

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

**SAC LEVHALARIN ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİĞİNE
ETKİ EDEN DEĞİŞKENLİKLERİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Mak. Yük. Müh. Osman Hamdi METE

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : MAKİNA TASARIM VE İMALAT

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Mehmet FIRAT

Temmuz 2007

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

**SAC LEVHALARIN ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİĞİNE ETKİ
EDEN DEĞİŞKENLİKLERİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Mak. Yük. Müh. Osman Hamdi METE

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜH.

Enstitü Bilim Dalı : MAKİNA TASARIM VE İMALAT

Bu tez 09 / 07 /2007 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof.Dr.Ümit KOCABIÇAK
Jüri Başkanı

Doç.Dr.Fehmi ERZİNCANLI
Üye

Doç.Dr.Babür ÖZÇELİK
Üye

Yrd.Doç.Dr.Mehmet FIRAT
Üye

Yrd.Doç.Dr. Ahmet ÖZEL
Üye

TEŞEKKÜR

Doktora sürecinde danışman hocam, Yrd. Doç.Dr. Mehmet Fırat, sahip olduğu bilginin yanı sıra sabrını da benden hiçbir zaman esirgememiştir. Çalışmalarımız boyunca sadece bilim alanında değil; tarih, toplum ve felsefe üzerine de engin bilgiye sahip olduğunu defalarca sergilemiştir. Kendisine şükranlarımı sunarım. Değerli hocam, Prof.Dr. Ümit Kocacıçak'ın Lisans döneminden başlayan destekleri olmasaydı bu tezin ortaya çıkması mümkün olmayacaktı. Kendisine, üzerimdeki emeklerine, olumlu eleştirilerine ve tez çalışmamdaki değerli katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Doç.Dr. Fehmi Erzincanlı ve Doç.Dr. Babür Özçelik'in tez çalışmamdaki eksik noktaların belirlenmesi ve düzeltilmesi sürecinde göstermiş oldukları destek ve ilgiden dolayı kendilerine teşekkürlerimi sunarım.

Bu tezde kullanılan endüstriyel uygulama konusundaki destek ve yardımlarından dolayı Ford Otosan çalışanlarından; başta Orhan Eser olmak üzere Fatih Önhon ve Orhan Çiçek'e teşekkür ederim.

Yrd. Doç.Dr. Murat Özsoy bana sürekli moral vermiştir, tezin eksikliklerinin ortaya çıkarılması ve düzeltilmesi konusunda katkısı büyüktür. Kendisine maddi manevi desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Her koşulda bana verdikleri maddi ve manevi desteklerinden dolayı, bu hayatta sahip olduğum en büyük değer olan aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Arş.Gör. Osman Hamdi METE

Temmuz 2007 SAKARYA

İÇİNDEKİLER

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

BÖLÜM 1.

GİRİŞ.....	1
1.1. Literatür Araştırması	3
1.2. Tezin Amacı ve Kapsam	6
1.3. Çalışmanın Ana Hatları	6

BÖLÜM 2.

SONLU ELEMENLAR YAKLAŞIMI	8
2.1. Benzetim Yöntemi	8
2.2. Şekillendirme Hesaplaması	11
2.2.1. SE elastik – plastik kabuk eleman formülasyonu	13
2.2.2. Malzeme bilgisinin elde edilmesi	16
2.2.3. Barlat – Lian akma fonksiyonu	19

2.2.4. Sınır şartları ve kabuller.....	22
2.3. Şekillendirme Sonuçları	22
2.4. Geri Esneme Hesaplaması.....	23
2.5. Geri Esneme Sonuçları.....	25

BÖLÜM 3.

BENZETİM MODELİNİN VE TEKNİĞİNİN ETKİLERİNİN İRDELENMESİ ...	26
3.1. U-kanal SE Benzetim Modeli	26
3.2. Şekillendirme Hesaplamaları Sonuçları	32
3.2.1. Omuz bölgesinde 4 eleman için şekillendirme sonuçları	32
3.2.2. Omuz bölgesinde 8 eleman için şekillendirme sonuçları	34
3.2.3. Omuz bölgesinde 12 eleman için şekillendirme sonuçları	35
3.3. Geri Esneme Sonuçları.....	36
3.3.1. Yan duvar üzerindeki eğriselliğin geri esneme deformasyonuna etkisi	37
3.3.2. Şekillendirme hızının geri esneme deformasyonlarına etkisi	38
3.3.3. Eleman büyüklüğünün geri esneme deformasyonlarına etkisi ...	40

BÖLÜM 4.

KANAL ÇEKME İŞLEMİNE ETKİ EDEN PROSES PARAMETRELERİ.....	44
4.1. Sürtünme Katsayısının Etkisi	44
4.2. Pot Çemberi Baskı Kuvvetinin Etkisi	62

BÖLÜM 5.

BENZETİM YÖNTEMİNİN PROSES TASARIMINDA UYGULANMASI	70
5.1. Motor Traversi Üst parçası.....	70
5.2. Motor Traversi SE Benzetimi	72

5.3. Şekillendirmeye Etki Eden Proses Parametreleri.....	73
5.4. Sayısal Yaklaşım ile Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması	82
BÖLÜM 6.	
SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	87
6.1. Sonuçların Değerlendirilmesi.....	87
6.2. Öneriler	90
KAYNAKLAR	91
EKLER	94
EK-A Elastik Modül Değişkenliğinin Geri Esnemeye Etkisi	94
EK-B Geri Esneme Hesaplaması Öncesi Ve Sonrasındaki Levha Üzerindeki Gerilme, Gerinim Dağılımları	97
ÖZGEÇMİŞ	106

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

σ	: Gerilme
σ_y	: Akma gerilmesi
ε	: Gerinim
ε^p	: Plastik gerinim
ε^e	: Elastik gerinim
τ	: Kayma gerilmesi
ρ_0	: Malzemenin yoğunluğu
ν	: Poisson oranı
θ_1	: Geri esnemedede yan duvar açısı
θ_2	: Geri esnemedede flanş açısı
ρ	: Geri esnemedede yan duvar eğrisinin yarıçapı
ρ_0	: Geri esnemedede yan duvar eğriselliği
μ	: Sürtünme katsayısı
$\hat{e}_1, \hat{e}_2, \hat{e}_3$	: Kartezyen koordinat sisteminde birim vektörler
a, c, h, f	: Anizotropik malzeme parametreleri
bk	: Pot çemberi baskı kuvveti
c	: Malzeme içindeki ses hızı
CMM	: Dijital koordinat ölçme cihazı
E	: Elastik modül
es	: U-kanal SE ağ yapısında omuz bölgesindeki eleman sayısı
F_{N1}, F_{N2}	: Sürtünme mekanizmasındaki normal kuvvetler

K	: Pekleşme katsayısı
L	: SE ağ yapısındaki en küçük eleman
$M1$	: Geri esnemenin en çok oluştuğu SE modeli
$M9$	: Geri esnemenin en az oluştuğu SE modeli
n	: Pekleşme üsteli
N	: SE ağında omuz bölgesine düşen eleman sayısı
p	: Süzdürme çubukları için batma miktarı
p_1, p_2	: S1 ve S2 süzdürme çubuklarının batma miktarları
R	: U-kanal yan duvar eğriselliği
R_{00}, R_{45}, R_{90}	: Lankford parametreleri
$S1, S2$	: Süzdürme çubukları
t_0	: Sac levha kalınlığı
v	: Şekillendirme hızı

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Şekillendirme ve geri esneme hesaplamasında izlenen yol	11
Şekil 2.2.	Ürün haline gelmiş parça (a), yüzeyin geliştirilmesi ile elde edilen kaynak yüzey (b)	12
Şekil 2.3.	Şekillendirme benzetimleri için hazırlanan kalıp yüzeyleri.....	13
Şekil 2.4.	BT kabuk elemanı düğüm noktaları ve eleman koordinat sistemi	15
Şekil 2.5.	BT kabuk elemanı için beş katmanda sadeleştirilmiş (a) ve yedi katmanda tam çözüm (b) için hesaplama noktaları.....	15
Şekil 2.6.	Şekillendirme benzetimleri için hazırlanan ağ yapıları ve omuz bölgesi detayı.....	16
Şekil 2.7.	Sac malzeme üzerinden alınan deney numuneleri	17
Şekil 2.8.	Yüksek mukavemetli bir sac levhadan elde edilen gerilme – gerilme değerleri.....	17
Şekil 2.9.	Ortalama plastik gerilim-gerinim eğrisi ile farklı iki K ve n değerlerine sahip eğriler	18
Şekil 2.10.	Şekillendirme sonunda elde edilen eşdeğer von Mises gerilme dağılımı	22
Şekil 2.11.	Şekillendirme sonunda elde edilen şekillendirme kuvveti değişimi	23
Şekil 2.12.	Geri esneme hesaplamasında taslak üzerinde sınırlandırma yapılan düğüm noktaları	24
Şekil 2.13.	Geri esneme hesaplaması sonrasındaki eşdeğer von Mises gerilme dağılımı	25
Şekil 2.14.	Şekillendirme ve geri esneme sonrasındaki parça geometrisi.....	25
Şekil 3.1.	U Kanal şekillendirme geometrisi.....	27

Şekil 3.2. U Kanal malzemesi için gerilme - gerinim grafiği.....	28
Şekil 3.3. U kanal geometrisi için elde edilen kalıp yüzeyleri	28
Şekil 3.4. Omuz bölgesine düşen eleman sayısına göre eleman büyüklüğü	29
Şekil 3.5. Erkek kalıp hızının zamana bağlı değişimi	30
Şekil 3.6. Omuz bölgesinde 4 eleman için hızlara göre von Mises eşdeğer gerilme dağılımı. (a): 1000mm/s, (b):4000mm/s, (c): 10000mm/s	33
Şekil 3.7. Omuz bölgesinde 4 eleman için hızlara göre gerekli şekillendirme kuvvetleri.....	33
Şekil 3.8. Omuz bölgesinde 8 eleman için hızlara göre von Mises eşdeğer gerilme dağılımı. (a): 1000mm/s, (b):4000mm/s, (c): 10000mm/s	34
Şekil 3.9. Omuz bölgesinde 8 eleman için hızlara göre gerekli şekillendirme kuvvetleri.....	34
Şekil 3.10. Omuz bölgesinde 12 eleman için hızlara göre von Mises eşdeğer gerilme dağılımı. (a): 1000mm/s, (b):4000mm/s, (c): 10000mm/s	35
Şekil 3.11. Omuz bölgesinde 12 eleman için hızlara göre gerekli şekillendirme kuvvetleri.....	35
Şekil 3.12. Geri esneme miktarının hesaplanma şekli	36
Şekil 3.13. Geri esneme hesaplaması öncesindeki sac malzeme üzerinde X yönündeki yerdeğişim	37
Şekil 3.14. Yan duvar üzerindeki eğriselliğin ölçüm bölgesi.....	38
Şekil 3.15. Omuzda 4 eleman bulunan model için geri esneme miktarının farklı hızlardaki durumu	38
Şekil 3.16. Omuzda 8 eleman bulunan model için geri esneme miktarının farklı hızlardaki durumu	39
Şekil 3.17. Omuzda 12 eleman bulunan model için geri esneme miktarının farklı hızlardaki durumu	39
Şekil 3.18. Şekillendirme hızı 1000mm/s için eleman büyüklüklerine göre geri esneme miktarları	40

Şekil 3.19. Şekillendirme hızı 4000mm/s için eleman büyüklüklerine göre geri esneme miktarları	40
Şekil 3.20. Şekillendirme hızı 10000mm/s için eleman büyüklüklerine göre geri esneme miktarları	41
Şekil 3.21. Geri esneme açılarının şekillendirme hızı ve eleman sayısına bağlı grafikleri	42
Şekil 4.1. Omuz bölgesinde 4 eleman bulunan, sürtünme katsayısı 0.06 olan model için farklı hızlara göre şekillendirme kuvvetinin değeri	45
Şekil 4.2. Çekme sırasında bükmenin gerçekleşmesi ve yan duvar oluşumu	46
Şekil 4.3. Sac malzemin omuz bölgesinden geçişi sırasında hesaplanan farklı sürtünme kuvvetleri.....	47
Şekil 4.4. Omuz bölgesinde 8 eleman bulunan, sürtünme katsayısı 0.06 olan model için farklı hızlara göre şekillendirme kuvvetinin değeri	47
Şekil 4.5. Omuzdaki bölgesinde 4 eleman bulunan ve sürtünme katsayısı 0.06 olan modelde farklı şekillendirme hızlarına göre geri esneme miktarları.....	49
Şekil 4.6. Omuzdaki bölgesinde 8 eleman bulunan ve sürtünme katsayısı 0.06 olan modelde farklı şekillendirme hızlarına göre geri esneme miktarları.....	49
Şekil 4.7. Omuz bölgesinde 12 eleman bulunan, sürtünme katsayısı 0.06 olan model için farklı hızlara göre şekillendirme kuvvetinin değeri	50
Şekil 4.8. Omuzdaki bölgesinde 12 eleman bulunan ve sürtünme katsayısı 0.06 olan modelde farklı şekillendirme hızlarına göre geri esneme miktarları.....	51
Şekil 4.9. Omuzdaki bölgesinde 12 eleman bulunan ve sürtünme katsayısı 0.06 olan modelde kanal yan duvar kesitinin farklı şekillendirme hızlarına göre değişimi (X-X kesitleri)	51
Şekil 4.10. Omuz bölgesinde 4 eleman bulunan, sürtünme katsayısı 0.144 olan model için farklı hızlara göre şekillendirme kuvvetinin değeri	52
Şekil 4.11. Omuzdaki eleman büyüklüğü 4 ve sürtünme katsayısı 0.144 olan modelde farklı şekillendirme hızlarına göre geri esneme miktarları.....	53

Şekil 4.12. Omuzdaki bölgesinde 4 eleman bulunan ve sürtünme katsayısı 0.144 olan modelde kanal yan duvar kesitinin farklı şekillendirme hızlarına göre değişimi (Q-Q kesitleri)	54
Şekil 4.13. Omuz bölgesinde 8 eleman bulunan, sürtünme katsayısı 0.144 olan model için farklı hızlara göre şekillendirme kuvvetinin değeri	54
Şekil 4.14. Omuzdaki eleman büyüklüğü 8 ve sürtünme katsayısı 0.144 olan modelde farklı şekillendirme hızlarına göre geri esneme miktarları.....	55
Şekil 4.15. Omuzdaki eleman büyüklüğü 12 ve sürtünme katsayısı 0.144 olan modelde farklı şekillendirme hızlarına göre geri esneme miktarları.....	56
Şekil 4.16. Sabit 1000mm/s şekillendirme hızında yan duvar açısının sürtünme katsayısı ve eleman büyüklüğüne bağlı olarak değişimi	58
Şekil 4.17. Sabit 1000mm/s şekillendirme hızında flanş açısının sürtünme katsayısı ve eleman büyüklüğüne bağlı olarak değişimi	59
Şekil 4.18. Omuz bölgesinde sekiz eleman bulunan modelde yan duvar açısının sürtünme katsayısı ve şekillendirme hızına bağlı olarak değişimi	60
Şekil 4.19. Omuz bölgesinde sekiz eleman bulunan modelde flanş açısının sürtünme katsayısı ve şekillendirme hızına bağlı olarak değişimi	61
Şekil 4.20. Kalibre edilmiş modelde 1960N baskı kuvveti altında farklı sürtünme katsayılarına göre şekillendirme kuvvetleri.	62
Şekil 4.21. Şekillendirme işleminin son safhasında oluşan dövme bölgesi	63
Şekil 4.22. Kalibre edilmiş modelde 1960N baskı kuvveti altında geri esneme deformasyonları.....	63
Şekil 4.23. Kalibre edilmiş modelde 1960N baskı kuvveti altında kanal yan duvar kesitinin farklı sürtünme katsayılarına göre değişimi (K-K kesitleri).....	64
Şekil 4.24. Kalibre edilmiş modelde 19600N baskı kuvveti altında şekillendirme kuvvetleri.....	64
Şekil 4.25. Kalibre edilmiş modelde 19600N baskı kuvveti altında geri esneme deformasyonları.....	65

Şekil 4.26. Kalibre edilmiş modelde 19600N baskı kuvveti altında kanal yan duvar kesitinin farklı sürtünme katsayılarına göre değişimi (L-L kesitleri).	66
Şekil 4.27. Kalibre edilmiş modelde 37240N baskı kuvveti altında şekillendirme kuvvetleri.....	66
Şekil 4.28. Kalibre edilmiş modelde 37240N baskı kuvveti altında geri esneme deformasyonları.....	67
Şekil 4.29. Kalibre edilmiş modelde yan duvar açısının pot çemberi baskı kuvveti ve sürtünme katsayısına bağlı olarak değişimi	68
Şekil 4.30. Kalibre edilmiş modelde flanş açısının pot çemberi baskı kuvveti ve sürtünme katsayısına bağlı olarak değişimi	69
Şekil 5.1. Motor traversi üst parçası ürün hali ve yüzey modeli	71
Şekil 5.2. Motor bağlama traversi üst parçasını üreten tek tesirli çekme kalıbı.....	71
Şekil 5.3. Motor bağlama traversi üst parçası için benzetim modeli (ağ yapısı).....	73
Şekil 5.4. Süzdürme çubuğu şematik gösterimi	74
Şekil 5.5. Süzdürme çubuğunun fiziksel şekli ve eşdeğer süzdürme çubuğunun şematik gösterimi	75
Şekil 5.6. Süzdürme çubuklarının pot çemberi üzerindeki konumları	75
Şekil 5.7. M1 ve M9 hesaplama modellerinde parça boyunca elde edilen bükme momenti dağılımı	78
Şekil 5.8. M1 ve M9 hesaplama modellerinde kesit boyunca elde edilen bükme momenti dağılımı	80
Şekil 5.9. %18 incelme için; baskı kuvvetinin süzdürme çubukları batma miktarlarına göre değişimi	81
Şekil 5.10. 80 ton baskı kuvveti için sac malzemedeki incelme ve geri esneme deformasyonlarının süzdürme çubukları batma miktarlarına göre değişimi	82
Şekil 5.11. Motor traversi üst parçası üzerinde sac kalınlığı incelenecek 20 nokta..	83

Şekil 5.12. Motor traversi üst parçası üzerindeki 20 noktadaki sac kalınlığı bilgisi için SE yaklaşımları	83
Şekil 5.13. Motor traversi üst parçası üzerindeki karşılaştırma yapılacak kesitler ...	84
Şekil 5.14. Kesitlerdeki yer değıştirme miktarının ölçüm cihazı (CMM) ile elde edilen dağılımı.....	85
Şekil 5.15. Kesitlerdeki yer değıştirme miktarının SE yöntemi ile elde edilen dağılımı	85

TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1	Omuz bölgesindeki eleman sayısı ile ağ yapısının durumu	29
Tablo 3.2.	Omuz bölgesindeki eleman sayısı ile minimum eleman büyüklükleri ...	29
Tablo 3.3	Seçilen iki değişkenin alacağı değerler	30
Tablo 3.4.	Açık zamana bağlı hesaplama süreleri	31
Tablo 3.5.	Geri esneme ölçümleri	41
Tablo 3.6.	Fonksiyon kullanılarak elde edilen ve Hesaplanan yan duvar açısı (Θ_1)	43
Tablo 3.7.	Fonksiyon kullanılarak elde edilen ve Hesaplanan flanş açısı (Θ_2)	43
Tablo 4.1.	Sürtünme katsayısı 0.06 olması durumunda geri esneme ölçümleri	48
Tablo 4.2.	Sürtünme katsayısı 0.144 olması durumunda geri esneme ölçümleri	56
Tablo 4.3.	Eleman sayısı ve sürtünme katsayısına bağlı olarak hesaplanan yan duvar açısı ve farklı regresyon yöntemlerine göre sonuçlar	57
Tablo 4.4.	Şekillendirme hızı ve sürtünme katsayısına bağlı olarak hesaplanan yan duvar açısı ve farklı regresyon yöntemlerine göre sonuçlar	59
Tablo 4.5.	Pot çemberi baskı kuvveti ve sürtünme katsayısına bağlı olarak hesaplanan geri esneme deformasyon sonuçları ve oluşturulan matematiksel model çıktıları	68
Tablo 5.1.	HSLA350 çeliği için üç yöndeki çekme testi verileri	72
Tablo 5.2.	Baskı kuvveti ve süzdürme çubuklarının batma miktarına göre elde edilen şekillendirme ve geri esneme sonuçları	76

ÖZET

Anahtar Kelimeler: Sac metal, Proses tasarımı, SE yaklaşımı, şekillendirme ve geri esneme

Sac parçaların şekillendirme yoluyla imalatında en önemli adım şekillendirme işleminin belirlenmesi ve parça üretimini sağlayacak kalıpların yapılmasıdır. Bundan dolayı, kalıpların üretiminden önce işlem ve kalıp tasarımının belirlenmesi maliyeti direk etkileyen çok önemli iki aşamadır. Gelişen bilgisayar ve mühendislik teknolojileri, bu iki aşamanın bilgisayar ortamında benzetiminin yapılabilmesine ve maliyetlerin azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Günümüzde üretim süreçlerinin benzetiminde kullanılan analitik yaklaşımların başında Sonlu Elemanlar Yöntemi gelmektedir.

Bu çalışmada amaç; SE yöntemini belli bir sistematik içinde kullanarak, endüstriyel bir sac parçasının proses tasarımında etkin bir yöntem geliştirmektir. Bu kapsamda kullanılan mühendislik yaklaşımlarında yapılan kabullerin ve benzetim parametrelerinin hesaplama sonuçlarına ne derecede etki ettiğinin bilinmesi gerekmektedir. Bu nedenle çalışmada ilk olarak, kullanılması düşünülen yöntem ve mühendislik yaklaşımı hakkında temel bilgiler verilmiştir. Daha sonra seçilen şekillendirme parametrelerine bağlı olarak, şekillendirme ve sonrasında oluşan geri esneme deformasyonlarının sonuçlar üzerindeki etkisini incelenebilmesi için U-kanal çekme modeli kullanılmıştır. Çalışmanın bu kısmında yöntemin uygulanma şeklinden kaynaklanan değişkenlikler ve fiziksel sürecin tanımlanmasında ihtiyaç duyulan parametreler birbirinden bağımsız olarak incelenmiştir.

Önerilen mühendislik yaklaşımı seçilen endüstriyel bir sac parça üzerinde uygulanmıştır. Bu uygulamada amaç, şekillendirme prosesine etki eden baskı kuvveti ve süzdürme çubuklarının batma miktarlarındaki değişkenliğin, şekillendirme ve geri esneme sonuçlarına etkilerini belirleyerek en uygun benzetim parametrelerini tespit etmektir. Öngörülen parametre değişkenlikleri ortogonal tablo oluşturularak incelenmiş ve geliştirilen cevap yüzey fonksiyonları proses tasarımında karar verilmesi gereken en uygun parametre değerlerinin tespit edilmesinde kullanılmıştır. Tespit edilen proses parametreleri ile yapılan hesaplama sonuçlarının tatmin edici seviyede olduğu görülmüştür.

