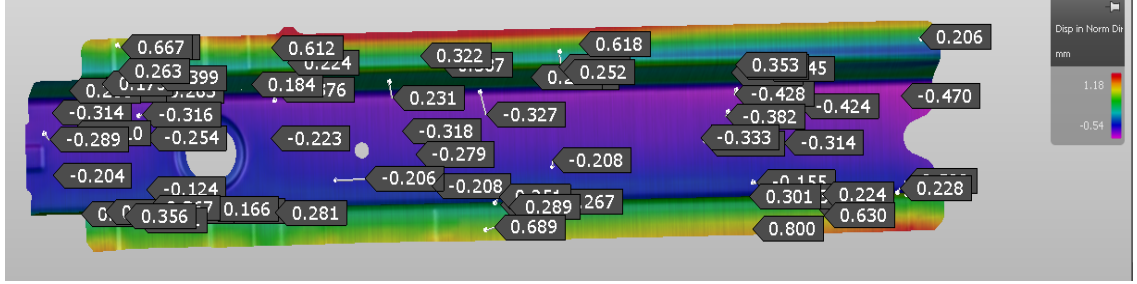
Şekil 5.146 Zemin Üye Parçası için Malzeme Kalınlığı 3,2 mm ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi

Tablo 5.26 Zemin Üye Parçası için Malzeme Kalınlığının Geri Yaylanma Sonuçlarına Etkisi

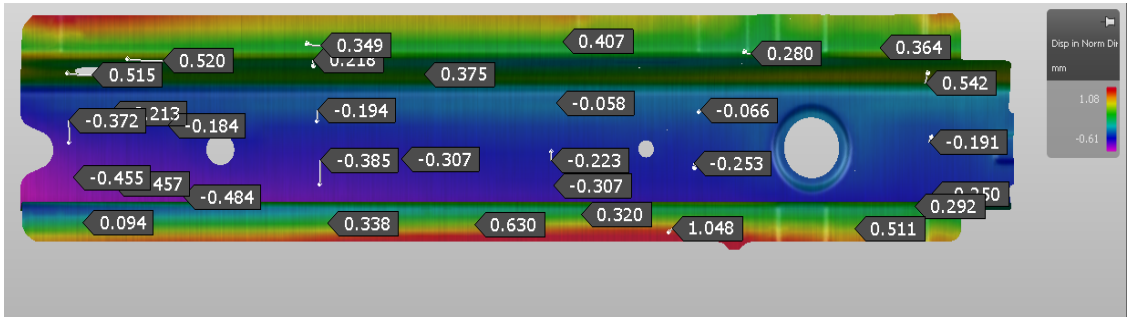
	Malzeme Kalınlığı(mm)				
	t:1,6	t:2	t:2,4	t:2,8	t:3,2
Sonlu elemanlar simülasyonu geri yaylanma sonuçları	0,32	0,18	0,16	0,27	0,3

5.8.4 Elastisite Modülünün Geri Yaylanma Davranışı Üzerindeki Etkisi

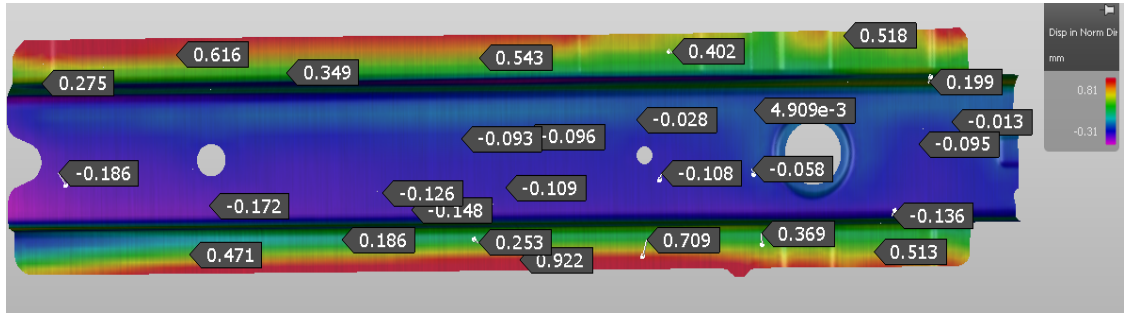
Autoform programında yapılan geri yaylanma simülasyon sonuçlarına göre elastisite modülünün geri yaylanma davranışı üzerine etkileri incelenmiştir. Malzemenin diğer özellikleri sabit tutularak çeşitli elastisite modüllerine göre geri yaylanma davranışları grafiklerde gösterilmiştir.