AN ANALYSIS OF PROCESS AND MODELLING PARAMETERS IN SHEET METAL FORMABILITY

SUMMARY

Keywords: Sheet Metal, Process design, FE method, formability and springback

The most important step for manufacturing of the sheet metal parts by means of stamping technology is to determine the optimum process conditions and to construct stamping dies which provide the production of such sheet metal parts. Therefore, the determination of the die process and design prior to the production of the dies, are very significant two stages that directly affect the manufacturing cost. Developing computer and engineering technologies contribute significantly to make the simulation of these stages with computers and also to the reduction of the costs. Finite Elements Method is one of the primary analytical approaches that are used for the simulation of production period for the time being.

The aim of this study is to develop an effective method for the process design of the industrial sheet metal part by using FE method systematically. Therefore, it is necessary to know the level of effect of simulation parameter and assumptions in an engineering approach to computational results. Primarily, some basic information was given about the method and engineering approach considered to be used in the study. Then, in relation to the chosen stamping parameters, U-channel model has been used for examining the effects upon the results of the springback deformations that occur during stamping and thereafter. In this part of the study, the variabilities that originate from the mode of application method and the parameters that are needed for describing the physical process have been separately examined.

The proposed engineering approach has been applied in the process and tooling designs of the chosen the industrial sheet metal part. The objective of this section is to determine the blank holder force's effect that affects stamping process and drawbeads penetration quantity's variability's effect upon stamping and springback results and also determine the most suitable simulation parameters. Predicted parameter variabilities have been examined by doing an orthogonal design table. The calculated response surface functions have been used in order to determine the most appropriate parameters in process design. Determined process parameters and calculated results have been found satisfactory.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Otomotiv endüstrisi yıllardır dünya ekonomik ve sosyal yapılanmasını etkileyen en önemli sektör olmuş ve bu özelliğini günümüzde de sürdürmektedir. Araç üretiminde karşılaşılan problemlerin, günümüz rekabet ortamında en etkin yollarla çözülmesi beraberinde pek çok teknolojik ve bilimsel gelişimin ortaya çıkması için itici güç oluşturmaktadır. Günlük hayatta kullanılan bir binek aracın ortalama 4000 kadar mekanik elemandan oluştuğu dikkate alındığında [1], bu ihtiyaçların ne denli karmaşık üretim ve montaj süreçlerini içerdiği ortaya çıkar. Diğer taraftan bir aracı oluşturan ana taşıyıcı ve gövde sisteminde kullanılan sac levha malzemelerin şekillendirme işlemleri ve bu amaçla kullanılan kalıp ve imalat ekipmanlarının çeşitliliği bu alanda sürekli olarak gelişme ihtiyacını ortaya çıkarmaktadır. Sac parçaların şekillendirme yoluyla imalatında en önemli adım şekillendirme işleminin belirlenmesi ve nihai parça üretimini sağlayacak kalıp ekipmanlarının yapılmasıdır. Bu çerçevede işlem belirleme ve kalıp tasarımının uygunluğu; imalat ekipmanının üretiminden önce yapılması gereken ve tüm sürecin maliyetini etkileyen çok önemli iki aşamadır. Günümüzde gelişen bilgisayar ve mühendislik tasarım/hesaplama teknolojileri, bu iki aşamanın sanal ortamda gerçekleştirilebilmesine ve maliyetlerin azaltılmasına büyük ölçüde katkı sağlamaktadır.

Otomotiv endüstrisinde üretilmesi planlanan bir sac parçanın üretimi için çoğu zaman birden fazla işlem adımına ve her bir işlem adımı için farklı kalıp ve imalat ekipmanlarına ihtiyaç duyulur. Parçanın üretim planı yapılırken şekillendirmenin niteliği ve şekillendirme sonrasında yapılması gereken işlem adımlarının içeriği ve sayısı belirlenir. Şekillendirme adımında, çekme, derin çekme ya da sıvama gibi farklı soğuk şekillendirme yöntemlerinden hangisinin kullanılacağı kararlaştırılmalı ve bu yönteme bağlı olarak şekillendirme ve sonrasındaki imalat adımları için yapılması planlanan kalıpların imalatı yapılmalıdır. Şekillendirmede kullanılacak yöntem, parçanın nihai geometrisinden yola çıkılarak tüm işlem adımlarını üzerinde

taşıyan geometrinin oluşturulması (yüzey geliştirme süreci) işlem tasarım sürecinde belirlenmelidir. Yüzey geliştirme işlemi; hem imalat tecrübelerine ihtiyaç duyulan hem de her bir parça için farklı problemleri beraberinde getiren bir süreçtir. Bundan dolayı bu işlemlerin bilgisayar ortamında yapılması, tasarım süreci içinde verilen kararların sonuçlara etkileri hakkında bilgi sahibi olunması açısından büyük kolaylıklar sağlamaktadır. İşlem tasarım sürecinde belirlenen işlem adımları da şekillendirme ve daha sonraki kesme, bükme, delme ve ütüleme adımlarının sayısını ortaya çıkarmış olur. İşlem tasarımı tamamlanmış olan bir parça için kullanılacak olan kalıp ve imalat ekipmanları da bu şekilde imalat sırasındaki görevlerine göre; çekme kalıbı, kesme kalıbı, delme kalıbı gibi gruplara ayrılmış olur [2].

Sac levhaların şekillendirilmesi sırasında karşılaşılan şekilsel bozukluklar; yüzey kalitesi, sacda meydana gelebilecek buruşmalar ya da yırtılmalar imalat sürecinin tasarımı esnasında giderilmesi gereken problemlerdir. Başarılı olarak yapılmış bir şekillendirme işleminden sonra karşılaşılan diğer bir problem ise; şekillendirilmiş parça geometrisi üzerinde bulunan elastik yer değişimlerinin, şekillendirmeyi sağlayan yüklemenin kaldırılması ile parçanın şekillendirme yönünün aksine yer değişimi göstermesidir. Geri esneme olarak adlandırılan bu durum, sac parçaların şekillendirme işleminin ardından oluşan, çoğu zaman istenmeyen ya da oluşması halinde değerinin bilinmesi istenen bir problemdir. Bu problemlerin giderilmesi noktasında en sık karşılaşılan yöntem bilgisayar ortamında yapılan benzetimlerdir. İmalat sırasındaki şekillendirme işleminin tam karşılığı hiçbir zaman bilgisayar ortamında modellenememektedir. Bunun sebebi, yapılan benzetimlerde kullanılan analitik yöntemlerin bir takım kabullere dayandırılmasından kaynaklanmaktadır. Günümüzde üretim sürecinde bu problemlerin giderilebilmesi veya en aza indirilmesi için kullanılan analitik yöntemlerin başında Sonlu Elemanlar (SE) gelmektedir. Bu yöntemde de yapılan kabuller ve fiziksel süreci ifade etmek için yapılan yaklaşım tekniklerinin beraberinde getirdiği hatalar, hesaplama sonuçlarına etki etmektedir.

Sac levhaların şekillendirilmesini konu alan literatürde daha önceki dönemlerde, gerek akademik gerek endüstriyel anlamda sac şekillendirme ve geri esneme hesaplamalarının Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ile bilgisayar ortamında yapılmış olduğu görülmüştür. Bu tez çalışmasında; yapılması planlanan bilgisayar

benzetimlerine ışık tutması ve yöntemin uygulanma şeklinin belirlenebilmesi açısından, sac metal şekillendirme literatüründe yer alan benzer çalışmalar incelenmiştir.

1.1. Literatür Araştırması

Daha önceki dönemde yapılan çalışmalar incelendiğinde sac malzemelerin şekillendirilmesinin bilgisayar benzetimlerinde kullanılmış farklı SE metotlarının olduğu, benzer çalışmalarda farklı sayısal modelleme yaklaşımların sergilendiği gözlenmiştir.

Rebelo ve arkadaşları [3], sonlu elemanlar yöntemi kullanarak silindirik ve kübik kapların şekillendirilmesi için benzetimler yapmışlardır. Kullandıkları alüminyum alaşımlı çelik malzeme yönden bağımsız olarak kabul edilmiştir. Kalıp elemanları ile sac malzeme arasında sürtünme tanımlanmıştır. Süzdürme çubukları da hesaba dahil edilmiş ve elde edilen sonuçlar ile bu yöntemin sac şekillendirme hesaplamalarında kullanılabilirliğine dikkat çekilmiştir.

Karafillis ve Boyce [4], yüksek ve düşük akma değerlerine sahip iki ayrı malzeme davranışı için şekillendirme ve geri esneme hesaplamalarını iki boyutlu modeller kullanarak yapmışlardır. Geri esneme hata miktarlarını değerlendirerek tekrarlı hesaplama yöntemi ile doğru parçayı oluşturacak kalıp yüzeylerini elde etmeye çalışmışlardır. Yine aynı araştırmacılar daha sonraki çalışmalarında SEY kullanarak üç boyutlu modeller ile doğru parçayı elde edecek kalıp yüzeylerini oluşturmaya çalıştılar. İteratif olarak elde ettikleri kalıp yüzeylerini kullanarak yaptıkları benzetim sonuçlarını deneysel olarak elde edilen sonuçlarla karşılaştırmışlardır [5].

Shu ve Hung [6], yaptıkları çalışmada çift bükme tekniğinin geri esneme sonuçlarına olan etkilerini SEY kullanarak hesaplamışlardır. Kalıp boşluğundaki değişimin geri esneme sonuçlarına etkilerini inceledikleri çalışmanın deneysel sonuçlara yakınlığı oldukça yüksek çıkmıştır.

Prior [7], yaptığı çalışmada sac malzemelerin şekillendirilmesinde, kapalı adımlı (implicit) ve açık zamana bağlı (explicit) SEY kullanmıştır. Her iki metodun da birbirine karşı üstün olduğu alanlar olduğunu ve hesaplama yapılacak modele göre yöntemin seçilmesinin uygun olduğunun altını çizmiştir.

Rojek ve arkadaşları [8] yaptıkları çalışmada açık zamana bağlı SE hesaplama yöntemi kullanan bir yazılım ile sac metal şekillendirme ve dövme hesaplamaları yapmışlardır. Elde ettikleri sonuçları daha önceden yapılmış olan deneysel sonuçlarla karşılaştırmış ve hesaplamada kullanılan SE yönteminin tatmin edici seviyede yakın sonuçlar ortaya çıkardığını göstermiştir.

Yapılan çalışmalar ve elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde analitik yöntemler şekillendirme ve geri esneme hesaplamalarında kabul edilebilir sonuçlar ortaya çıkartmıştır. Ancak farklı analitik yöntemlerin birbirlerine göre üstünlükleri olmuştur. Tekkaya [9] çalışmasında farklı sonlu elemanlar yöntemlerinin sac şekillendirme hesaplamalarındaki kullanım alanlarından bahsetmiştir. Farklı yöntemlerin kullanılması özellikle açık zamana bağlı ve kapalı adımlı yöntemlerin birbirleri ile ya da deneysel verilerle karşılaştırılması birçok araştırmacıya konu olmuştur [5,10,11]. Bunların dışında Kim ve Huh [12] yaptıkları çalışmada doğrudan fark yöntemi ile sonlu farklar yönteminin sonuçlara olan etkileri karşılaştırmışlardır.

Şekillendirme sırasında oluşacak olan hataları asgari seviyeye çekmek amacıyla, Hsu ve arkadaşları sacların şekillendirilmesi süresinde şekillendirmeye etki eden zımba kuvveti ve baskı kuvvetinin uygun bir yöntemle kontrol altında tutmanın sonuçları olumlu etkileyeceğini ortaya çıkarmıştır [13]. Ancak şekillendirme sonrasında oluşan geri esneme deformasyonlarının hesaplanması, şekillendirme sonuçlarının tahmin edilmesinden daha zor olmuştur. Bundan dolayı geri esneme hesaplamaları, sac metal şekillendirme süreçlerinde önemli bir yer tutmaktadır. Zhang [14], sac malzemelerin bükülmesi sırasında ortaya çıkan artık gerilmelerin tekrar bükme yada geri esneme sonuçlarına etkisini göstermiştir. Keum ve Han [15], farklı alüminyum alaşımlarının bükme sonrası geri esneme değerlerinin farklı şekillendirme sıcaklıklarındaki etkilerini incelemiş, sıcak şekillendirmenin geri esneme deformasyonlarını azalttığını tespit etmiştir.

Mamalis ve arkadaşları farklı malzemeler ile silindirik ve kübik çekme hesaplamaları yapmışlardır. Şekillendirme hızının, sonlu elemanlar ağ yapısının ve baskı kuvvetinin şekillendirme hesaplama maliyetlerine etkilerini incelemişlerdir. Ayrıca ortaya çıkan hesaplama maliyetini düşürebilmek amacıyla malzeme yoğunluklarını artırmanın bir çözüm olabileceğini ortaya koymuşlardır [16,17].

Chou ve Hung [18], yaptıkları çalışmada kanal çekme işlemlerinde ortaya çıkan geri esneme problemlerini en aza indirebilmek için birkaç farklı yöntem öngörmüşlerdir. Sonuçta kalıp boşluğunun, baskı kuvvetinin ve kalıp omzunda kullanılan eleman sayısının geri esneme deformasyonlarında etkin rol oynadığını göstermiştir

Ancak kullanılan analitik yöntemler için yapılan kabuller ve fiziksel süreci tanımlamak amacıyla kullanılan parametreler sonuçları etkilemektedir. Bu etkileri incelemek amacı ile literatürde farklı malzemeler üzerinde farklı parametrelerin etkileri üzerine yapılmış çalışmalar bulunmaktadır. Lee ve Yang yaptıkları çalışmada geri esneme deformasyonlarına etki eden hesaplama parametrelerinden birkaçını incelemiştir. Eleman büyüklüğünün, şekillendirme hızının ve kanal omuz yapısının sonuçlara hangi oranda etki ettiğini ortaya çıkarmıştır [19].

Benzer bir çalışma Lin ve arkadaşları tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada kanal çekme işlemi sırasında seçilen şekillendirme hızının ve kanal omzunda kullanılan eleman sayısının değişiminin geri esneme değerlerine etkileri incelenmiştir [20]. Daha sonraki yıllarda Li ve arkadaşları kalıp boşluğunun, kalıp omuz yarıçapı ve sac kalınlığının değişiminin geri esneme deformasyonlarına etkilerini incelemiştir [21]. Samuel [22], çalışmasında baskı kuvvetini, kalıp omuz yarıçapı ve sürtünme katsayısının sonuçlara etkilerini incelemiştir. Papeleux ve Ponthot benzer bir çalışmada farklı malzemeler için baskı kuvveti ve sürtünme katsayılarının değişiminin geri esneme ve hesaplama maliyetlerine etkisini incelemiştir [23]. Benzer parametrelerin değişkenliklerinin geri esneme deformasyonlarına etkileri farklı çalışmalara konu olmuştur [24-26].

1.2. Tezin Amacı ve Kapsam

Bu tezin temel amacı, otomotiv endüstrisinde sac şekillendirme yöntemi ile imal edilen bir parçanın proses tasarımının, SE yöntemine dayalı bir sistematik ile yapılmasıdır. Bu kapsamda, ilk olarak SE bilgisayar benzetimlerinde kullanılan parametre değişkenliklerinin, hesaplanan şekillendirme ve geri esneme sonuçlarına etkilerinin büyüklüğünün ve öneminin tespit edilmesi gereklidir. Benzetimlerde kullanılan kabuller ve parametreler temelde iki ayrı çatı altında toplanabilir. Tezin bundan sonraki kısımlarında; SE benzetim yönteminden kaynaklanan parametreler için sayısal, şekillendirme prosesini tanımlamakta ihtiyaç duyulan parametreler için ise fiziksel parametreler ifadeleri kullanılacaktır. Bu durumda farklı parametre değişkenliklerinin birbirlerini etkilememesi için değişkenliklerin hesaplama sonuçlarına etkileri ayrı ayrı incelenmelidir. Ancak öngörülen parametre değişkenliklerinin endüstriyel bir parça üzerinde incelenmesi, zaman/maliyet güçlüklerinin yanı sıra sonuçlardaki etkilerin net olarak görülememesi sorunlarını beraberinde getirmektedir. Bu sebepten dolayı; daha önceki dönemlerde literatürde çalışmalara konu olmuş ve nitelik olarak bu çalışmada kullanılabilecek U-kanal modeli parametre değişkenliklerinin sonuçlara etkilerini incelemek amacıyla kullanılmıştır.

1.3. Çalışmanın Ana Hatları

Bu tezde, yapılan çalışma altı ayrı bölümde derlenmiştir. Tezin ikinci bölümünde, sac levhaların SEY e dayalı şekillendirme benzetimlerinde izlenen adımlar hakkında bilgi verildi. Ayrıca literatürde daha önceki dönemlerde yapılan çalışmalarda kullanılan yöntemlerden bahsedildi. Malzeme modelinin elde edilmesi ayrıntılı olarak açıklandı. Hesaplamalarda kullanılan akma fonksiyonu hakkında bilgi verilerek SE ağında kullanılacak kabuk eleman özellikleri açıklandı.

Üçüncü bölümde ilk olarak hesaplama yönteminin sonuçlara etkisini görebilmek amacı ile sayısal parametre değişkenliklerinin sonuçlara etkileri incelendi. Literatürde U-kanal şekillendirme işlemi aynı geometride fakat farklı sac malzeme

özellikleri için incelenmiştir. Bu bölümde U-kanal geometrik yapısı oluşturularak çelik malzeme özellikleri ile şekillendirme ve geri esneme hesaplamaları yapıldı. Yöntemin getirdiği parametrelerden etkin özellikte olan; ağ yapısında kullanılan eleman büyüklüğü ve şekillendirme hızı değişkenliklerinin, sürtünmenin ihmal edildiği durumda şekillendirme ve geri esneme sonuçları incelendi. Yapılan regresyon ile seçilen sayısal parametrelerin sonuçlara etkisini ifade eden fonksiyonlar geliştirildi. Fonksiyonlardan elde edilen değerler ile hesaplanan değerler karşılaştırılarak fonksiyonların sapma miktarları ortaya çıkarıldı.

Dördüncü bölümde ise şekillendirme parametrelerinin şekillendirme ve geri esneme hesaplama sonuçlarına etkileri araştırıldı. Bunun için seçilen fiziksel parametrelerin değişiminin yanı sıra bir önceki bölümde işlenen sayısal parametrelerin de birbirleri ile etkileşimleri incelenerek model kalibre edildi. Kalibre edilen model üzerinde sürtünme katsayısının ve pot çemberi baskı kuvvetinin değişiminin sonuçlara hangi seviyede etki ettiği hesaplandı. Hesaplama sonuçları kullanılarak regresyon yapıldı ve sonuçların seçilen sayısal ve fiziksel parametrelere bağlı fonksiyonları geliştirildi.

Beşinci bölümde; halen üretilmekte olan endüstriyel bir parça üzerinde ortaya atılan benzetim yöntemi ve mühendislik yaklaşımlar uygulandı. Bu bölümde, parçanın üretim sürecinde imalata geçilmeden önce yapılması gereken işlem tasarımı için gerekli olan proses parametreleri, ortogonal tablo kullanılarak yapılan benzetimlerdeki şekillendirilebilirlik ve geri esneme sonuçlarındaki değerler dikkate alınarak seçildi. Seçilen en uygun parametreler ile yapılan benzetim sonucunda elde edilen sac kalınlıkları ve geri esneme değerleri gerçek ölçüm değerleri ile karşılaştırıldı.

Son bölümde, önceki sonuçların bir derlemesi yapıldı. SE benzetim sistematigi tartışıldı ve önerilen yaklaşımın tatmin edici sonuçlar ortaya çıkardığı tespit edildi. Ayrıca bu tez çalışmasında kullanılan yaklaşımın zayıf noktalarından bahsedildi ve bundan sonraki dönemde benzer çalışmalar yapacak araştırmacılar için bazı önerilerde bulunuldu.

BÖLÜM 2. SONLU ELEMANLAR YAKLAŞIMI

Hesaplama donanımları ve yazılım teknolojilerinin gelişmesine dayalı olarak metal şekillendirme işleminin benzetimi çalışmaları hız kazanmıştır. Açık zamana bağlı (explicit) ve kapalı adımlı (implicit) SE hesaplama metotlarının fiziksel süreçlerin modellenmesinde kullanım alanı oluşmuştur [3-11]. Ancak sac metal şekillendirme benzetimlerinde; açık zamana bağlı SE hesaplama metodu, özellikle temas mekanizmasının kontrolündeki üstünlüğü ve düşük hesaplama süreleri/maliyetleri gibi özellikleri ile kapalı adımlı SE hesaplama metoduna göre avantajlı bir çözüm yöntemidir. Ayrıca büyük deformasyonların beklendiği problemlerde, kapalı adımlı çözüm metodunun sonuca ulaşamama problemlerinden dolayı açık zamana bağlı hesaplama yönteminin daha çok tercih edilir hale gelmiştir [27]. Bu bölümde sac metal şekillendirme işlemlerinin SEY benzetimlerinde uygulanan modelleme tekniklerini ve izlenen yöntem hakkında temel düzeyde bilgi verilecektir.

2.1. Benzetim Yöntemi

Sac şekillendirme süreci iki adımda incelenebilir. Bunlardan birinci adım; şekillendirilmemiş sac parçasının (taslak) kalıp geometrisinin şekline getirilmesidir. Bu adım şekillendirme ya da yükleme adımı olarak adlandırılabilir. İkinci adım; yüklemenin kaldırılması ile serbest kalan şekillendirilmiş parçanın üzerindeki artık gerilmelerin etkisiyle son şekillendirme formunun elde edilmesi (geri esneme) olarak adlandırılır [4,5,10,11]. Bu iki hesaplama adımı farklı ya da aynı SE ağı kullanılarak yapılabilir. Prior [7], SEY kullanarak yaptığı şekillendirme benzetimlerinde her iki hesaplama adımı için, açık zamana bağlı ya da kapalı adımlı SE hesaplama metodu kullanılarak çözüm elde edilebileceğini ortaya koymuştur. Ancak büyük ve karmaşık geometrilerin şekillendirme hesaplamalarında açık zamana bağlı SE yaklaşımının üstünlüklerinden söz etmiştir. Geri esneme hesaplamaları için de hem açık zamana

bağlı metodun hem de kapalı adımlı çözümlemenin sonuçlar elde edebildiğini ancak açık zamana bağlı SE yaklaşımında çözüme ulaşma; şekillendirilmiş parçanın üzerindeki kinetik enerjinin kaldırılarak elde edildiğini söylemiştir. Yapılan bu işlem; uygun seçilen dinamik rahatlama katsayısı ile iyi sonuçlar elde edebilmektedir. Fakat dinamik rahatlama yönteminin fiziksel bir temelinin olmaması ve dinamik rahatlama faktörünün keyfi seçilebilecek bir değer olması, bu yaklaşımın olumsuz özelliklerindendir. Diğer taraftan geri esneme hesaplamaları için kapalı adımlı çözümün daha etkin olduğunu ortaya çıkarmıştır.

İki hesaplama arasında temel farklılıklar vardır. Şekillendirme sırasında taslak ile kalıp elemanlarını temsil eden rijit yüzeyler arasındaki temas mekanizması kullanılarak büyük yer değişimler hesaplanır. Geri esneme hesaplamasında ise çekme işlemine nazaran çok daha düşük yer değişimler beklenir. Ayrıca geri esneme hesap edilirken oluşan yer değişimler dış kuvvetler tarafından değil, parçadaki sac kalınlığı boyunca oluşan gerilme dağılımının dengesizliğinden dolayı oluşur [27].

Finn ve arkadaşları [11], yaptıkları şekillendirme benzetimlerinde şekillendirme ve geri esneme adımlarında kapalı adımlı sonlu elemanlar metodunu kullandıklarında sonuçların oldukça başarılı olduğunu ancak kullanılan SE ağ yapısına bağlı olarak çözüme ulaşılamama problemlerinin ortaya çıkması veya ulaşılabilmesi halinde hesaplama maliyetlerinin oldukça yükseldiğine dikkat çekmişlerdir. Diğer taraftan şekillendirme hesaplamasında açık zamana bağlı metodun uygun parametreler seçilerek uygulanması halinde, sonuçların kapalı adımlı metot kullanılarak elde edilen sonuçlarla benzerlik gösterdiğini, ancak hesaplama maliyetlerinin çok daha düşük olduğunu ortaya koymuştur.

Karafillis ve Boyce [5], yaptıkları çalışmada iki farklı yöntem öngörmüştür. Bunlardan birincisinde şekillendirme ve geri esneme benzetimleri için kapalı adımlı sonlu elemanlar metodunu kullanmıştır. Aynı problem için düşündükleri ikinci yöntemde ise şekillendirme hesaplamasını açık zamana bağlı metot ile geri esneme hesaplamasını ise kapalı adımlı metot ile çözmüşlerdir. Ancak ikinci yöntemin daha üstün olduğunu, özellikle karmaşık yapıları problemlerde kolaylıklar sağladığını söylemiştir.

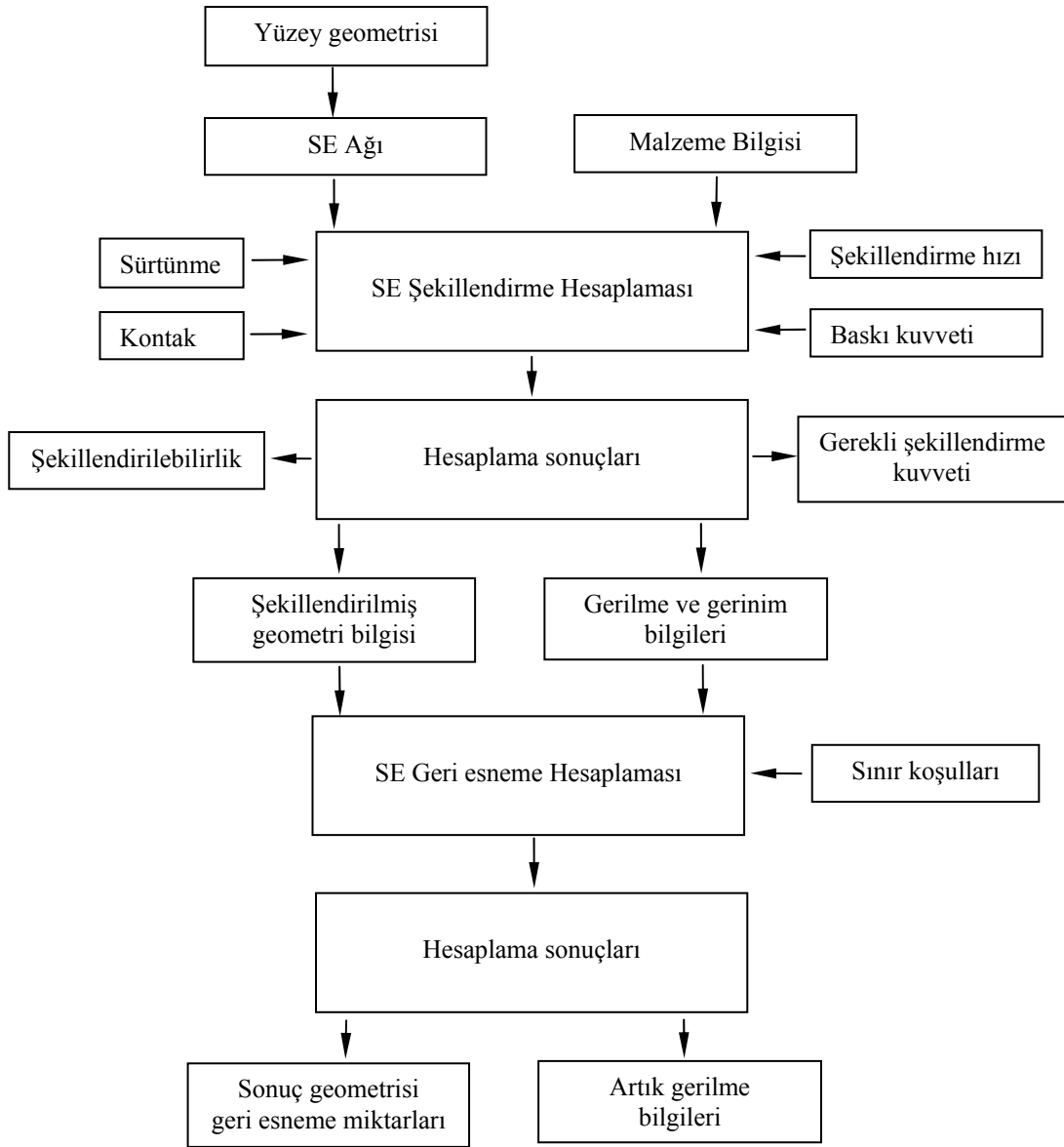
Onate ve arkadaşları [10], yaptıkları çalışmada şekillendirme benzetimlerinde farklı SE yaklaşımlarını incelemiştir. Farklı yöntemler ile elde edilen sonuçların yaklaşık aynı değerlerde olduğunu göstermiştir. Hesaplama maliyetleri dikkate alındığında, iki boyutlu ya da küçük ölçekli problemlerin çözümünde kapalı adımlı yaklaşımı, büyük ölçekli problemlerin çözüm de açık zamana bağlı SE yaklaşımını önermiştir. Ancak açık zamana bağlı SE yaklaşımının geri esneme benzetimlerinde oldukça maliyetli olacağını savunmuştur.

Lee ve Yang, şekillendirmeye etki eden sayısal değişkenleri inceledikleri çalışmalarında daha önceki dönemlerde yapılan şekillendirme benzetimlerini de göz önünde bulundurarak, şekillendirme benzetimi için açık zamana bağlı, geri esneme benzetimi için ise kapalı adımlı SE yaklaşımını kullanmıştır [19].

Literatürde önceki dönemlerde yapılan çalışmalar incelendiğinde, endüstriyel ve 3-Boyutlu uygulamalarda SEY dayalı şekillendirme hesaplamaları için açık zamana bağlı, geri esneme hesaplamaları için kapalı adımlı çözüm yaklaşımlarının ağırlık kazandığı görülmektedir. Bu tez çalışmasında izlenecek benzetim yönteminde, gerek hedeflenen endüstriyel uygulamalar gerekse literatürde işaret edilen sonuçlar dikkate alınarak iki aşamalı bir hesaplama yaklaşımı olacaktır. Bu çerçevede şekillendirme işleminin bilgisayar benzetim modelindeki temel adımlar aşağıdaki gibidir.

- Kalıp yüzey geometrilerinin oluşturulması ve ağ yapısının oluşturulması
- Malzeme bilgisinin elde edilmesi
- Sınır koşulları; sürtünme, kontak, şekillendirme hızı ve baskı kuvveti.
- SE şekillendirme hesaplamasının yapılması
- Şekillendirme sonuçlarının değerlendirilmesi
- Şekillendirilmiş geometrisinin yanında gerilme – gerinim bilgilerinin geri esneme hesaplamaları yapılmak üzere ikinci adıma transfer edilmesi
- Geri esneme hesaplamaları için sınır koşullarının belirlenmesi
- Geri esneme sonuçlarının değerlendirilmesi.

Şekil 2.1’de bu temel adımları içeren bir akış şeması verilmektedir.

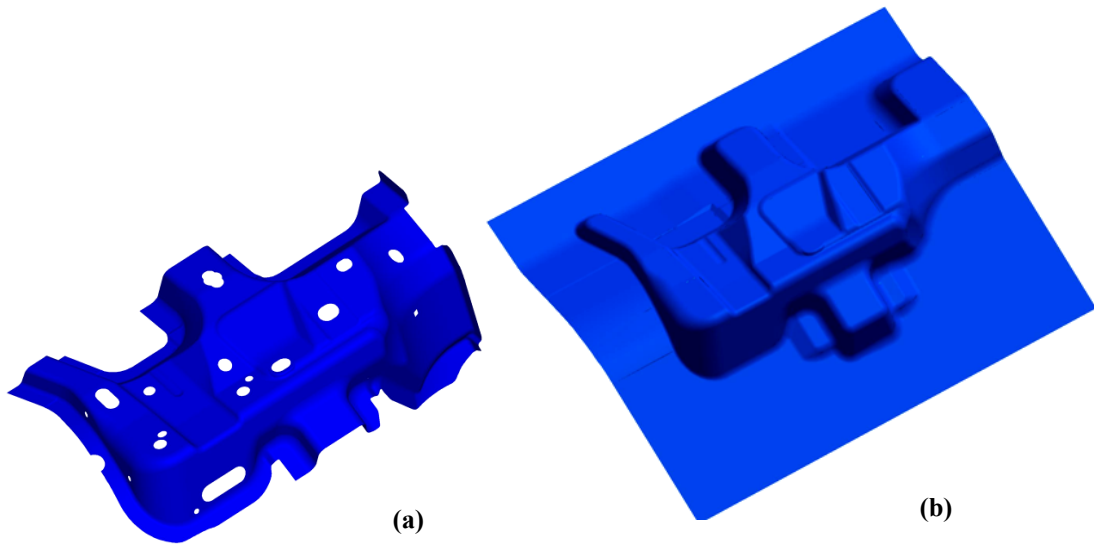


Şekil 2.1. Şekillendirme ve geri esneme hesaplamasında izlenen yol [27]

2.2. Şekillendirme Hesaplaması

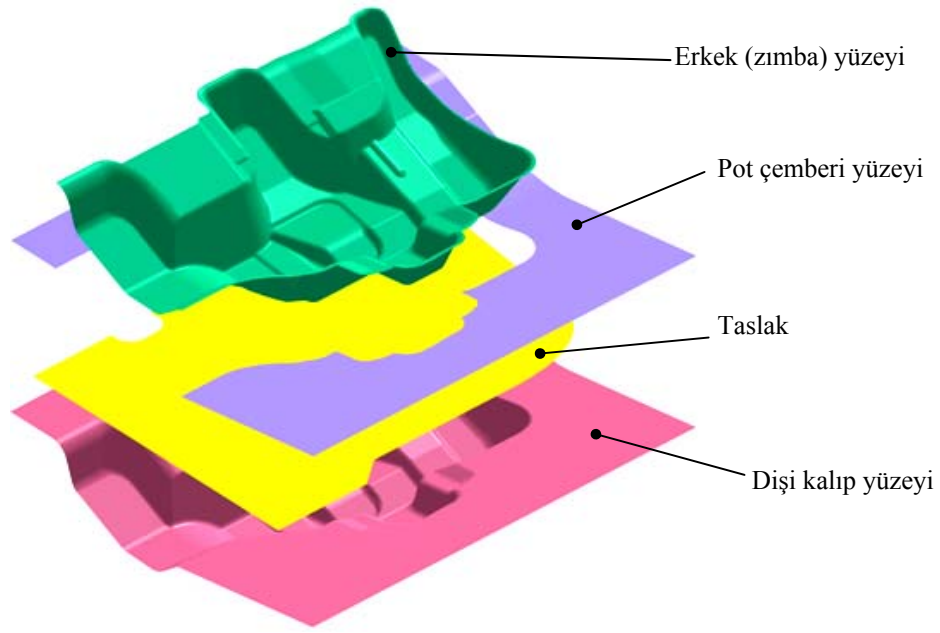
Şekillendirme işleminin bilgisayar benzetiminin yapılabilmesi için ilk olarak prosesi temsil edecek geometrilere ihtiyaç vardır. Sac malzemenin kalıplar kullanarak şekillendirilmesi işleminde üç ana eleman bulunmaktadır. Bunlardan birincisi dişi olarak ta tabir edilen kalıp elemanıdır ve işlem sırasında sabittir. İkinci eleman erkek kalıp ya da zimba olarak tabir edilen hareketli kısımdır. Temel olarak şekillendirme

hareketli zımbanın sac malzemeyi kalıp boşluğuna doldurması ile gerçekleşir. Ancak tam bir şekillenme sağlamak için kalıp boşluğuna akan sac malzemenin kontrol altında tutulması gerekir. Bunu sağlamak için pot çemberi kullanılır. Pot çemberi üzerine uygulanan kuvvet kalıp ile arasında kalan taslağı tutar, tutma işleminin ardından zımbanın hareketi ile şekillendirme gerçekleşir. Şekillendirme sırasında kalıp elemanlarının uğradığı elastik şekil değişimleri ihmal edilir. Bu durumda kalıp elemanlarını temsil eden geometrilerin tamamı yerin taslak ile etkileşim içinde olan yüzeylere ihtiyaç duyulur. Tasarımı tamamlanmış ve ürün haline gelmiş olan bir sac parçanın şekillendirme benzetiminin yapılabilmesi için parçanın yüzey bilgisi temel alınır. Sac şekillendirme işlemi ile birden fazla aşamada üretilmiş bir otomobil parçasının ürün hali ve temel yüzey bilgisinden yararlanılarak geliştirilen kaynak yüzey modeli Şekil 2.2’de görülmektedir.



Şekil 2.2. Ürün haline gelmiş parça (a), yüzeyin geliştirilmesi ile elde edilen kaynak yüzey (b)

Geliştirilen yüzey, benzetim modelini oluşturabilmek için kaynak yüzey olarak kullanılır. Bu kaynak yüzey kullanılarak kalıp elemanlarını temsil eden yüzeyler oluşturulur. Yüzeyler oluşturulurken sac kalınlığı ve kalıp boşlukları göz önünde tutularak ofset metodu ile diğer kalıp yüzeyleri elde edilir. Son olarak şekillenmemiş taslak geometrisi de yüzey olarak modellenir. Şekil 2.3’te kaynak yüzeyden elde edilen kalıp elemanlarının yüzeyleri ve şekillendirme sürecindeki konumları görülmektedir.



Şekil 2.3. Şekillendirme benzetimleri için hazırlanan kalıp yüzeyleri

Elde edilen kalıp setindeki her bir yüzey SE benzetimlerinin yapılabilmesi için referans alınarak sonlu elemanlar ağ yapısı oluşturulmalıdır. Daha önceki yıllarda yapılan üç boyutlu sac metal şekillendirme benzetimlerinde; SE yaklaşımı için çözüm ağının kabuk elemanlar ile oluşturulması geniş kabul görmüş bir yöntemdir [5,10,11]. Literatürde kullanılmış ve kabul görmüş birçok kabuk eleman formülasyonu bulunmaktadır. Ancak Belytschko ve arkadaşları[29] tarafından geliştirilen kabuk eleman modeli daha önceki yıllarda bir çok araştırmacı tarafından başarılı bir şekilde kullanılmıştır [5,11,26-28].

2.2.1. SE elastik – plastik kabuk eleman formülasyonu

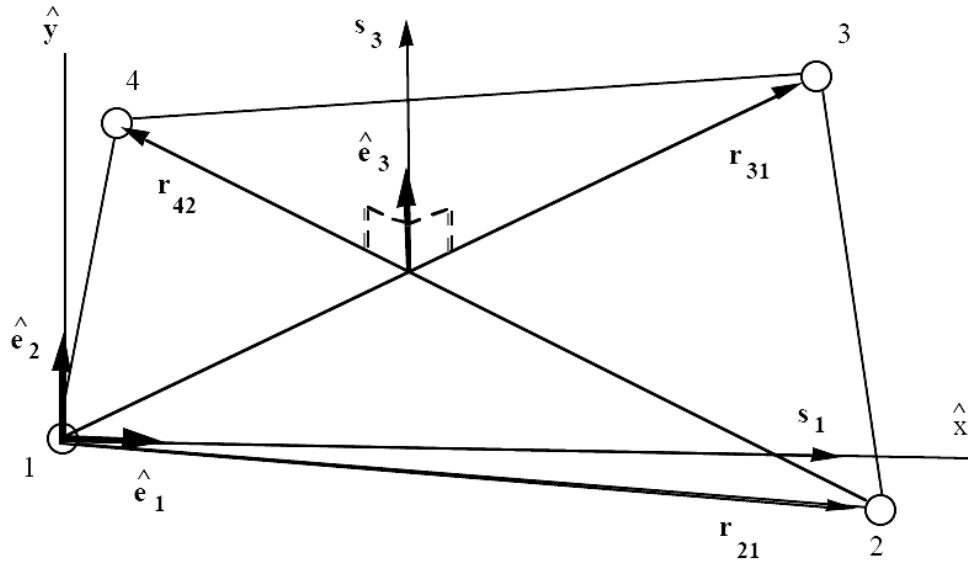
Hesaplama da kullanılan sonlu elemanlar yazılımı olan Ls-Dyna için ilk kabuk eleman Hughes ve Liu tarafından tasarlanmıştır [29]. Bu kabuk elemanın (HL kabuk eleman) o zamanlarda kullanılan eleman literatürüne girmiş güçlü ve bazı özellikleri ile ön plana çıkmayı başarmıştır [29]. Bunlar;

- Eleman yapısı rijit hareketlerde gerinim üretmediği için birçok uygulamada sonlu gerinim hesaplaması rahatlıkla yapılabilir.

- Basit yapısından dolayı hesaplanma kolaylığı sağlamaktadır.
- Basit altı yüzlü katı eleman ile uyum içindedir. Çünkü altı yüzlü katı elemanın basitleştirilmesi ile elde edilmiştir.
- Sonlu enine kayma gerinimlerini üzerinde barındırır.
- İlk başta kabuk kalınlığı yönündeki incelmeye cevap veremeyen eleman yapısı daha sonra Hughes ve Carnoy (1981) çalışmaları ile kalınlık yönündeki incelmeyi hesaplayabilecek şekilde geliştirilmiştir.

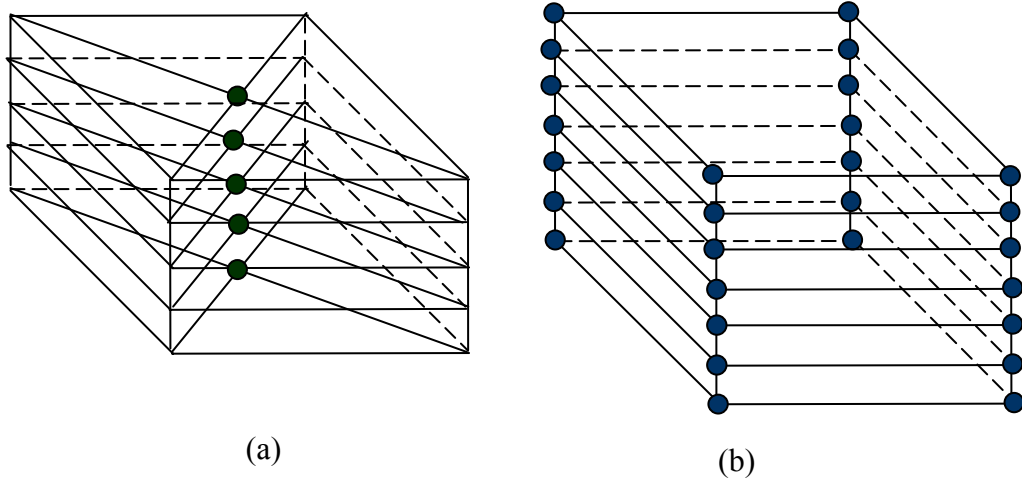
Bu gelişmelerin yanında Belytschko Lin Tsay tarafından geliştirilen kabul eleman (BT kabuk elemanı) ise HL kabuk elemanına göre avantajlı hale gelmiştir. Bunun sebebi kalınlık yönünde 5 katman bulunduran BT kabuk elemanının hesaplanabilmesi için 725 matematiksel işleme ihtiyaç duyulurken aynı özellikteki HL kabuk elemanının hesaplanabilmesi için 4066 matematiksel işleme ihtiyaç duyulmasıdır. Bu BT kabuk elemanının hesaplama maliyetini oldukça düşürmektedir. BT kabuk elemanı dönel koordinat sistemi üzerine oturtulmuş hız – gerinim hesaplama metodunu kullanan bir elemandır. Eleman koordinat sistemi kullanılması lineer olmayan hesaplama karmaşasında hesaplama kolaylığı sağlıyordu. Ayrıca hıza bağlı gerinim özelliğinin olması Cauchy gerilmesiyle benzerlikler göstermektedir.

Eleman koordinat sisteminde kabuk elemanın ortasından geçen dörtgen referans yüzeyi dört düğüm noktası ile ifade edilir. Bu dörtgenin kenarları üzerine yerleşmiş olan birim vektörleri kullanan koordinat sistemi elemanın şekil değiştirmesi ile beraber değişebilir durumdadır. İki birim vektörü belli olan koordinat sistemi dörtgen yüzeyin köşegen vektörünün normali olan doğrultuyu üçüncü birim vektör olarak kullanmaktadır. Şekil 2.4'te kabuk elemanı oluşturan düğüm noktaları ve referans dörtgen üzerinde bulunan koordinat sistemi görülmektedir. Burada $\hat{e}_1$ ve $\hat{e}_2$ birim vektörü referans dörtgen yüzeyin kenarlarına teğettir. Referans dörtgenin köşegenlerine dik olarak duran birim vektör ise $\hat{e}_3$ tür.