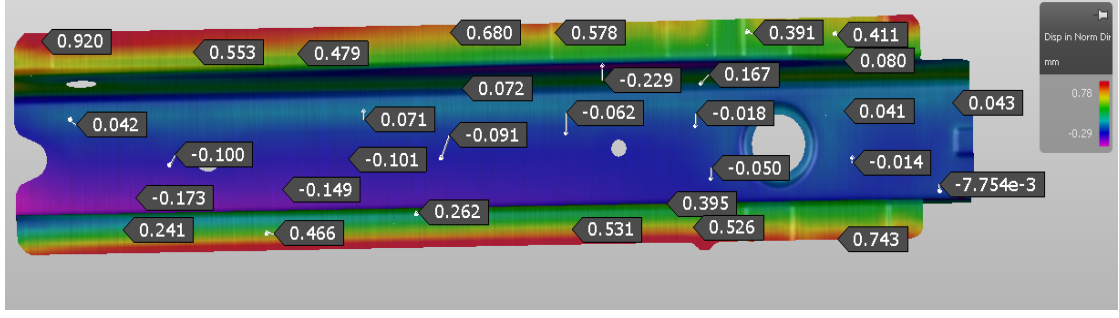
Şekil 5.147 Zemin Üye Parçası için Elastisite Modülü 206000 Mpa ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi



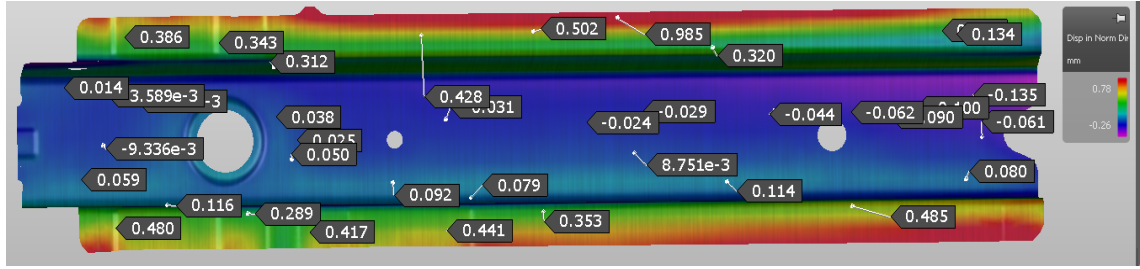
Şekil 5.148 Zemin Üye Parçası için Elastisite Modülü 210000 Mpa ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi



Şekil 5.149 Zemin Üye Parçası için Elastisite Modülü 215000 Mpa ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi



Şekil 5.150 Zemin Üye Parçası için Elastiste Modülü 220000 Mpa ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi



Şekil 5.151 Zemin Üye Parçası için Elastiste Modülü 225000 Mpa ile Yapılan Geri Yaylanma Analizi

Tablo 5.27 Zemin Üye Parçası için Elastisite Modülünün Geri Yaylanma Sonuçlarına Etkisi

	Elastisite Modülü (Mpa)				
	206000	210000	215000	220000	225000
Sonlu elemanlar simülasyonu geri yaylanma sonuçları(mm)	0,32	0,25	0,18	0,16	0,145

Tez kapsamında, 5 farklı geometri ve kalınlığa sahip 270 MPa, 440 MPa, 590 MPa ve 980 MPa çekme mukavemet değerine sahip araç gövde parçasının çekme ve form prosesi süreci sonunda geri yaylanma davranışları incelenmiş ve geri yaylanma telafi algoritması uygulanmıştır. Elde edilen simülasyon sonuçları deneysel sonuçlar ile doğrulaması yapılmıştır. Aynı zamanda 5 farklı parçanın malzeme kalınlığı ve elastisite modülünün geri yaylanmaya etkileri incelenmiştir. 5 farklı geometriye sahip parçalar için sonlu elemanlar programında sürtünme katsayısı 0,15 mm belirlenmiştir. Sürtünme katsayısının belirlenmesinde Toyotetsu bünyesinde yer alan tecrübeler sonucunda belirlenmiştir. Her bir farklı geometri için toplam 1200 noktadan ölçümler alınmıştır.