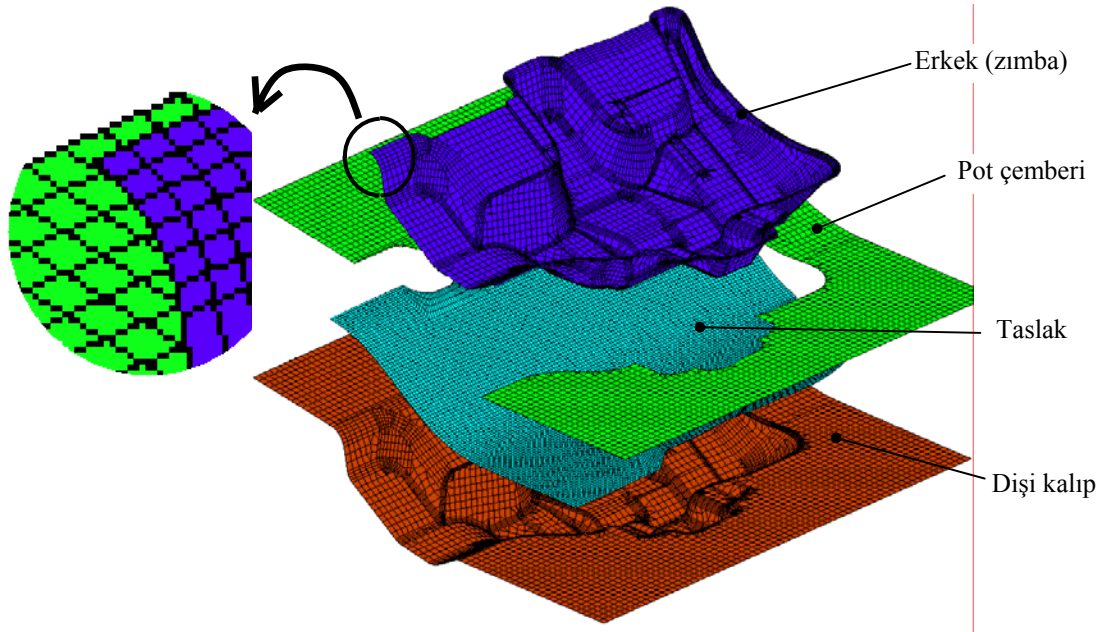
Şekil 2.4. BT kabuk elemanı düğüm noktaları ve eleman koordinat sistemi [29]

Hesaplama sırasında kabuk elemanları kalınlıkları, yönünde katmanlara ayrılarak hesaplanır. Yazılım başlangıç değeri olarak beş katman üzerinde hesaplama yapar. BT kabuk elemanlar iki farklı hesaplama şekliyle hesaplanabilir. Birincisi sadeleştirilmiş hesaplama yöntemidir. Bu yöntemde her bir katmanda elemanı temsil eden dörtgenin geometrik merkezinde tek bir nokta için hesaplama yapılır. Tam hesaplama yönteminde ise her bir katman üzerinde dört nokta için hesaplama yapılarak kabuk eleman içindeki farklılıklar da görülür.



Şekil 2.5. BT kabuk elemanı için beş katmanda sadeleştirilmiş (a) ve yedi katmanda tam çözüm (b) için hesaplama noktaları

Sonuç olarak oluşturulmuş yüzeyler kullanılarak SE benzetimleri için ağ yapısı BT kabuk elemanları ile oluşturulur. Ağ yapısı oluşturulurken kalıp elemanlarını temsil eden yüzeylerdeki omuz bölgelerinde kullanılan eleman sayılarına dikkat edilmelidir. Bu modelde omuz bölgesi boyunca en az altı eleman kullanılmıştır. Şekil 2.6’da ağ yapısı oluşturulmuş model görülmektedir.

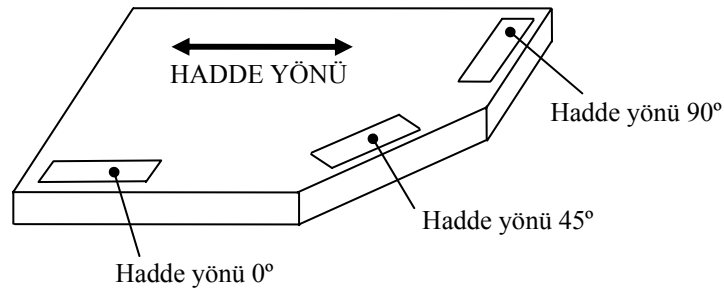


Şekil 2.6. Şekillendirme benzetimleri için hazırlanan ağ yapıları ve omuz bölgesi detayı

Oluşturulan ağ yapısı kabuk elemanlardan oluşmaktadır. Kalıp yüzeylerini temsil eden geometrilerde üçgen ve dörtgen kabuk elemanları kullanılırken taslak üzerinde yalnızca dörtgen elemanlar kullanıldı.

2.2.2. Malzeme bilgisinin elde edilmesi

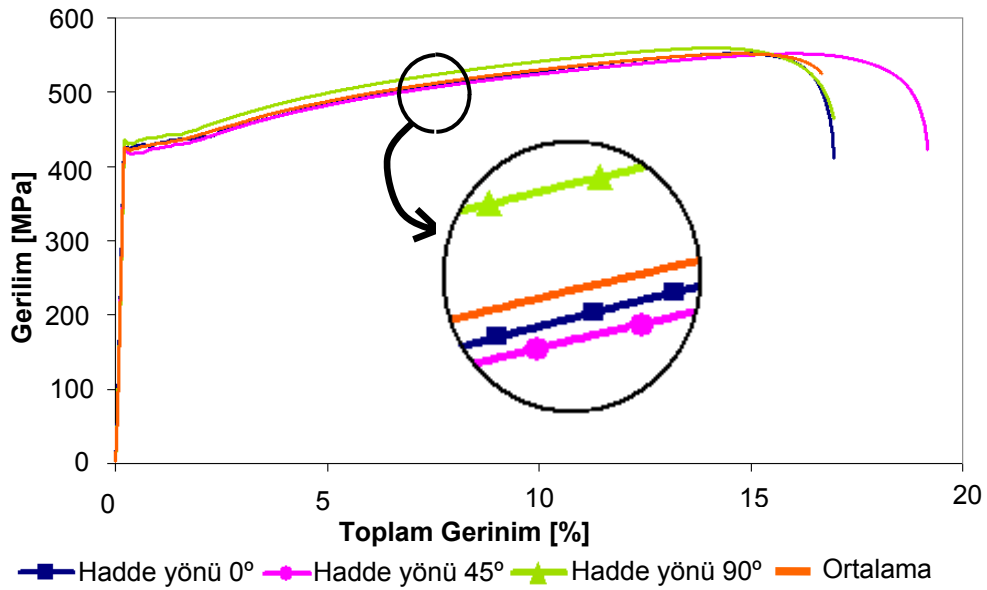
Malzeme bilgisinin SE yöntemi kullanan bir yazılımda kullanılabilir bir veri haline getirilebilmesi için, çekme deneyi yapılmış olan bir malzemenin deneysel verilerinin uygun şartlarda bir araya getirilmesi gerekir. Sac malzemelerde çekme deneyi üç farklı yönde ayrı ayrı yapılır. Bunlar; hadde yönündeki, hadde yönüne dik ve hadde yönüne 45° olacak şekilde hazırlanmış malzeme numuneleri çekme testinde elde edilen gerilme gerinim eğrileridir.



Şekil 2.7. Sac malzeme üzerinden alınan deney numuneleri

Deneysel olarak elde edilen her üç yöndeki gerilme – gerinim değerleri ağırlıklı ortalama metodu kullanılarak birleştirilerek tek bir malzeme eğrisi elde edilmeye çalışılır. Şekil 2.8’de, Denklem 2.1 kullanılarak elde edilen ortalama gerilme – gerinim eğrisi görülmektedir.

$$\overline{X} = \frac{\text{Hadde yönü } 0^\circ + \text{Hadde yönüne } 90^\circ + 2 \times \text{Hadde yönüne } 45^\circ}{4} \quad (2.1)$$



Şekil 2.8. Yüksek mukavemetli bir sac levhadan elde edilen gerilme – gerilme değerleri

Ortalama değerler kullanılarak elde edilen eğrinin doğrusal bölgesindeki eğim hesaplanarak malzeme için elastik modül tayin edilir.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.2)$$

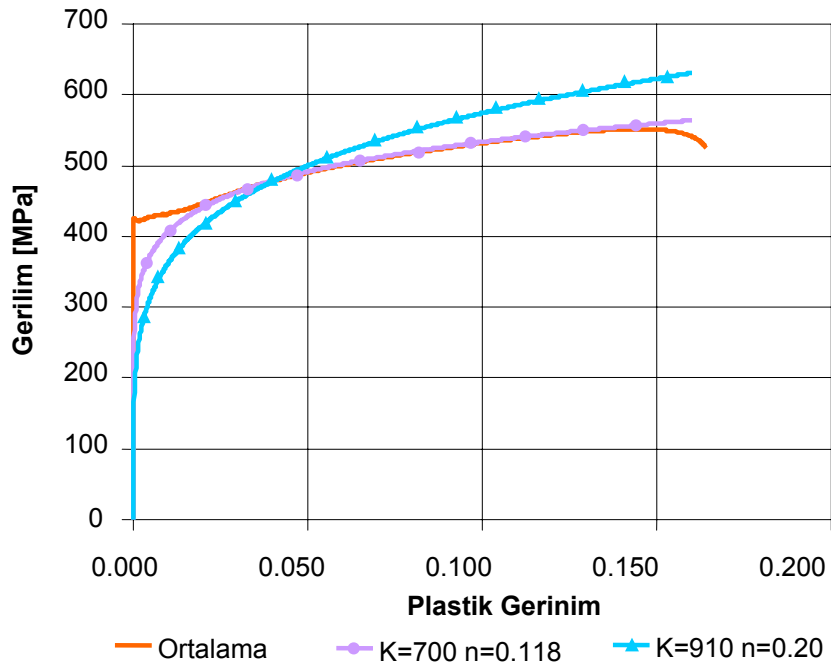
Ancak elde edilen ortalama gerilme – gerinim eğrisini bir fonksiyon olarak ifade etmek imkansızdır. Bu durumda ortalama gerilme – gerinim eğrisine en yakın, Denklem 2.3'teki Hollaman malzeme fonksiyonu için katsayılar tespit edilmelidir.

$$\sigma = K \cdot \varepsilon^n \quad (2.3)$$

Holloman malzeme fonksiyonunda; K pekleşme katsayısı, n ise pekleşme üsteli olarak tanımlanmıştır. Eğri fonksiyonunu elde edebilmek için plastik gerinim değeri esas alınır. Elastik modül kullanılarak gerçek toplam gerinim değerinden elastik gerinimler çıkarılarak plastik gerinimler hesaplanır.

$$\varepsilon_{plastik} = \varepsilon_{toplam} - \left(\frac{\sigma}{E} \right) \quad (2.4)$$

Hesaplanan gerinim – gerilim eğrisi % değerler üzerinden olduğundan dolayı her bir gerinim değeri gerçek plastik gerinimlere dönüştürülerek işlem yapılır. Oluşturulan bu malzeme eğrisi üzerine $\sigma = K\varepsilon^n$ bağıntısı kullanılarak çeşitli eğriler oturtulmaya çalışılır (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. Ortalama plastik gerilim-gerinim eğrisi ile farklı iki K ve n değerlerine sahip eğriler

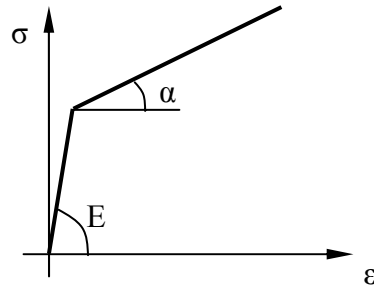
Sonuç olarak üç farklı yönde yapılan tek eksenli çekme deneyleri bir araya getirilerek üstel bir gerilim – gerinim fonksiyonunu oluşturacak olan en uygun/yakın K ve n katsayıları tespit edilir. Elde edilen malzeme katsayıları, seçilen akma fonksiyonu ile birlikte şekillendirme benzetimlerinde kullanılır.

2.2.3. Barlat – Lian akma fonksiyonu

Barlat – Lian fonksiyonu Ls-Dyna sonlu elemanlar yazılımında kullanılan akma fonksiyonlarından birisidir. Malzeme model numarası 36 olan bu model, 1989 yılında Barlat ve Lian tarafından düzlem gerilme şartları altında zorlanmaya maruz kalan anizotropik malzemeleri temsil edebilmek amacıyla geliştirilmiştir. Malzeme fonksiyonu ifade edilirken üç farklı yol kullanılabilir[29].

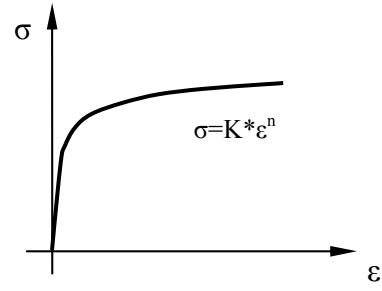
- Lineer kullanım: Bu kullanım şeklinde malzeme iki ayrı bölge ile ifade edilir. Birinci bölge elastik modül ile ifade edilen elastik kısım. İkinci bölge ise tanjant modülü ile ifade edilen plastik kısımdır. Lineer tanımlama için gerekli olan parametreler ve örnek gerilme – gerinim grafiği aşağıdaki gibidir.

- Yoğunluk
- Elastik modül
- Poison oranı
- Tanjant modül
- Akma sınırı



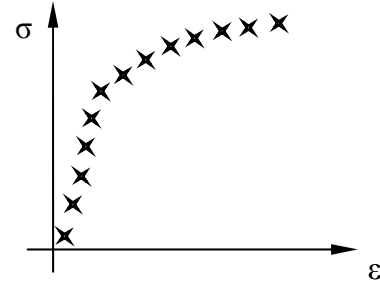
- Üstel kullanım: Üstel kullanım şeklinde gerilme – gerinim eğrisi bir katsayı (K) ve gerinim üsteli (n) ile ifade edilir. Tanımlama için gerekli parametreler ve örnek gerilme – gerinim grafiği bir sonraki sayfada görülmektedir.

- Yoğunluk
- Elastik modül
- Poison oranı
- Pekleşme katsayısı (K)
- Pekleşme üsteli (n)



- Eğri yardımı ile kullanım: Bu kullanım şeklinde her bir gerinim değerine karşılık gelen gerilme değeri bir seri olarak sisteme girilmelidir. İhtiyaç duyulan parametreler ve örnek gerilme – gerinim grafiği aşağıdaki şekilde gibidir.

- Yoğunluk
- Elastik modül
- Poison oranı
- Gerilme - gerinim değerleri



Herhangi bir şekilde tanımlanan malzeme fonksiyonu için anizotropiyi ifade etmek için Lankford parametrelerine ihtiyaç vardır. Bu parametreler haddelenmiş sac malzemenin hadde yönüne 0°, 45° ve 90° olan yönlerdeki uzama miktarlarının kalınlık yönündeki uzamaya olan oranlarıdır.

Düzlem gerilme için anizotropi akma kriteri Denklem 2.5'te ifade edilmektedir;

$$\Phi = a|K_1 + K_2|^m + a|K_1 - K_2|^m + c|2K_2|^m = 2\sigma_Y^m \quad (2.5)$$

σ_Y akma gerilmesi olduğundan $K_{i=1,2}$ hesaplanır;

$$K_1 = \frac{\sigma_x + h\sigma_y}{2} \quad (2.6)$$

$$K_2 = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - h\sigma_y}{2}\right)^2 + f^2\tau_{xy}^2} \quad (2.7)$$

Anizotropik malzeme sabitleri a , c , h ve f , Lankford parametreleri R_{00} , R_{45} , R_{90} kullanılarak elde edilir.

$$a = 2 - 2\sqrt{\frac{R_{00}}{1+R_{00}} \frac{R_{90}}{1+R_{90}}} \quad c = 2 - a \quad (2.8)$$

$$h = 2 - 2\sqrt{\frac{R_{00}}{1+R_{00}} \frac{1+R_{90}}{R_{90}}} \quad (2.9)$$

Anizotropi parametresi f kapalı adımlı olarak hesaplandı. Barlat – Lian fonksiyonu için R değeri, kalınlık boyunca gerinim oranları herhangi bir açı ϕ için hesaplanabilir;

$$R_{\phi} = \frac{2m\sigma_Y^m}{\left(\frac{\partial\Phi}{\partial\sigma_x} + \frac{\partial\Phi}{\partial\sigma_y}\right)\sigma_{\phi}} \quad (2.10)$$

σ_{ϕ} , ϕ yönündeki tek eksenli gerilimdir. Bu ifade ile istenen bir p değeri tekrarlı hesaplama tekniği ile bulunabilir. Örnek olarak $\phi = 45^\circ$ için g fonksiyonu şu şekilde hesaplanabilir;

$$g(f) = \frac{2m\sigma_Y^m}{\left(\frac{\partial\Phi}{\partial\sigma_x} + \frac{\partial\Phi}{\partial\sigma_y}\right)\sigma_{\phi}} - 1 - R_{45} \quad (2.11)$$

Ayrıca Barlat – Lian fonksiyonu yüzey merkezli ve hacim merkezli mikro yapıları da ayırt edebilmektedir. Bunun için gerekli olan m parametresi yüzey merkezli kübik için 8 ve hacim merkezli kübik için 6 olarak alınabilir. Bu durumda;

$$\sigma_y = k\varepsilon^n = k\left(\varepsilon_{yp+} \bar{\varepsilon}^p\right)^n \quad (2.12)$$

Olarak hesaplanır.

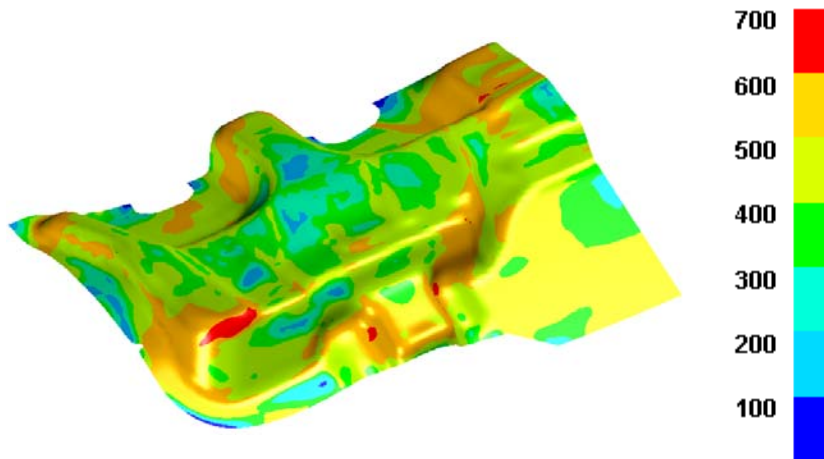
Burada ε_{yp} akma durumundaki akma gerinimidir ve $\bar{\varepsilon}^p$ efektif plastik gerinimdir.

2.2.4. Sınır şartları ve kabuller

Şekillendirme benzetiminin yapılabilmesi için hazırlanan SE ağ yapısı ve malzeme bilgisinin yanı sıra kalıp elemanları ile taslak arasında temas mekanizması oluşturulmalıdır. Açık zamana bağlı hesaplama yaklaşımında oluşturulan temas mekanizmaları ile şekillendirme işlemi gerçekleşir. Yapılan kabullere göre kalıp elemanları ile taslak arasında sürtünme kuvveti hesap edilecek ise temas tanımlamalarında sürtünme katsayısı da belirtilmelidir. Şekillendirme sırasında dişi kalıp yer değişme kontrollü olarak sabitlenir. Erkek kalıp ve pot çemberi ise yalnızca çekme yönünde serbest, diğer yönlerde ise sabitlenir. Şekillendirme prosesine uygun olarak öngörülen pot çemberi baskı kuvveti uygulanarak önce taslağın tutulması sağlanır. Daha sonra erkek kalıp yer değişme kontrollü olarak belirlenen hız ile şekillendirmeyi tamamlar. Şekillendirme hesaplamasında yapılan kabuller ve sınır şartlarının daha detaylı açıklaması Bölüm 3'te yapılacaktır.

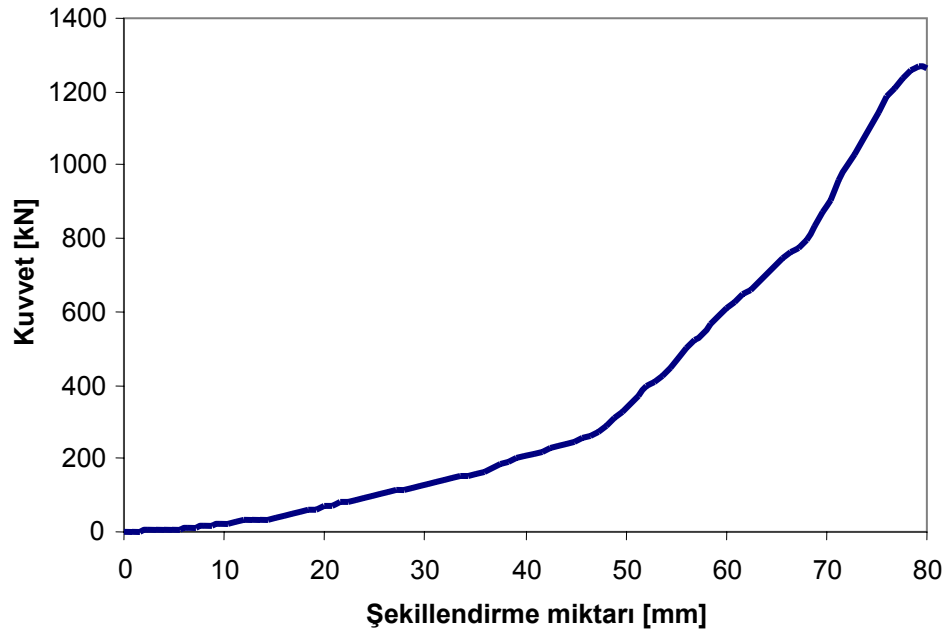
2.3. Şekillendirme Sonuçları

Şekillendirme benzetimi tamamlandığında sac levhanın şekillendirme sonundaki geometrisi elde edilir. Oluşan şekil değişimlerinin malzeme üzerinde oluşturduğu gerilme, gerinim bilgilerinin yanı sıra sac kalınlığındaki değişiklikler de elde edilmiş olur.



Şekil 2.10. Şekillendirme sonunda elde edilen eşdeğer von Mises gerilme dağılımı

Benzetim sırasında yer değişme kontrollü olarak hareket eden erkek kalıbın şekillendirmeyi gerçekleştirebilmesi için gerekli olan şekillendirme kuvveti de benzetim sonunda hesaplanmış olur.



Şekil 2.11. Şekillendirme sonunda elde edilen şekillendirme kuvveti değişimi

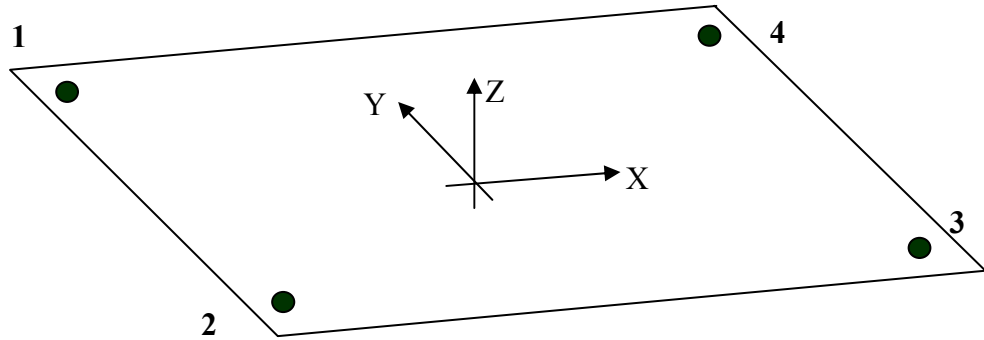
2.4. Geri Esneme Hesaplaması

Sac levhaların şekillendirilmesi alanındaki literatürde geçen çalışmalar dikkate alındığında geri esneme hesaplamaları, kapalı adımlı SEY ile yapılabilir. Kapalı adımlı SE yönteminde sonucun doğruluğu hesaplamada kullanılan yakınsama kriterleri ile bağlantılıdır. Seçilen küçük yakınsama kriterleri sonuçların doğruya yaklaşmasını sağlarken diğer taraftan hesaplama maliyetlerini artırmakta, aynı zamanda da çözüme ulaşamama problemlerini de beraberinde getirmektedir. Bu durumda parçanın büyüklüğüne ve şekil değişimlerine dikkat edilerek uygun yakınsama kriterlerinin seçilmesi geri esneme hesaplamalarının yapılmasındaki en önemli noktadır. Hesaplama yöntemi şekillenmiş geometri üzerindeki artık gerilmelerin ve parçadaki iç enerjinin dengelenmesi prensibi ile çalışmaktadır. Bu durumda şekillendirme sırasında kullanılan kalıp yüzeylerine ve bu yüzeyleri temsil eden ağ yapılarına ihtiyaç duyulmaz. Şekillendirme hesaplaması sonucunda elde

edilen veriler geri esneme hesaplaması için giriş bilgileri olarak kullanılır. Bu bilgiler aşağıda sıralanmıştır.

- Kabuk elemanları oluşturan düğüm noktaları
- Düğüm noktalarının son durumdaki koordinatları
- Her bir elemanı oluşturan düğüm noktalarındaki kabuk kalınlığı
- Kabuk eleman üzerindeki hesaplama noktalarının gerilim – gerinim değerleri

Geri esneme hesaplamasında yer değişim kontrollü olarak sabitlenmiş kalıp yüzeyleri olmadığından dolayı sınır şartları şekillendirilmiş geometri üzerinden verilir. Bu işlem için parça, çekme işleminin yapıldığı yön dikkate alınarak Şekil 2.12’de görüldüğü gibi sınırlandırılır.



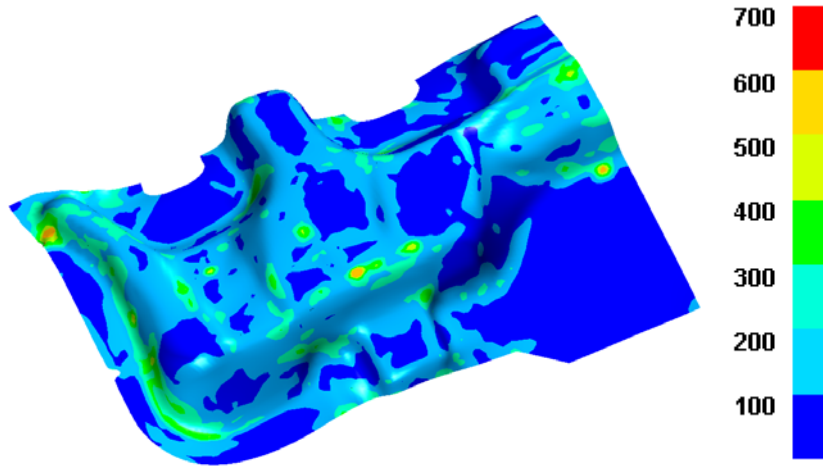
Şekil 2.12. Geri esneme hesaplamasında taslak üzerinde sınırlandırma yapılan düğüm noktaları

Çekme yönü olarak Z doğrultusu seçildiği ve yerçekimi ivmesinin bu doğrultuda olduğu kabul edilirse düğüm noktalarındaki sınırlandırma şu şekilde yapılır,

- 1. Düğüm noktası X,Y,Z yönlerinde sınırlanır
- 2. Düğüm noktası X ve Z yönlerinde sınırlanır.
- 3. Düğüm noktası yalnız Z yönünde sınırlanır
- 4. Düğüm noktası yalnız Z yönünde sınırlanır

2.5. Geri Esneme Sonuçları

Yapılan geri esneme hesaplaması sonucunda, hesaplamada kullanılan yakınsama tolerans değerlerine bağlı olarak şekil değişimleri ve sac parça üzerinde kalan gerilme dağılımları elde edilir. Şekil 2.13'te geri esneme hesaplaması sonrasında parça üzerindeki gerilme dağılımı görülmektedir.



Şekil 2.13. Geri esneme hesaplaması sonrasındaki eşdeğer von Mises gerilme dağılımı

Aynı zamanda paçadaki deformasyonlarda hesaplanmış olur. Şekil 2.14'te şekillendirme ve geri esneme sonrasındaki parça geometrileri görülmektedir.



Şekil 2.14. Şekillendirme ve geri esneme sonrasındaki parça geometrisi

BÖLÜM 3. BENZETİM MODELİNİN VE TEKİNİĞİNİN ETKİLERİNİN İRDELENMESİ

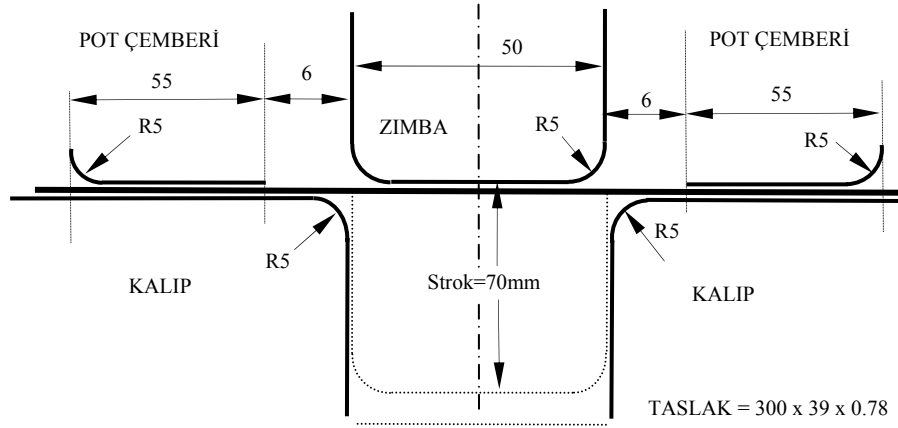
Bu bölümde, oluşturulan SE hesaplama modelindeki eleman büyüklüğünün ve şekillendirme hızının sonuçlar üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, önceki bölümde özetlenen SE benzetim yöntemi kullanıldı. Şekillendirme hesaplamalarında açık zaman bağlı SE yöntemi, geri esneme hesaplamalarında ise kapalı adımlı SE yöntemi kullanılacağından dolayı, her iki yöntemi bünyesinde bulunduran ve özellikle sac metal şekillendirme hesaplamalarında yaygın olarak kullanılan Ls-Dyna yazılımı benzetimlerde kullanıldı [10,11,20,28]. Hesaplamalarda daha önceki dönemlerde birçok araştırmacı tarafından şekillendirme ve geri esneme benzetimlerinde kullanılmış olan U-kanal geometrisi kullanıldı [11,19,20,23-28,30]. Bunun yanı sıra üç boyutlu şekillendirme benzetiminde U kanal modelinin kullanılmasının iki önemli sebebi vardır. Bunlardan birincisi U kanal yapısının otomotiv endüstrisinde kullanılan ve geri esneme sonuçlarının önemli olduğu birçok yapısal parça ile benzerlik göstermesidir. İkincisi, şekillendirmede etkin olan bükme ve gerdirmenin deformasyon etkisinin pot çemberi üzerindeki yüklemenin değişimi ile kontrol edilebilmesi ve özellikle geri esnemeye olan etkisinin direkt olarak gözlemlenebilmesine izin vermesidir [27].

3.1. U-kanal SE Benzetim Modeli

U kanal çekme benzetiminde taslak malzeme için kullanılan yumuşak çekme çeliğinin malzeme kalınlığı 0.78 mm'dir [30]. Kanal geometrisinin ve kalıp elemanlarının pozisyonundaki simetriden dolayı kalıp elemanları ve taslak geometrisi yarı model olarak modellenebilir. Ayrıca sonlu elemanlar yöntemi gereğince kullanılacak olan eleman sayısının azalması da hesaplama sürelerini yarı yarıya azaltacaktır. Kullanılacak olan kabuk elemanların, yüzeysel yapıların üzerine

konuslandırılabilir olması, taslak ve kalıp elemanlarını yüzey modelleme tekniği ile modellenmesini gerektirir. Modellemede yapılan kabuller aşağıda belirtildiği gibidir;

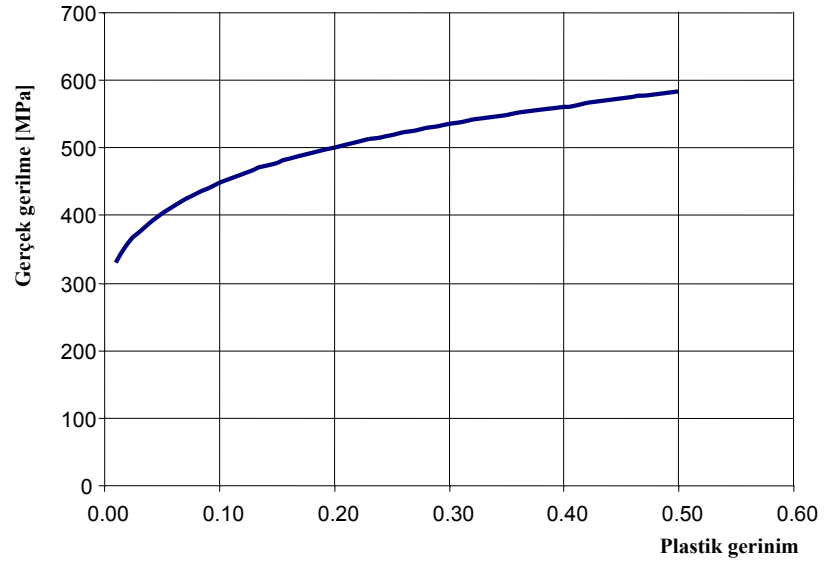
- Geometri; çekme doğrultusunda şekillendirme simetriktir.
- Malzeme; şekillendirilecek metal malzeme yönden bağımsızdır (izotropiktir).
- Yükleme / Sınır şartları; kalıp ve pot çemberi simetrik olarak konumlandı, yer değişme kontrollü olarak sabitlendi. Zimba da hız kontrollü olarak simetrik hareket etmektedir.



Şekil 3.1. U Kanal şekillendirme geometrisi

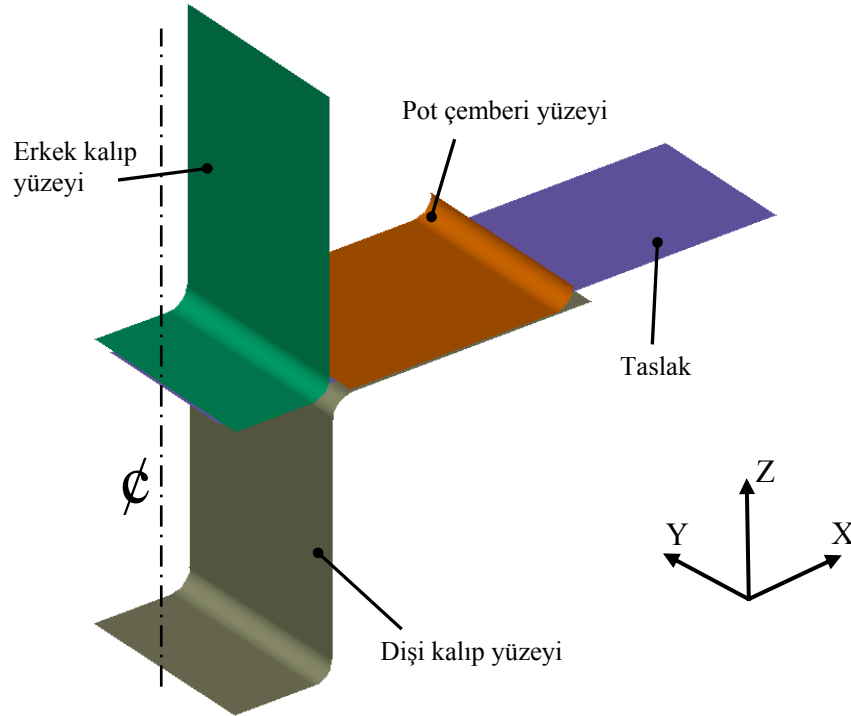
Şekillendirilecek metal levha geometrisi 300 mm boyunda 39 mm genişliğindedir. Metal levha için malzeme özellikleri olarak elastik modül 207 GPa ve poisson oranı 0.3 kabul edilmiştir. Kabul edilen elastik modül literatürde daha önceki dönemlerde yapılan çalışmalar temel alınarak seçilmiştir. Şekillendirme sürecinde sac levhanın üretiminden kaynaklanan ve farklı elastik modül değerlerini öngören hesaplama bu tez çalışması içerisinde yapılmıştır. Ancak elastik modül değişkenliğinin sonuçlara etkisinin ihmal edilebilir derecede düşük olması sebebiyle konu akışından çıkarılmıştır. Çalışma bilgileri EK-A da görülebilir. Malzeme gerilme gerinim eğrisi olarak Denklem 3.1'de ifade edilen Swifh Law malzeme denklemi esas alındı [30].

$$\bar{\sigma}_0(\bar{\varepsilon}^p) = 654(0.00823 + \bar{\varepsilon}^p)^{0.17} \quad (3.1)$$



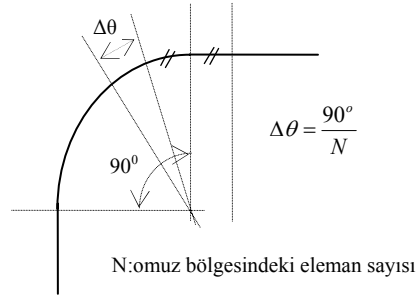
Şekil 3.2. U Kanal malzemesi için gerilme - gerinim grafiği

Çekme benzetimi yapılacak olan referans yüzey kullanılarak ofset metodu ile kalıp elemanlarının yüzeyleri elde edildi (Şekil 3.3). Elde edilen kalıp elemanları yüzeyleri ve taslak yüzey kullanılarak SE hesaplamaları için ağ yapısı oluşturuldu.



Şekil 3.3. U kanal geometrisi için elde edilen kalıp yüzeyleri

Ağ yapısı elde edilirken kalıp elemanlarını temsil eden yüzeylerdeki omuz bölgelerine düşen eleman sayısı dikkate alınarak farklı eleman büyüklüklerini içeren sonlu elemanlar modelleri oluşturuldu. Şekil 3.4'te, kalıp yüzeylerindeki omuz bölgesi üzerindeki eleman yerleşimi gösterilmektedir. Buradaki N, omuz bölgesi üzerine düşen eleman sayısını göstermektedir.



Şekil 3.4. Omuz bölgesine düşen eleman sayısına göre eleman büyüklüğü

Önerilen üç farklı eleman büyüklüğü için elde edilen ağ yapısı Tablo 3.1'de, ağ yapılarındaki en küçük eleman büyüklükleri ise Tablo 3.2'de görülmektedir.

Tablo 3.1 Omuz bölgesindeki eleman sayısı ile ağ yapısının durumu

	Erkek Kalıp		Dişi Kalıp		Pot çemberi		Taslak		Toplam	
Eleman sayısı	Eleman sayısı	Düğüm sayısı	Eleman sayısı	Düğüm sayısı	Eleman sayısı	Düğüm sayısı	Eleman sayısı	Düğüm sayısı	Eleman sayısı	Düğüm sayısı
4	1326	1404	2158	2268	832	891	1540	1638	5856	6201
8	5100	5252	8415	8632	3264	3380	6080	6273	22859	23537
12	11400	11627	18696	19019	7296	7469	13680	13969	51072	52084

Tablo 3.2. Omuz bölgesindeki eleman sayısı ile minimum eleman büyüklükleri

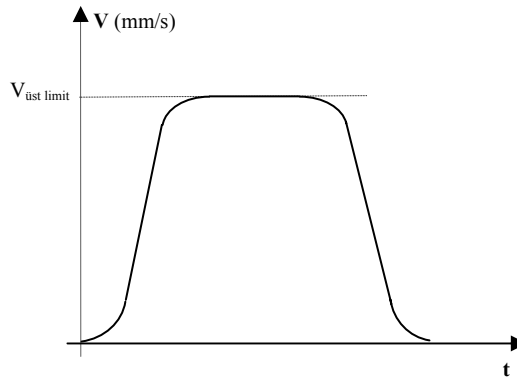
Omuzdaki Eleman sayısı	Erkek Kalıp	Dişi Kalıp	Pot çemberi	Taslak
4	1.818181	1.909091	1.923077	1.948052
8	0.95238	0.954545	0.980392	0.974999
12	0.64516	0.65625	0.654762	0.649999

Başlangıçta taslak geometri, kalıp ve pot çemberi arasında pot çemberi üzerine uygulanan baskı kuvveti miktarınca tutuldu. Daha sonra erkek, kalıp boşluğuna öngörülen çekme derinliği kadar hareket eder. Oluşturulan geometrik yapı ve

malzeme özellikleri aynı kalmak koşulu ile bazı kabuller kullanılarak hesaplama yapıldı.

Bu kabuller şu şekilde sıralanmıştır.

- Pot çemberi üzerinde baskı kuvveti 19.6 kN alındı.
- Kalıp elemanları ile taslak arasında sürtünme olmadığı varsayıldı.
- Şekillendirme zımbanın yer değiştirme mesafesi üzerinden hız kontrollü olarak yapıldı. Erkek kalıp hız-zaman grafiği Şekil 3.5'te görülmektedir.



Şekil 3.5. Erkek kalıp hızının zamana bağlı değişimi (şekillendirmedeki hız profili)

Sonlu elemanlar yönteminden kaynaklanan değişkenliklerin çekme benzetimindeki etkisinin incelenebilmesi için iki parametre seçildi. Bunlardan birincisi yukarıda anlatılan ağ yapısıyla direk bağlantılı olan eleman büyüklüğüdür. Diğer parametre ise şekillendirme hızıdır. Şekillendirme hesaplaması yapılırken erkek kalıp elemanının hızı şekillendirme hızı olarak alındı. Bu durumda birden fazla şekillendirme hızının farklı büyüklüklerdeki elemanlardan oluşan modellerdeki sonuçlara etkisi incelendi. Öngörülen şekillendirme hızları ve omuz bölgesi üzerinde bulunan eleman sayıları Tablo 3.3'te verilmektedir.

Tablo 3.3 Seçilen iki değişkenin alacağı değerler.

N (eleman sayısı)	V _{üst limit} (şekillendirme hızı)
4	1000 mm/s
8	4000 mm/s
12	10000 mm/s

Yapılması planlanan üç farklı eleman büyüklüğü ve üç farklı şekillendirme hızları için elde edilen çözüm süreleri ve adım büyüklükleri Tablo 3.4'te görüldüğü gibidir. Tablo 3.4'te görülen “Zaman adımı büyüklüğü” model üzerindeki en küçük eleman boyutu dikkate alınarak hesaplanmaktadır [29].

$$\Delta t = \frac{L}{c} \quad (3.2)$$

Buradaki L oluşturulan sonlu elemanlar ağındaki en küçük elemanın kenar uzunluğunu, c ise ses hızını ifade eder. Ses hızının sac malzeme içindeki hızının Denklem 3.3'te malzeme özelliklerine bağlı olduğu öngörülmektedir [29].

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho_0(1-\nu^2)}} \quad (3.3)$$

Burada E elastik modülü, ρ_0 malzeme yoğunluğunu, ν ise Poisson sabitini ifade etmektedir. Şekillendirme toplam süresinin zaman adımı büyüklüğüne bölünmesi ile toplam zaman adımı sayısı bulundu. Toplam zaman adımı sayısı da çözüm süresini etkilemektedir. Hesaplama süreleri Tablo 3.4'te görülmektedir.

Tablo 3.4. Açık zamana bağlı hesaplama süreleri

Eleman sayısı	Hız (mm/s)	Çözüm süresi (dak)	Toplam zaman adımı sayısı	Zaman adımı büyüklüğü (s)	Şekillendirme Toplam süresi (s)
4	1000	200	242157	3.27 E-7	0.07799
4	4000	48	60451	3.26 E-7	0.01950
4	10000	21	24190	3.27 E-7	0.00779
8	1000	1400	487317	1.63 E-7	0.07799
8	4000	351	121840	1.63 E-7	0.01950
8	10000	154	48631	1.63 E-7	0.00779
12	1000	4689	734865	1.08 E-7	0.07799
12	4000	1301	183477	1.08 E-7	0.01950
12	10000	472	73324	1.08 E-7	0.00779

Şekillendirme hesaplamaları iki adım olarak yapıldı. Birinci adımda taslak ve kalıp yüzeyleri açık zamana bağlı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak şekillendirme

parametrelerine bağılı olarak yapıldı. İkinci adımda ise kapalı adımlı çözüm yöntemi kullanılarak geri esneme hesaplaması yalnızca, şekillenmiş ve üzerinde kabuk elemanların kalınlığı, gerilme ve gerinim dağılımı bulunan taslak üzerinden yapıldı. Taslakta kullanılan ağ yapısı kabuk elemanları temsil ederler. Kullanılan bu kabuk elemanlar sac kalınlığı yönünde yedi katman ve her bir katmanda dört hesaplama noktasında sonuçları elde edecek şekilde seçildi. Kalıp yüzeylerinin şekil değişiminde müsaade edilmeyen yüzey parçacıklarından oluştuğu kabul edildi.

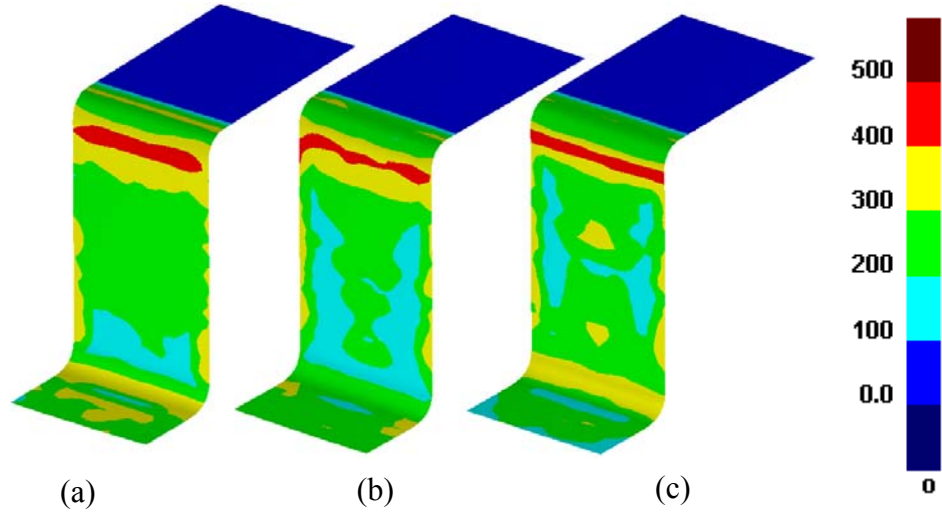
3.2. Şekillendirme Hesaplamaları Sonuçları

Şekillendirme hesaplamaları iki değişkenin üç farklı değeri için yapıldı. Dokuz hesaplama sonucu ortaya çıktı. Şekillendirme sırasında elde edilen deformasyonlar hesaplandı, şekillendirme için gerek duyulan zımba kuvveti ve şekillendirme sırasında oluşan en yüksek eşdeğer plastik gerinim değerleri hesaplama setlerinin kıyaslanması için temel parametreler olarak seçildi.