Geri yaylanmanın sonlu elemanlar ile tahmininde aşağıdaki sonuçlara varılmıştır;

- Arka Araç Gövde Parçası_1 için yapılan sonlu elemanlar analizinde süzdürme çubuğu yarıçapının 3 mm olması minimum geri yaylanma davranışı için uygun olduğu görülmüştür. Elde edilen yüzeylerin kalıp yüzeyinde kullanılmasının uygun olduğu kararlaştırılmıştır.

- Arka Araç Gövde Parçası_1 için malzeme kalınlığı ve elastisite modülünün geri yaylanma davranışları incelendiğinde malzeme kalınlığı arttıkça geri yaylanma miktarının arttığı gözlemlenmiştir. Elastisite modülü arttıkça geri yaylanma miktarının değişmediği daha sonra ise azaldığı gözlemlenmiştir.

- Arka Araç Gövde Parçası_2 için yapılan sonlu elemanlar analizinde süzdürme çubuğu yarıçapının 4 mm olması minimum geri yaylanma için uygun olduğu kabul edilmiştir.

- Arka Araç Gövde Parçası_2 için malzeme kalınlığı ve elastisite modülünün geri yaylanma davranışları incelendiğinde malzeme kalınlığı arttıkça geri yaylanma miktarının arttığı gözlemlenmiştir. Elastisite modülünün geri yaylanmaya etkisi için 5 farklı elastisite modülünde değerleri ile sonlu elemanlar simülasyonu yapılmıştır. Elastisite modülü arttıkça sırasıyla geri yaylanma miktarının önce

azaldığı daha sonra sabit kaldığı gözlemlenmiştir. 220000 MPa ve 225000 MPa değerinde geri yaylanma miktarı artmıştır. Elastisite modülünün geri yaylanma miktarını arttırıp ya da azalttığı ile ilgili kesin bilgi verilememektedir.

- Orta Direk Parçası için elde edilen sonlu elemanlar simülasyon sonuçlarına göre form prosesinde meydana gelen geri yaylanma yüzeyi geri yaylanma telafi algoritması uygulanarak değiştirilmiştir. Telafi yüzeyi ile tekrardan sonlu elemanlar simülasyonu yapılmıştır. Geri yaylanma miktarı 1. bölgede azaltılarak uygun yüzey elde edilmiştir. Elde edilen yüzeyin kalıp yüzeyi olarak kullanılmasına karar verilmiştir.

- Orta Direk Parçası için malzeme kalınlığı ve elastisite modülünün geri yaylanma davranışları incelendiğinde malzeme kalınlığı artışının öncelikle geri yaylanma miktarını arttırdığı daha sonra malzeme kalınlığının 1,8 mm olduğunda geri yaylanma miktarının azaldığı gözlemlenmiştir. Elastisite modülü arttığında geri yaylanma miktarında artış görülmektedir.

- Kapı Kolu Parçası için elde edilen sonlu elemanlar simülasyon sonuçlarına göre çekme prosesinde meydana gelen geri yaylanma yüzeyi geri yaylanma telafi algoritması uygulanarak değiştirilmiştir. Telafi yüzeyi ile tekrardan sonlu elemanlar simülasyonu yapılmıştır. Geri yaylanma miktarı 1. ve 6. bölgede azaltılarak uygun yüzey elde edilmiştir. Elde edilen yüzeyin kalıp yüzeyi olarak kullanılmasına karar verilmiştir.

- Kapı Kolu Parçası için malzeme kalınlığı ve elastisite modülünün geri yaylanma davranışları incelendiğinde malzeme kalınlığı ve elastisite modülünün artışının geri yaylanma miktarını azalttığı gözlemlenmiştir.

- Zemin Üye Parçası sağ ve sol parça olmak üzere simetrik parçadır. Sonlu elemanlar simülasyonunda sadece sağ parça simüle edilerek simülasyon süresi kısaltılmıştır. Zemin Üye Parçası için elde edilen sonlu elemanlar simülasyon sonuçlarına göre form-bükme prosesinde meydana gelen geri yaylanma oldukça azdır. Sonlu elemanlar simülasyon sonuçlarına göre malzemede neredeyse hiç geri yaylanma görülmemiştir. Simülasyon sonuçlarına göre bu yüzeylerin kalıp yüzeyinde kullanılmasına karar verilmiştir.