Tüm hesaplama modellerinde en yüksek plastik gerinim değerinin 0.168 – 0.173 arasında olduğu görülmüştür. Elde edilen gerinim değerleri literatürde daha önceden yapılan deneysel çalışmalarla paralellik göstermiştir [30]. Ayrıca yapılan hesaplamalarda metal levhanın şekillendirme işlemi sonunda üzerinde oluşan eşdeğer gerilme dağılımı da incelendi, şekillendirme hızının bu dağılıma olan etkisinin ihmal edilecek kadar az olduğu tespit edildi.

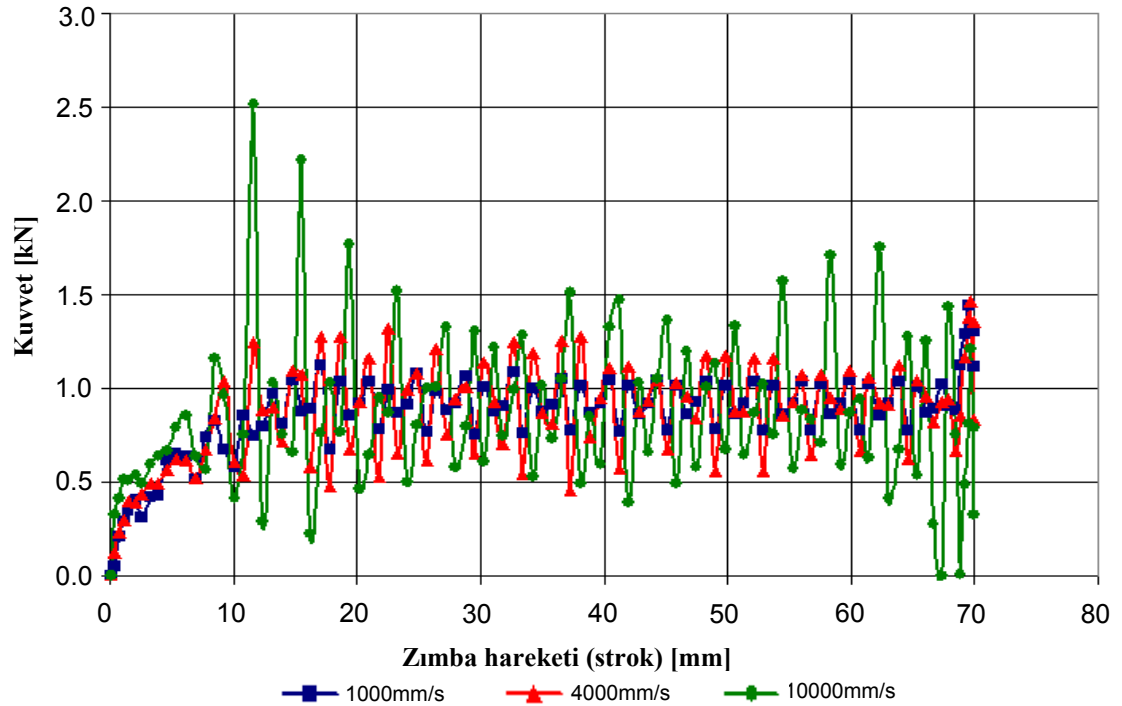
3.2.1. Omuz bölgesinde 4 eleman için şekillendirme sonuçları

Şekillendirme sonucunda maksimum gerilme değerleri birbirlerine yakın ve sac levha üzerinde yaklaşık aynı bölgede ortaya çıktı. Şekil 3.6'da görüldüğü gibi en yüksek gerilme değerleri kalıp omuz bölgesinin hemen alt kısmında oluşmuştur.



Şekil 3.6. Omuz bölgesinde 4 eleman için hızlara göre von Mises eşdeğer gerilme dağılımı. (a): 1000mm/s, (b):4000mm/s, (c): 10000mm/s

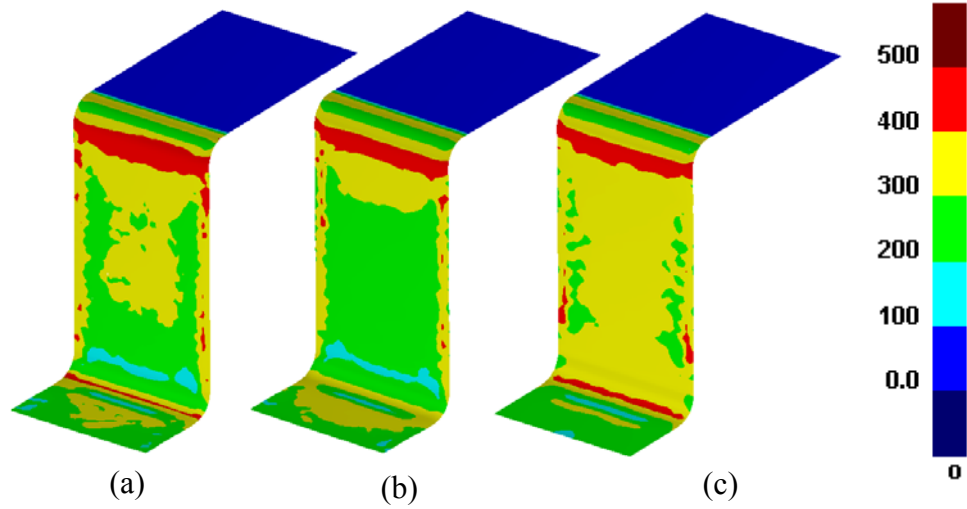
Şekillendirme için gerekli olan zımba kuvveti ortalama olarak her üç şekillendirme hızı için aynı seviyededir. Ancak şekillendirme hızının artmasıyla birlikte şekillendirme kuvvetinde oluşan salınımların artışı Şekil 3.7’de görülmektedir.



Şekil 3.7. Omuz bölgesinde 4 eleman için hızlara göre gerekli şekillendirme kuvvetleri

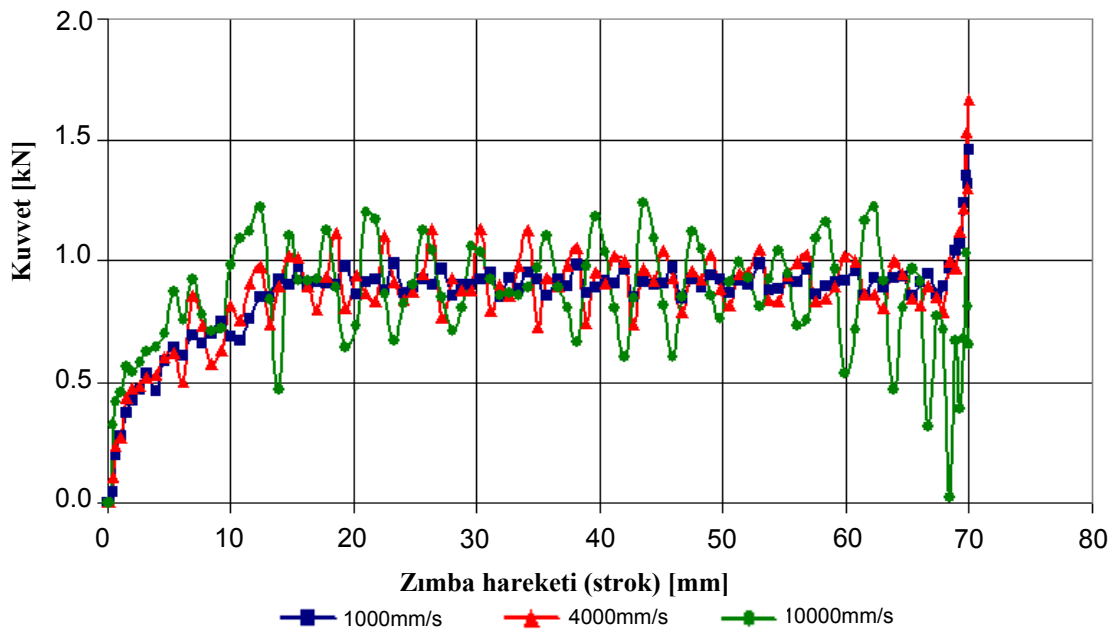
3.2.2. Omuz bölgesinde 8 eleman için şekillendirme sonuçları

Eleman büyüklüğünün artması farklı şekillendirme hızlarında oluşan gerilme değerini sayısal olarak büyük ölçüde değiştirmedir ancak düşen şekillendirme hızının oluşan gerilmeyi yan duvar üzerine yaydığı görüldü (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Omuz bölgesinde 8 eleman için hızlara göre von Mises eşdeğer gerilme dağılımı. (a): 1000mm/s, (b):4000mm/s, (c): 10000mm/s

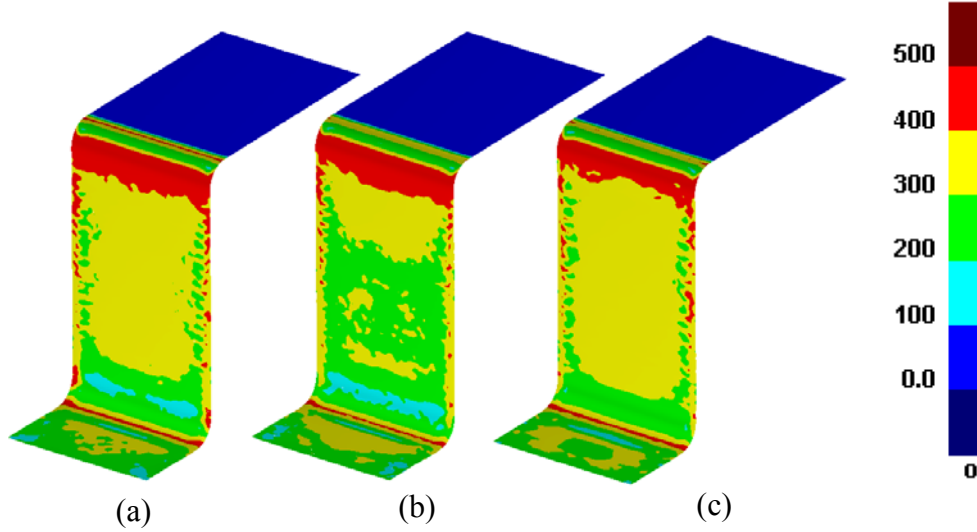
Azalan eleman büyüklüğü ortalama şekillendirme kuvvetini değiştirmedir. Fakat Şekil 3.9'da görüldüğü gibi oluşan kuvvet salınımları düşmektedir.



Şekil 3.9. Omuz bölgesinde 8 eleman için hızlara göre gerekli şekillendirme kuvvetleri

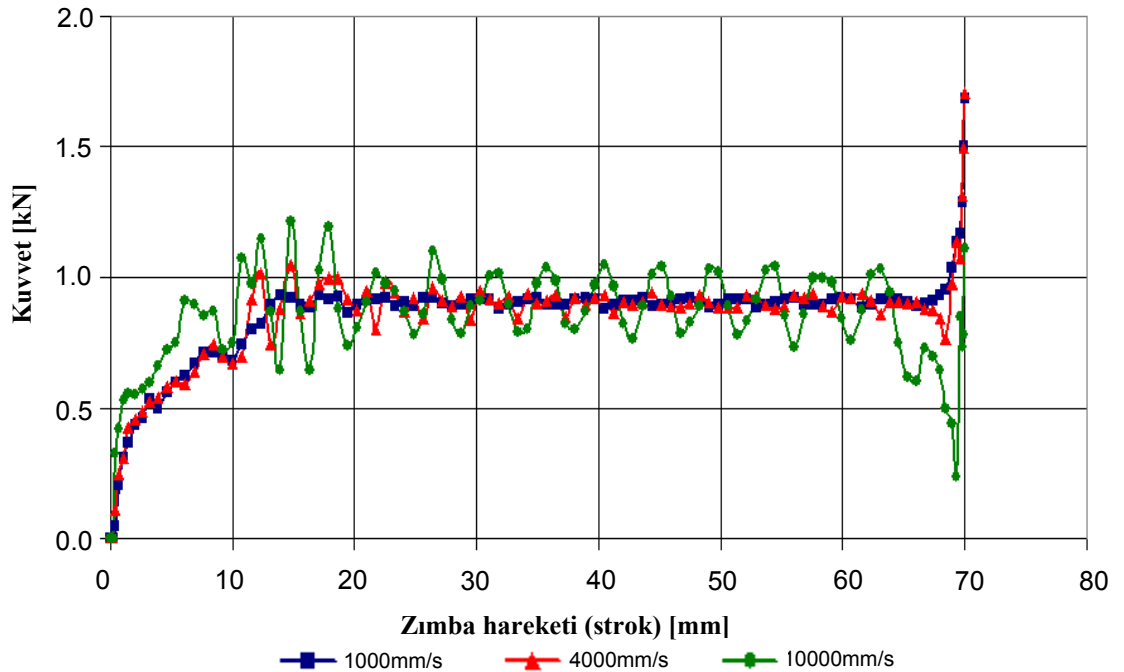
3.2.3. Omuz bölgesinde 12 eleman için şekillendirme sonuçları

Eleman büyüklüğün en küçük olduğu hesaplama modelinde de gerilme dağılımı sayısal olarak büyük farklılık göstermedi. (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. Omuz bölgesinde 12 eleman için hızlara göre von Mises eşdeğer gerilme dağılımı. (a): 1000mm/s, (b):4000mm/s, (c): 10000mm/s

Şekillendirme için gerekli olan ortalama kuvvet değerinin değişmemesi eleman büyüklüğünün şekillendirme kuvvetine etki etmediğini ortaya çıkardı (Şekil 3.11).



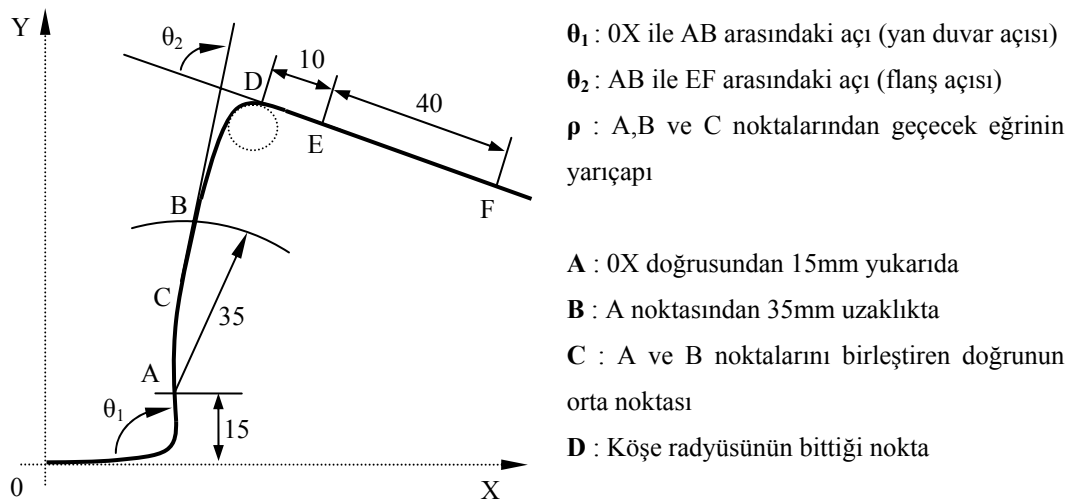
Şekil 3.11. Omuz bölgesinde 12 eleman için hızlara göre gerekli şekillendirme kuvvetleri

3.3. Geri Esneme Sonuçları

Geri esneme hesaplaması yapabilmek için şekillendirme sonundaki gerilme – gerinim ve deformasyon bilgilerine ihtiyaç duyulur. Ls-Dyna SE yazılımı kademeli işlemler için hesaplama sonuçlarını bir diğer hesaplamaya başlangıç verisi olarak hazırlayabilmektedir (*dynain file*) [29]. Daha önceki bölümlerde ifade edildiği gibi geri esneme benzetimi için sadece şekillendirilmiş sac levhanın bilgilerine ihtiyaç duyulur. Bu bilgiler aşağıda sıralanmıştır.

- Düğüm noktalarının koordinatları
- Elemanları oluşturan düğüm noktaları ve her bir düğümdeki kabuk kalınlığı
- Kabuk kalınlığı yönündeki mevcut katmanların her biri üzerindeki gerilme – gerinim değerleri.

Ls-Dyna yazılımı ile yukarıdaki giriş bilgileri kullanılarak kapalı adımlı SE yöntemiyle hesaplama yapıldı. Tüm geri esneme hesaplamalarında 0.1 yer değişim, 0.005 enerji ve 0.01 artık gerilme tolerans değerleri kullanıldı. Hesaplama tamamlandığında sonuçlar üzerinden Şekil 3.12’de gösterildiği gibi ölçümler yapılarak geri esneme miktarları bulundu.

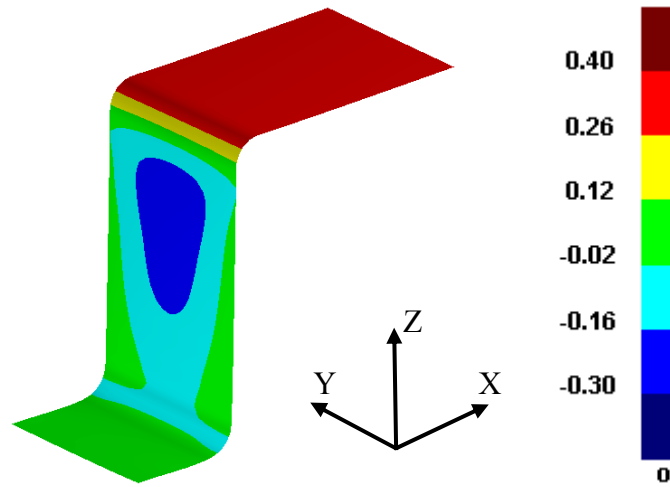


Şekil 3.12. Geri esneme miktarının hesaplanma şekli [30]

Geri esneme miktarlarının genel olarak üç parametre ile kıyaslanması uygun görülmüştür [30]. Bunlardan ikisi açısal olarak geri esneme miktarını ifade ederken üçüncüsü ise dik olan yan duvarın eğrilik yarıçapıdır.

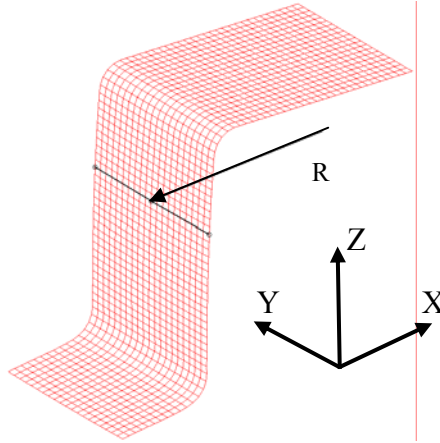
3.3.1. Yan duvar üzerindeki eğriselliğin geri esneme deformasyonuna etkisi

Geri esneme hesaplamaları sonucunda eleman büyüklüğünün ve şekillendirme hızının toplam geri esneme miktarına olan etkisi incelendiğinde; şekillendirme hızının yükseltilmesi geri esneme değerlerini azaltırken, eleman büyüklüğünün küçültülmesi ise geri esneme değerlerini arttırdığı görüldü. Fakat bazı hesaplama setlerinde hızın yükseltilmesi ile birlikte düşmesi beklenen geri esneme miktarları daha yüksek seviyede olduğu ölçüldü. Bu durumda yan duvar eğriselliğinin geri esneme deformasyonlarına etkisini incelemek amacıyla, duvar üzerinde oluşan en yüksek eğrisellik miktarları araştırıldı. Şekil 3.13’de yan duvar üzerindeki X yönündeki yer değişimleri görülmektedir.



Şekil 3.13. Geri esneme hesaplaması öncesindeki sac malzeme üzerinde X yönündeki yerdeğişim

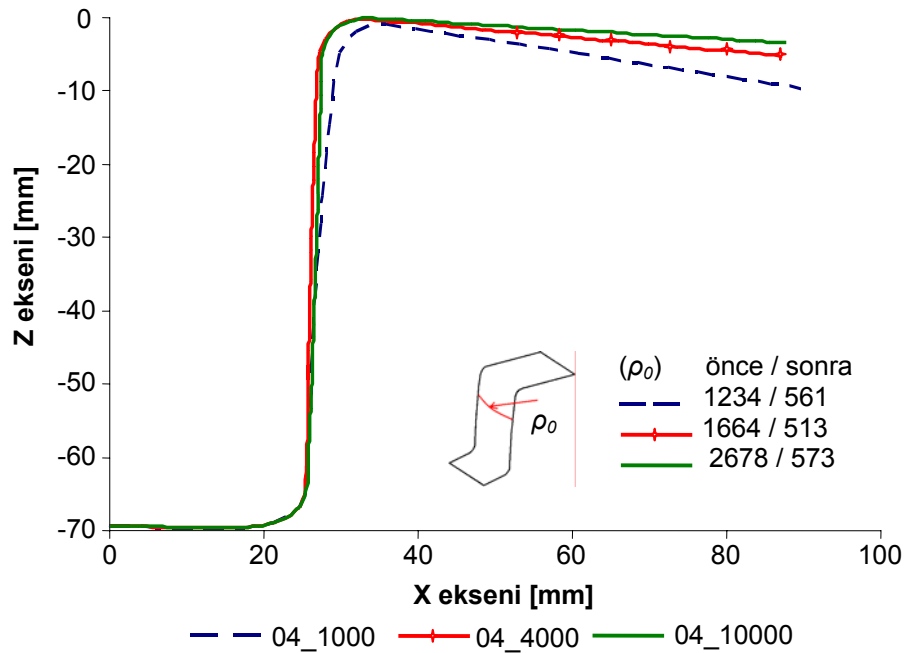
Yan duvar üzerindeki değiştirme incelendiğinde en yüksek yer değişiminin ölçüldüğü bu bölge tüm hesaplama setlerinde referans bölge olarak kabul edilerek incelendi. Şekil 3.14’te bu bölgede oluşan eğriselliğin yarıçap ölçümü görülmektedir. Ancak geri esneme hesaplamalarındaki sonuçları etkileyen bu durum her bir geri esneme grafiğinde ek bilgi olarak sunuldu.



Şekil 3.14. Yan duvar üzerindeki eğriselliğin ölçüm bölgesi

3.3.2. Şekillendirme hızının geri esneme deformasyonlarına etkisi

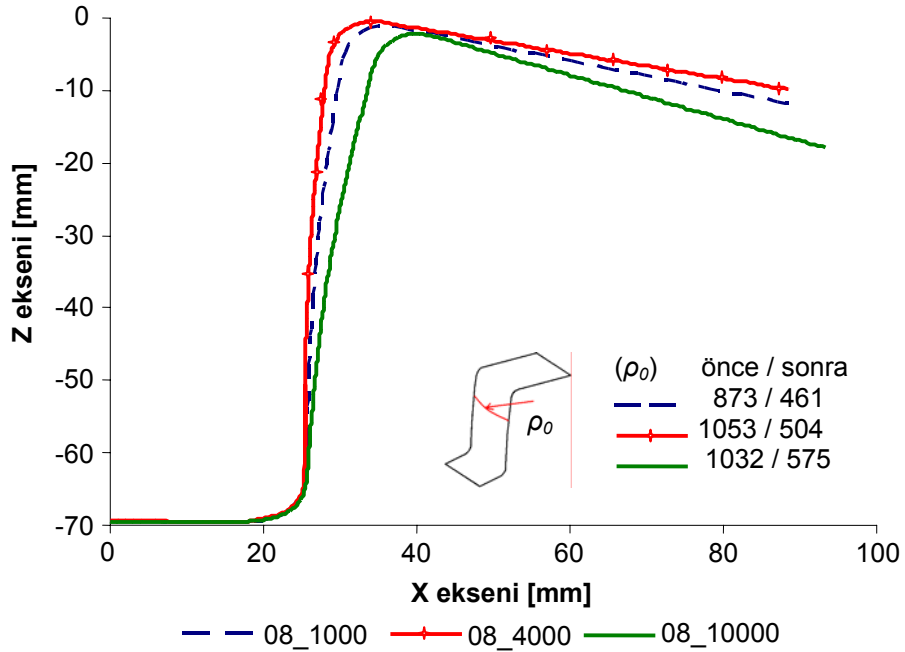
En büyük elemanlar ile oluşturulan modeldeki geri esneme sonuçları incelendi. Şekil 3.13'te görüldüğü gibi, şekillendirme hızının artması ile geri esneme deformasyonlarını olumsuz etkiledi.



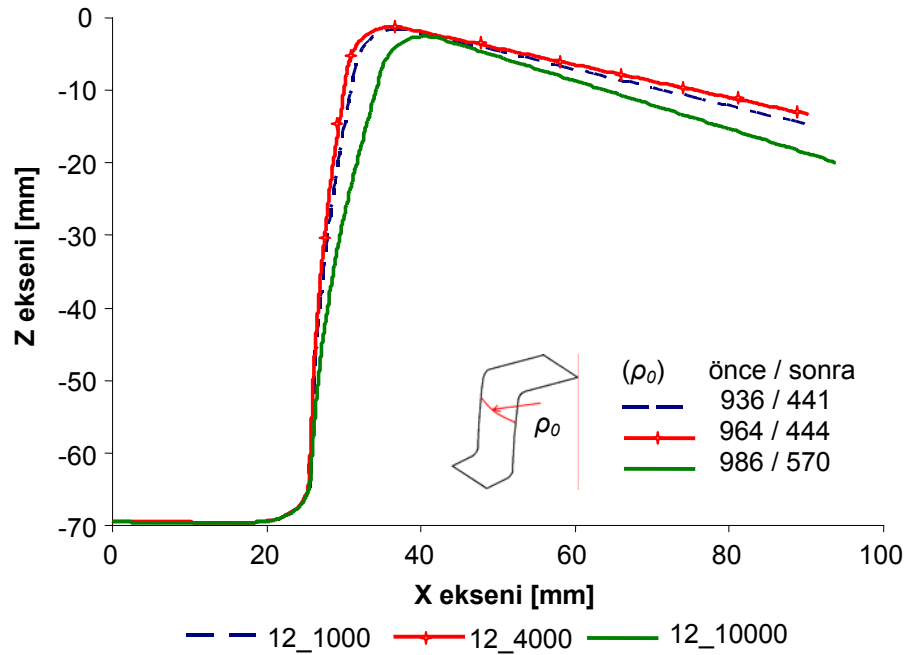
Şekil 3.15. Omuzda 4 eleman bulunan model için geri esneme miktarının farklı hızlardaki durumu

Bu modelde kesit boyunca sac yüzeylerinde oluşan gerilme ve gerinim değerlerinin geri esneme öncesi ve sonrasındaki dağılımları, farklı sürtünme katsayıları ile yapılan hesaplama sonuçları ile beraber EK-B' de verildi.

Orta büyüklükteki elemanlardan oluşan model incelendiğinde; Şekil 3.16’da görüldüğü gibi artan şekillendirme hızının geri esneme deformasyonlarını artırdığı, benzer bir değişimin en küçük elemanlardan oluşan modelde olduğu tespit edildi. Bu durum Şekil 3.17’de görülmektedir.



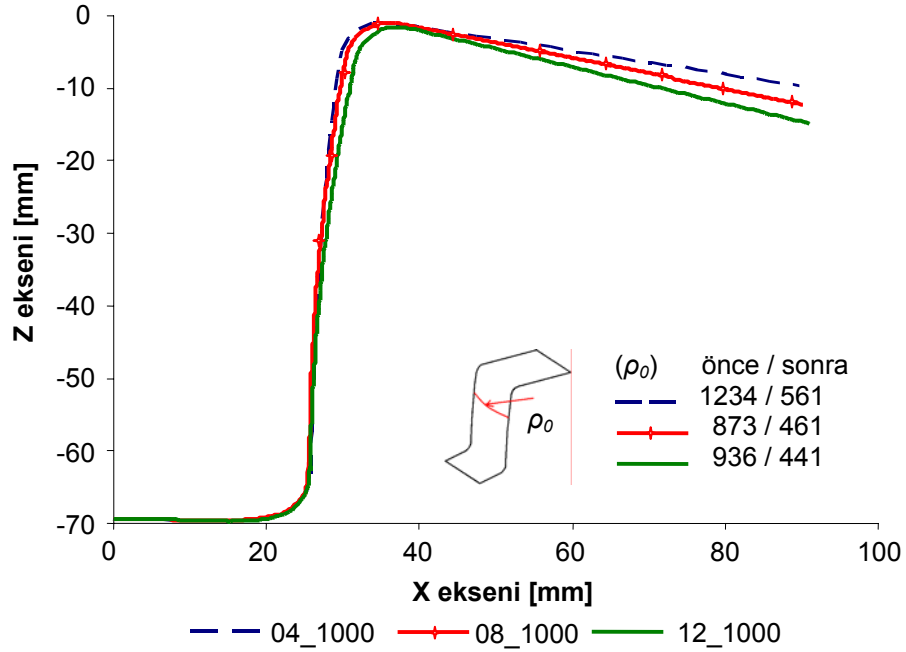
Şekil 3.16. Omuzda 8 eleman bulunan model için geri esneme miktarının farklı hızlardaki durumu



Şekil 3.17. Omuzda 12 eleman bulunan model için geri esneme miktarının farklı hızlardaki durumu

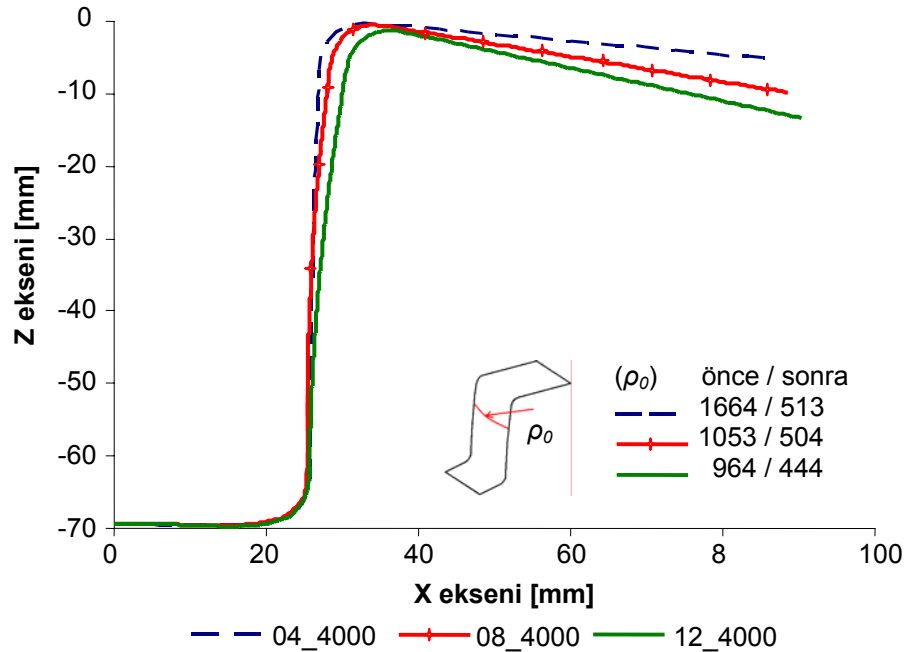
3.3.3. Eleman büyüklüğünün geri esneme deformasyonlarına etkisi

Aynı şekillendirme hızları için bir karşılaştırma yapıldığında, Şekil 3.18’de görüldüğü gibi eleman büyüklüğünün artışı ile geri esneme miktarları azalmıştır.

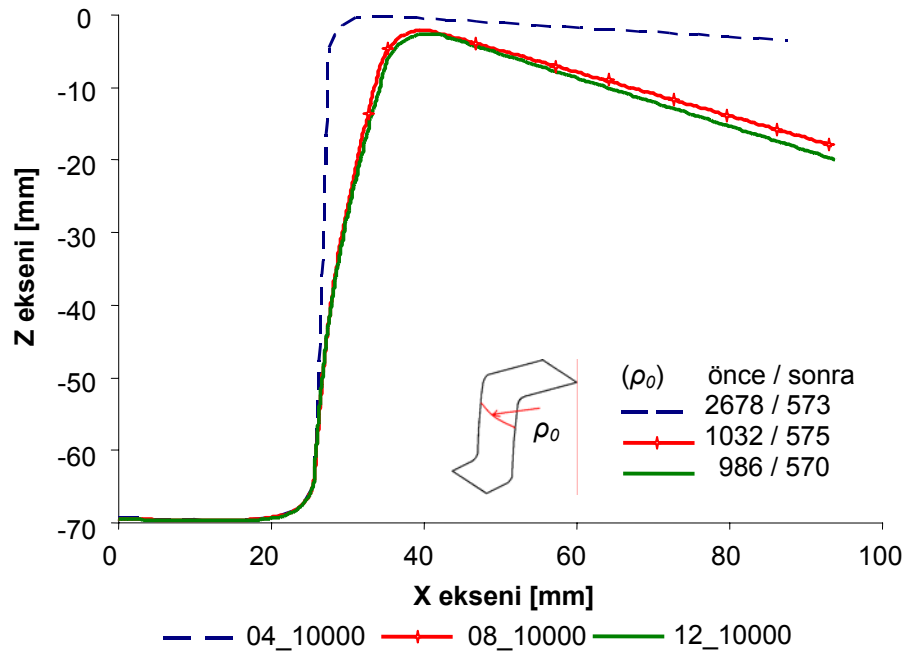


Şekil 3.18. Şekillendirme hızı 1000mm/s için eleman büyüklüklerine göre geri esneme miktarları

Şekil 4.17 ve 4.18 incelendiğinde 4000mm/s ve 10000mm/s hızlarındaki hesaplamalarda da eleman büyüklüğünün artması benzer bir etki göstermiştir.



Şekil 3.19. Şekillendirme hızı 4000mm/s için eleman büyüklüklerine göre geri esneme miktarları



Şekil 3.20. Şekillendirme hızı 10000mm/s için eleman büyüklüklerine göre geri esneme miktarları

Toplam dokuz hesaplama için geri esneme deformasyon değerleri toplu olarak Tablo 3.5'te gösterilmektedir.

Tablo 3.5. Geri esneme ölçümleri

Omuzdaki eleman	Hız (mm/s)	Yan duvar Açısı θ_1	Flanş Açısı θ_2	Eğrilik radyüsü ρ (mm)
4	1000	92.346	84.186	604
4	4000	90.186	85.902	1963
4	10000	90.818	88.252	2405
8	1000	93.602	82.538	416
8	4000	91.987	82.538	416
8	10000	97.814	81.130	237
12	1000	96.697	81.337	309
12	4000	93.947	81.893	383
12	10000	98.612	80.470	218

Bu bölümde yapılan tüm benzetimler dikkate alındığında; değişen eleman büyüklüğünün ve şekillendirme hızının, ortalama şekillendirme kuvvetine etki etmediği görüldü. Ayrıca şekillendirme sırasında ölçülen maksimum plastik gerinim değerinin de belirli bir aralıkta olduğu ve öngörülen sayısal parametre değişimleri ile

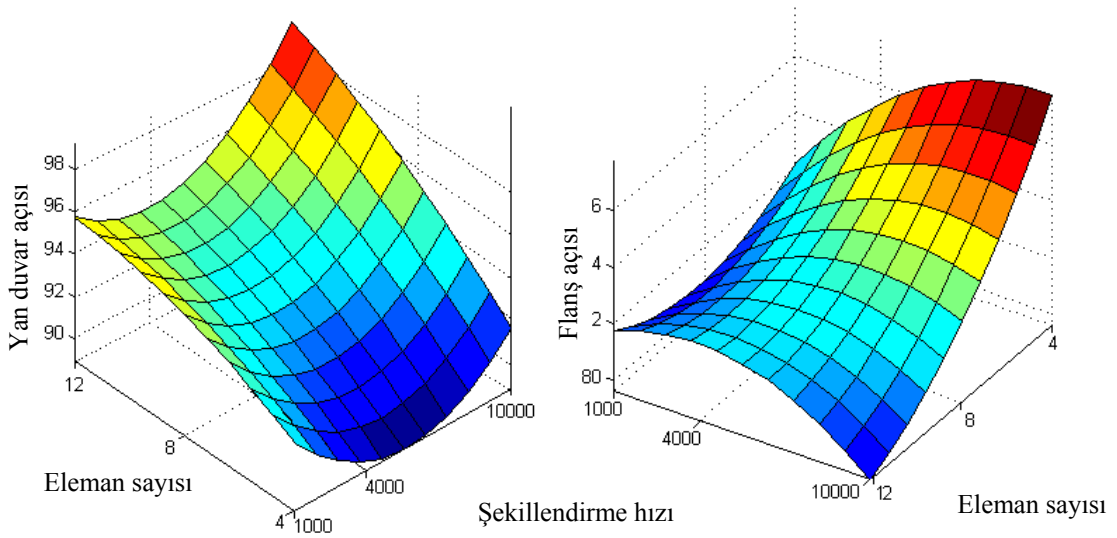
etkilenmediği ortaya çıkmıştır. Geri esneme sonuçları dikkate alındığında ise; artan şekillendirme hızının geri esneme deformasyonlarını arttırdığı, bunun yanında artan eleman büyüklüğünün geri esneme deformasyonlarını azalttığı görüldü.

Bu durumda sayısal değişkenliğin, şekillendirme hesaplamaları sonuçlarından ziyade geri esneme hesaplama sonuçlarına etki ettiği açıktır. Bu durum karşısında farklı eleman büyüklüklerinin ve şekillendirme hızlarının geri esneme sonuçlarına etkisini daha net görebilmek için bir matematiksel model oluşturuldu. Matematiksel modellerin oluşturulması ve regresyonların yapılmasında Matlab hesaplama yazılımı kullanıldı [31]. Elde edilen fonksiyon, yan duvar ve flanş açılarını, şekillendirme hızı ve eleman büyüklüğü cinsinden ifade edebilmemizi sağladı. Denklem 3.4 ve 3.5'te her iki açı için elde edilen fonksiyonlar görülmektedir.

$$\theta_1 = 90.02 + 1.97es - 1.89 \times 10^{-3}v + 5.29 \times 10^{-5}esv - 0.043es^2 + 1.49 \times 10^{-7}v^2 \quad (3.4)$$

$$\theta_1 = 84.28 - 1.14es + 1.83 \times 10^{-3}v - 1.05 \times 10^{-4}esv + 0.074es^2 - 7.25 \times 10^{-8}v^2 \quad (3.5)$$

Burada θ_1 yan duvar açısını θ_2 ise flanş açısını temsil ederken es eleman sayısını v ise şekillendirme hızını etmektedir. Şekil 3.21'de yan duvar ve flanş açılarının eleman sayısına ve sürtünme katsayısına bağlı değişimleri grafik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.21. Geri esneme açılarının şekillendirme hızı ve eleman sayısına bağlı grafikleri [31]

Yapılmış olan şekillendirme benzetimleri ile elde edilen matematiksel modellerin, hesaplanmamış eleman sayısı ve şekillendirme hızları için vereceği cevabın hassasiyetinin tespit edilebilmesi için dört hesaplama daha yapılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanan sonuçlar ile fonksiyonlardan elde edilen sonuçlar Tablo 3.6 ve 3.7’de karşılaştırılmıştır.

Tablo 3.6. Fonksiyon kullanılarak elde edilen ve Hesaplanan yan duvar açısı (Θ_1)

Eleman büyüklüğü	Şekillendirme hızı [mm/s]	Fonksiyondan elde edilen değer	Hesaplanan değer	Sapma miktarı [%]
04	6000	88.888	89.663	0.8
06	2600	91.543	91.006	0.6
08	8000	94.529	94.493	0.03
10	7800	95.226	96.744	1.5

Tablo 3.7. Fonksiyon kullanılarak elde edilen ve Hesaplanan flanş açısı (Θ_2)

Eleman büyüklüğü	Şekillendirme hızı [mm/s]	Fonksiyondan elde edilen değer	Hesaplanan değer	Sapma miktarı [%]
04	6000	86.840	89.305	2.7
06	2600	83.574	82.381	1.4
08	8000	81.895	82.736	1.0
10	7800	80.963	80.507	0.5

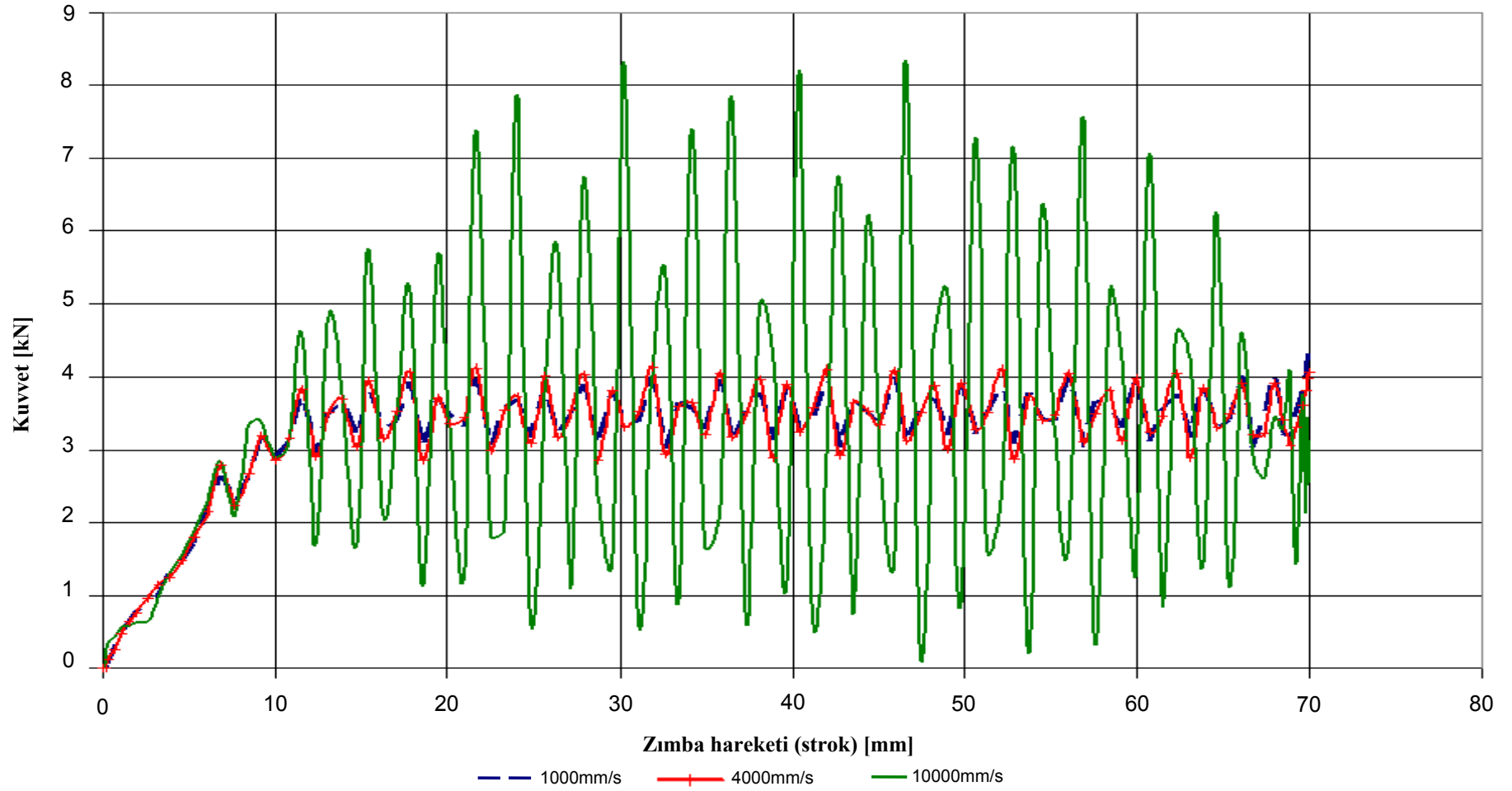
Fonksiyondan elde edilen değer ile sonlu elemanlar hesaplamaları ile elde edilen değerler kabul edilebilir sınırlar içindedir. Bu durumda sonlu elemanlar hesaplaması yapılmaya gerek kalmadan istenen eleman büyüklüğü ve şekillendirme hızı için sonuçlar elde edilebilir.

BÖLÜM 4. KANAL ÇEKME İŞLEMİNE ETKİ EDEN PROSES PARAMETRELERİ

Bu bölümde U kanal çekme işlemine etki eden proses parametreleri incelendi. Bir önceki bölümde yapılan kalıp yüzeyleri, taslak ve malzeme özellikleri ile ilgili tanımlamaların tamamı aynen kullanıldı. Yapılacak olan parametre değişikliklerinin şekillendirme kuvveti ve geri esneme deformasyonlarına etkileri incelenerek sonuçlar cevap yüzey fonksiyonları olarak ifade edildi. Oluşturulan yüzeyler ile birden fazla giriş verisi kullanılarak elde edilen tek çıkış verisi arasındaki ilişkinin daha kolay anlaşılabilmesi amaçlandı. U kanal şekillendirme sürecine etki eden iki proses parametresi esas alındı. Bunlar; kalıp yüzeyleri ile sac metal levha arasındaki sürtünme katsayısı ve pot çemberine uygulanan baskı kuvvetidir [19,20,23,24]. Bu bölümde esas alınan bu iki parametrenin değişkenliğinin şekillendirme kuvveti ve geri esneme deformasyonlarına etkisi incelenecektir. İlk olarak sürtünme katsayısının değişimi, daha sonrasında ise pot çemberine uygulanan baskı kuvvetinin değişiminin sonuçlara olan etkisi incelenecektir.