-Zemin Üye Parçası için malzeme kalınlığı ve elastisite modülünün geri yaylanma davranışları incelendiğinde malzeme kalınlığının artışı geri yaylanma miktarını azaltmış daha sonra malzeme kalınlık artışına bağlı olarak geri yaylanma miktarında azalma gözlemlenmiştir. Elastisite modülünün artışına bağlı olarak geri yaylanma miktarında artış gözlemlenmiştir.

- [1] 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.
- [2] Andersson, A., Numerical and experimental evaluation of springback in a front side member, *Journal of Material Processing Technology*, 169, 352-356, 2005.
- [3] Gomes, C., Onipede, O., and Lovell, M., Investigation of springback in high strength anisotropic steels, *Journal of Materials Processing Technology*, 159, 91-98, 2005.
- [4] Zhang, D., Zhenshan, C., Xueyu, R., Yuqiang, L., An analytical model for predicting springback and side wall curl of sheet after U-bending, *Computational Materials Science*, 38, 707-15, 2007.
- [5] Behrouzi, A., Dariani, B. M., Shakeri M., Tool shape design in the sheet bending process by inverse analysis of springback, *Journal of Engineering Manufacture*, 223, 1331-1340, 2009.
- [6] Yi, H.K., Kim, D.W., Tyne, C.J., Moon, Y.H, Analytical prediction of springback based on differential strain during sheet metal bending, *Journal of Mechanical Engineering Science*, 222, 117-129, 2008.
- [7] Ruffini, R., Cao, J., Using Neural Network for Springback Minimization in Channel Forming Process, *Journals of Materials and Manufacturing*, 107, 6573, 1998.
- [8] Karabük, Farsi, M.A., Arezoo, B., The Determination of Spring-back in L Bending Operation Using Neural Networks, 5th International Advanced Technologies Symposium (IATS'09), 2009.
- [9] Narasimhan, N.,and Lovell, M.R., Predicting springback in sheet metal forming: an explicit to implicit sequential solution procedure, *Finite Elements in Analysis and Design*, 33, 29-42, 1999.
- [10] Leu, D.K., Simplified Approach for Evaluating Bend Ability and Springback in Plastic Bending of Anisotropy Sheet Metals, *Journal of Materials Processing Technology*, 66, 9-17, 1997.
- [11] Li, G.Y., Tan, M.J., and 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*, 36, 4653-4668, 19999.
- [12] 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.
- [13] Firat, M., U-channel forming analysis with an emphasis on springback deformation, *Materials and Design*, 28, 147-154, 2007.

- [14] Liu, G., Lin, Z., Bao, Y., Cao, J., Eliminating Springback Error in U-Shaped Part Forming by Variable Blank Holder Force, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 11, 64-70 , 2002.
- [15] Chou, I.-N., Hung, C., Finite element analysis and optimization on springback reduction, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 39, 517– 536, 1999.
- [16] Gan, W., Wagoner, R.H., Die design method for sheet springback, *International Journal of Mechanical Sciences*, 46, 1097–1113, 2004.
- [17] Lulea, Arwidson, C., Numerical Simulation of Sheet Metal Forming for High Strength Steels, Licentiate Thesis, Lulea University of Technology, Sweden, 2005.
- [18] Chan, K.C., Wang, S.H., Theoretical analysis of springback in bending of integrated circuit lead frames, *Journal of Materials Processing Technology*, 91, 111–115, 1999.
- [19] İstanbul, Cinar, G., Effects of anisotropy on formability in sheet metal forming, Master Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2005.
- [20] Oxford, Marciniak, Z., Duncan, J.L., Hu, S.J., *Mechanics of Sheet Metal Forming*, Butterworth-Heinemann, Linacre House, Jordan Hill, 1998.
- [21] Worswick, M.J., Finn, M.J., The Numerical Simulation of Stretch Flange Forming, *International Journal of Plasticity*, 16, 701-720, 2000.
- [22] Padmanabhan, R., Effect of anisotropy on the deep-drawing of mild steel and dual-phase steel tailor-welded blanks, *Journal of Material Processing Technology*, 184, 288–293, 2007.
- [23] Ohio, Lumin G., Application of Plastic Anisotropy and Non-Isotropic Hardening to Springback Prediction, Doktora Tezi, The Ohio State University, Columbus, 2000.
- [24] Hill, R., A Theory of the Yielding and Plastic Flow of Anisotropic Metals, *Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Volume 193, Issue 1033, 281-297, 1998.
- [25] London, Dixit, P.M., Dixit, U.S., *Modeling of metal forming and machining process: by Finite Element and Soft Computing Methods*, Springer-Verlag, 226230, 2008.
- [26] Barlat, F., Maeda, Y., Chung, K., Yanagawa, M., Brem, J.C., Hayashida, Y., Lege, D.J., Matsui, K., Murtha, S.J., Hattori, S., Becker, R.C., Makosey, S., Yield function development for aluminum alloy sheets. *J. Mech. Phys. Solids*, 45, 1727–1763, 1997.
- [27] Barlat, F., Brem, J.C., Yoon, J.W., Chung, K., Dick, R.E., Lege, D.J., Pourboghrat, F., Choi, S.-H., Chu, E., Plane Stress Yield Function for Aluminum Alloy Sheets- Part1: Theory, *International Journal of Plasticity*, 19, 1297-1319, 2003.

- [28] Lemoine, X., Aouafi, A., Bauschinger effect correspondence of experimental tests, *International Journal of Material Forming*, 1, 241-244, 2008.
- [29] Gau, J.-T., Kinzel, G.L., An experimental investigation of the influence of the Bauschinger effect on springback predictions, *Journal of Materials Processing Technology*, 108, 369-375, 2001.
- [30] Montreal, Ragai, I., Experimental and finite element investigation of springback of aerospace/automotive sheet metal products, *Doktora Tezi*, McGill University, 2006.
- [31] Tang, B., Lu, X., Wang, Z., Zhao, Z., (2010) Springback investigation of anisotropic aluminum alloy sheet with a mixed hardening rule and Barlat yield criteria in sheet metal forming, *Materials and Design* 31, 2043–2050.
- [32] New York, Wagoner, R.H., Chenot, J.L., *Metal Forming Analysis*, Cambridge University Press, 2001.
- [33] Prior, A.M., Applications of Implicit and Explicit Finite Element Techniques to Metal Forming, *Journal of Material Processing and Technology*, 45, 649-656, 1994.
- [34] Karafillis A.P., Boyce M.C., Tooling And Binder Design For Sheet Metal Forming Processes Compensating Springback Error, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 36, 503-526, 1996.
- [35] Papeleux, L., Ponthot, J.P., Finite element simulation of springback in sheet metal forming, *Journal of Materials Processing Technology*, 125-126, 785-791, 2002.
- [36] Li, K.P., Carden, W.P., Wagoner, R.H., Measurement of springback, *International Journal of Mechanical Sciences* 44, 103–122, 2002.
- [37] Finn M.J., Galbraith P.C., Wu L., Hallquist J.O., Lum L., Lin T.L., Use of coupled explicit – implicit solver for calculating springback in automotive body panels, *Journal of Material Processing and Technology*, 50, 395-409, 1995.
- [38] Foecke, T., Gnaeupel–Herold, T. Robustness of the sheet metal springback cup test. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 37A, p. 3503–3510. p 1097–1113, 2006.
- [39] R. Lingbeek, J. Hue ´tink, S. Ohnimus, M. Petzoldt, and J. Weiher, The Development of a Finite Elements Based Springback Compensation Tool for Sheet Metal Products, *J. Manuf. Prod. Technol.*, in press.
- [40] <http://www.dynasupport.com/faq/metal-forming/what-is-the-roperpunchspeed- that-could-be-used>,
- [41] <http://li.mit.edu/Stuff/RHW/Upload/49.pdf>.
- [42] http://imim.pl/files/archiwum/Vol4_2009/38.pdf.
- [43] https://www.researchgate.net/publication/322570319_Design_And_Analysis_O f _A _Spring _Back _Effect _In _Sheet _Metal _Forming.

- [44] https://www.researchgate.net/publication/261709136_SPRINGBACK_REDUCTION_IN_SHEET_METAL_BENDING_PROCESS.
- [45] https://www.researchgate.net/publication/238197534_Springback_Compensation_of_Sheet_Metal_Bending_Process_Based_on_DOE_ANN.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

İletişim Bilgisi: bakia@toyotetsu.com.tr

Konferans Bildirileri

1. Baki, Ali. Boğoçlu, M., (2019)., ‘Examination of the Springback Parameters for Automotive Bodypart with Finite Element Simulation (International of Mechanical and Production Engineering) Academic SERA 2018.