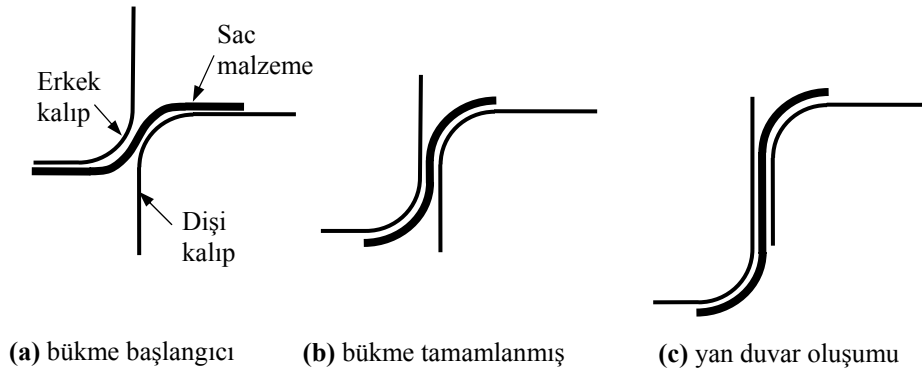
4.1. Sürtünme Katsayısının Etkisi

Sürtünmenin birbirine temas eden tüm yüzey çiftleri arasında aynı değerde olduğu varsayıldı. Sonlu elemanlar ağ yapısı bir önceki bölümde yapılan hesaplamalarda kullanıldığı şekli ile ele alındı. Üç eleman büyüklüğü ve üç farklı şekillendirme hızı ile hesaplamalar yapıldı. Toplam dokuz sonlu elemanlar modeli kullanılarak iki farklı sürtünme katsayısı ile hesaplama yapıldı. İlk olarak sürtünme katsayısı 0.060 olarak alındı. Daha önceki hesaplamalarda sıfır olan sürtünme katsayısının artması şekillendirme için gerekli olan ortalama kuvveti artırdı. Şekil 4.1 incelendiğinde, sürtünme kuvveti ile birlikte artan şekillendirme hızının kuvvet salınımlarını artırdığı görüldü.



Şekil 4.1. Omuz bölgesinde 4 eleman bulunan, sürtünme katsayısı 0.06 olan model için farklı hızlara göre şekillendirme kuvvetinin değeri

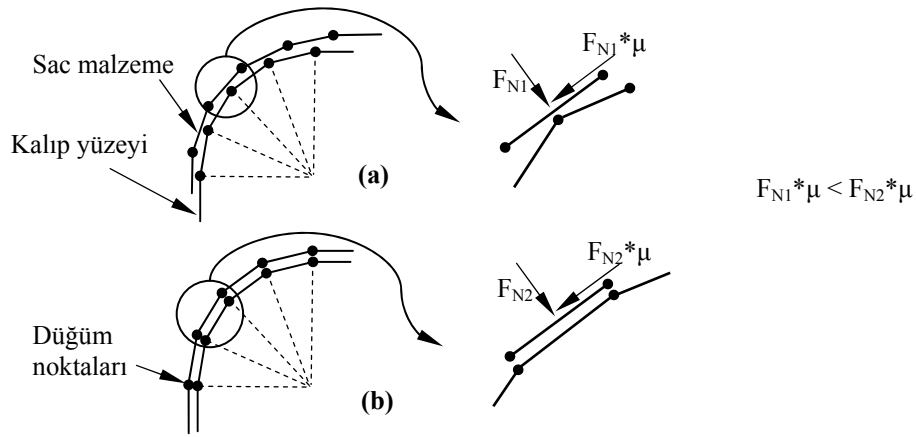
Şekillendirme ilk olarak erkek zımbanın burun kısmında ve dişi kalıbın omuz bölgesindeki bükme işlemini tamamlar. Her iki bükme tamamlanıncaya kadar şekillendirme kuvvetinin düzgün sayılabacak bir şekilde arttığı görülmektedir. Şekil 4.2’de çekme işlemi adımları daha açık bir şekilde görülmektedir.



Şekil 4.2. Çekme sırasında bükmenin gerçekleşmesi ve yan duvar oluşumu

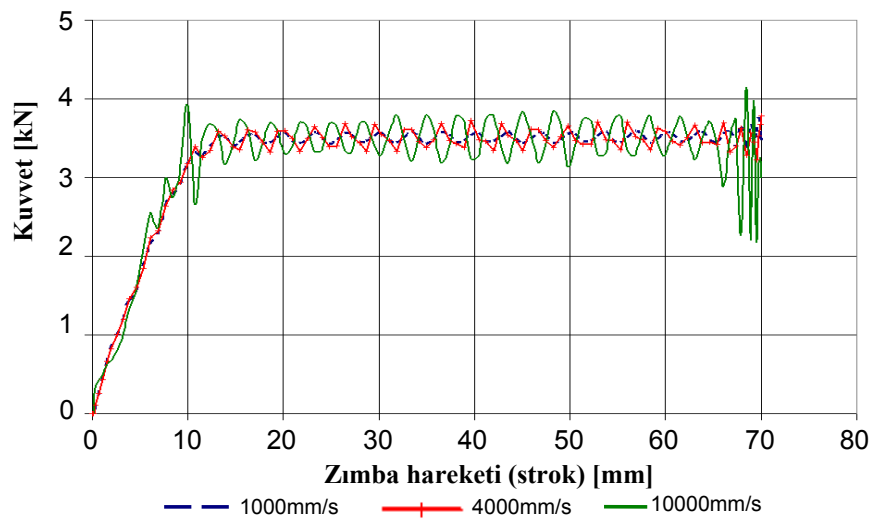
Çekme derinliği 10mm seviyesine ulaştığı zaman her iki bükmenin tamamlandığı ve şekillendirme kuvvetinin yaklaşık 3.5kN seviyesine kadar yükseldiği görülmektedir. Daha sonraki safhada; yani yan duvar oluşumunun başlangıcı ile şekillendirme sürecinin tamamlandığı noktaya kadar, şekillendirme kuvvetinin salınımlar yaptığı ancak ortalama değerinin sabit kaldığı görülmektedir. Şekil 4.1’de bu etkinin her üç şekillendirme hızında da oluştuğu görülebilir. Özellikle en büyük elemanlı modeller ile yapılan hesaplamalarda salınım sebebi sac malzeme ile kalıp arasındaki temas mekanizmasından kaynaklanmaktadır. Hesaplanan sürtünme kuvveti kalıp omuz bölgesinin üzerinden akan sac malzeme için iki farklı değerdedir. Şekil 4.3’te sac malzemeyi ve kalıp yüzeyini temsil eden elemanların birbirleri üzerinden geçişleri sırasında oluşan kuvvetleri görülmektedir.

Şekillendirme sırasında hesaplanan sürtünme kuvveti bu iki değer arasında sürekli olarak değişir. Bu değişim şekillendirmeye karşı gelen direnç kuvvetini direkt etkilediğinden dolayı şekillendirme kuvvetinde salınımlar olması doğaldır. Diğer taraftan şekillendirme hızının artması ile beraber artan momentum da salınım etkisini daha da artırmaktadır.



Şekil 4.3. Sac malzemin omuz bölgesinden geçişi sırasında hesaplanan farklı sürtünme kuvvetleri

Yapılan hesaplamalar sonucunda omuzda sekiz eleman bulunduran orta büyüklükteki elemanlarda oluşan modelde ortalama şekillendirme kuvvetinin yine 3.5kN seviyesinde olması eleman büyüklüğünün ortalama şekillendirme kuvvetine etkisinin olmadığını ortaya çıkardı. Ayrıca orta büyüklükteki elemanlar kullanıldığında şekillendirme hızının artması ile ortaya çıkan dinamik etkinin de azaldığı görüldü. Şekil 4.4'te gösterilen grafikte şekillendirme süresince hesaplanan kuvvetin salınım miktarının düştüğü ve ortalama şekillendirme kuvvetinin değişmediği görülmektedir.



Şekil 4.4. Omuz bölgesinde 8 eleman bulunan, sürtünme katsayısı 0.06 olan model için farklı hızlara göre şekillendirme kuvvetinin değeri

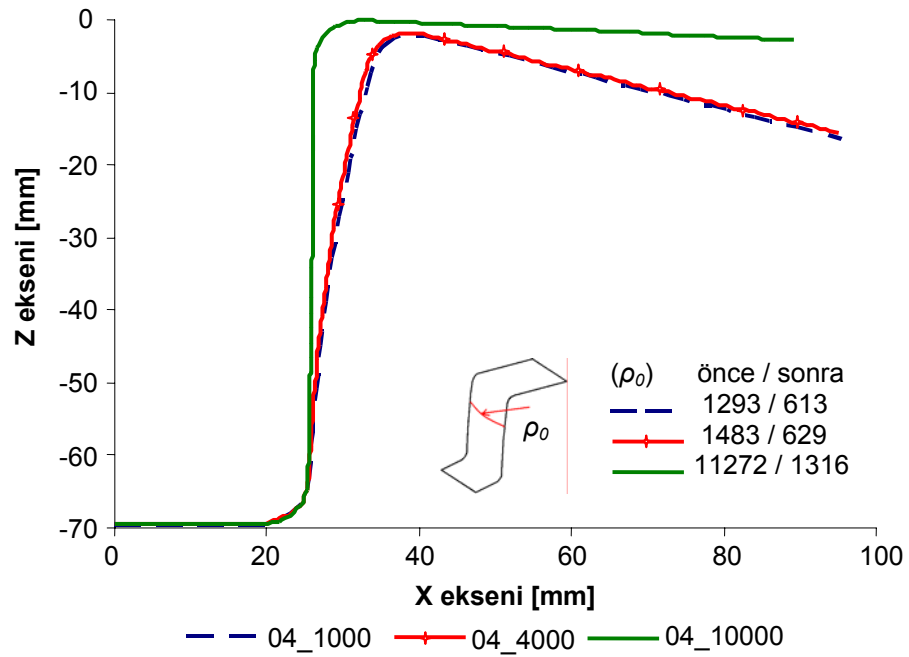
Eleman büyüklüğünün bir kademe daha düşürülmesi ile temas mekanizmasından kaynaklanan kuvvet salınımlarının daha da düştüğü, özellikle düşük şekillendirme hızında çok daha istikrarlı olduğu görüldü. Ortalama şekillendirme kuvvetinin değişmemesi eleman büyüklüğünün ortalama şekillendirme kuvvetine etkisinin olmadığını doğrular niteliktedir. Geri esneme hesaplama yöntemi daha önceki bölümde yapılan kabuller ile hesaplandı ve aynı ölçüm noktalarında ölçümler yapıldı.

Tablo 4.1. Sürtünme katsayısı 0.06 olması durumunda geri esneme ölçümleri

Omuzdaki eleman	Hız (mm/s)	Yan duvar Açısı θ_1	Flanş Açısı θ_2	Eğrilik ρ (mm)
4	1000	97.683	83.123	322.365
4	4000	96.966	83.252	301.820
4	10000	90.836	88.095	2907.060
8	1000	102.585	78.981	177.456
8	4000	101.691	79.655	200.387
8	10000	100.595	80.760	217.256
12	1000	102.962	78.873	168.643
12	4000	101.530	80.204	215.708
12	10000	102.475	78.912	179.647

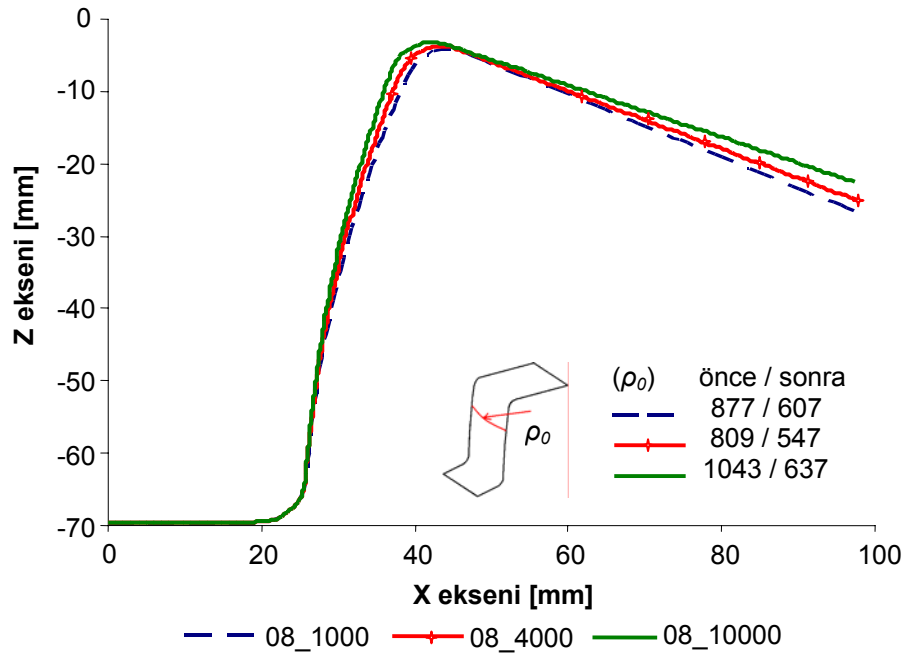
Hesaplanan geri esneme deformasyonları incelendiğinde, aynı eleman büyüklüğünde artan şekillendirme hızının ölçülen deformasyon miktarlarını azalttığı görüldü. Oysaki 3. bölümde sürtünmenin ihmal edildiği hesaplama adımlarında bu durum tam tersi olarak ortaya çıkmıştı. Bu durum sürtünme mekanizmasının oluşturduğu değişken normal kuvvetlerden kaynaklanmaktadır.

En büyük elemanlı modeldeki deformasyonlar incelendiğinde en yüksek hızda yapılan şekillendirme sonucunda elde edilen geri esneme miktarlarının beklenen değerlerin altında oluştu. Şekil 4.5'te görüldüğü gibi 10000mm/s şekillendirme hızı ile yapılan hesaplamada geri esneme miktarının bu seviyede düşük olmasının sebebi şekillendirme sırasında oluşan kuvvetlerin değişiminin malzeme üzerinde çevrimsel yükleme etkisi yapmış olmasından dolayıdır [14]. Çevrimsel yükleme ile pekleşen malzemenin elastiklik özelliğinin azalması, özellikle yan duvar açısının neredeyse hiç değişmemesini sağlamaktadır.



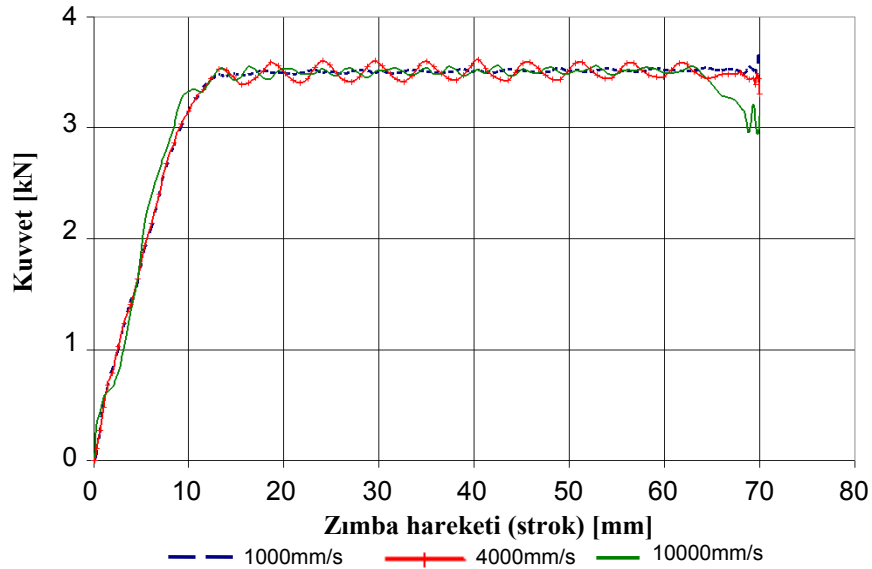
Şekil 4.5. Omuzdaki bölgesinde 4 eleman bulunan ve sürtünme katsayısı 0.06 olan modelde farklı şekillendirme hızlarına göre geri esneme miktarları

Eleman büyüklüğünün düşmesi ile şekillendirme hızının geri esnemeye olan etkisi beklenen şekilde oldu. Şekil 4.6'da omuz üzerinde 8 eleman bulunduran modelde artan şekillendirme hızı geri esneme deformasyonlarını azaltmıştır.



Şekil 4.6. Omuzdaki bölgesinde 8 eleman bulunan ve sürtünme katsayısı 0.06 olan modelde farklı şekillendirme hızlarına göre geri esneme miktarları

En küçük elemanlarla yapılan hesaplamalarda şekillendirme için gerekli olan ortalama kuvvetin değişmediği görüldü. Bu da daha önceden ortaya atılan hipotezi doğrular niteliktedir. Şekillendirme süresince hesaplanan kuvvet değerindeki dalgalanma düştü. Bu durum eleman büyüklüğünün azalması ile düşen dinamik etkiden dolayıdır (Şekil 4.7).

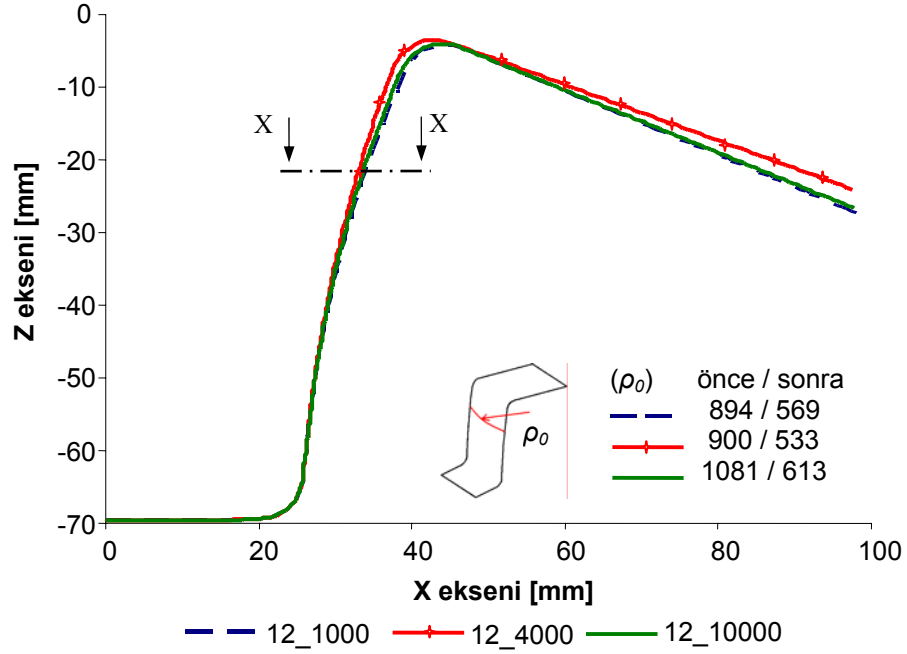


Şekil 4.7. Omuz bölgesinde 12 eleman bulunan, sürtünme katsayısı 0.06 olan model için farklı hızlara göre şekillendirme kuvvetinin değeri

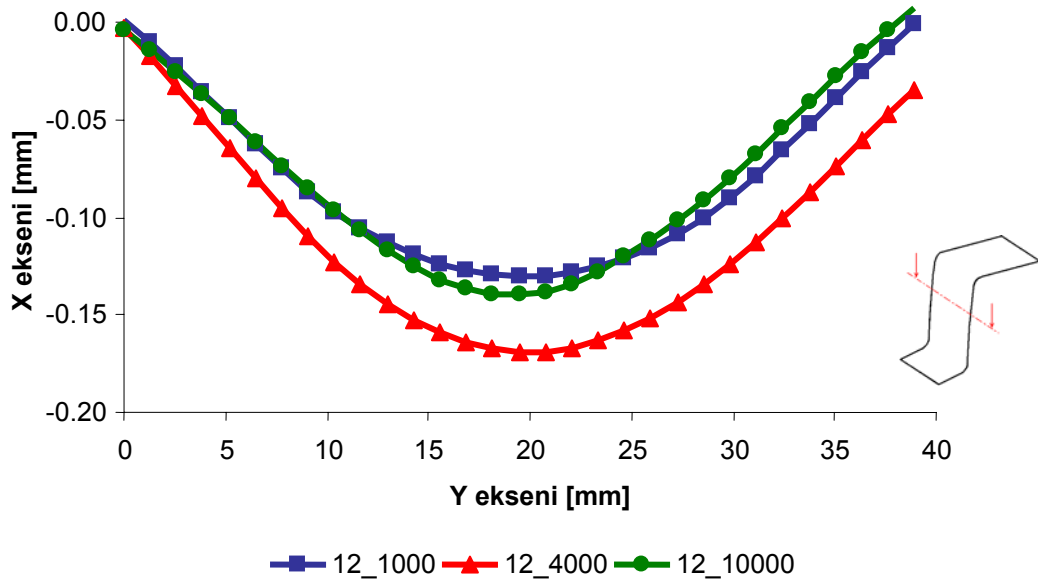
Geri esneme deformasyonları incelendiğinde, orta büyüklükteki elemanlarla yapılan hesaplamada olduğu gibi yükselen şekillendirme hızının geri esneme miktarını azaltması beklenirken, en küçük elemanlardan oluşan modelde, en yüksek hızda yapılan şekillendirmenin bu öngörüü desteklemediği görüldü. Şekil 4.8'de en küçük elemanlar ile yapılan geri esneme sonuçları görülmektedir.

Yan duvar üzerinde oluşan eğriselliğin geri esneme deformasyonlarına olan etkisi bir önceki bölümde ifade edilmişti. Bu etkinin incelenebilmesi için Şekil 4.8'de gösterilen X-X kesiti incelendi. Şekil 4.19'daki grafikte, farklı şekillendirme hızlarına göre hesaplanan geri esneme sonucunda oluşan yan duvar kesitleri üst üste getirildi. 10000mm/s hızı için hesaplanan modeldeki yan duvar eğrisellik değerinin beklenenin altında çıktı. Kesitteki bu değişim yan duvarın Y eksenine göre eğilme ataletini azalttı ve daha fazla geri esneme oluşturdu. 4000mm/s hızı için hesaplanan eğrisellik değerinin beklenenin üzerinde olması ise, yan duvar eğilme direncini

artırarak, beklenenden daha az geri esneme oluşturdu. Sonuç olarak 1000mm/s ve 10000mm/s şekillendirme hızlarına ait eğrisellikler X-X kesitinde birbirine çok yakın olduğundan her iki hesaplama sonucu birbirine yakın deformasyonlar oluşturdu.



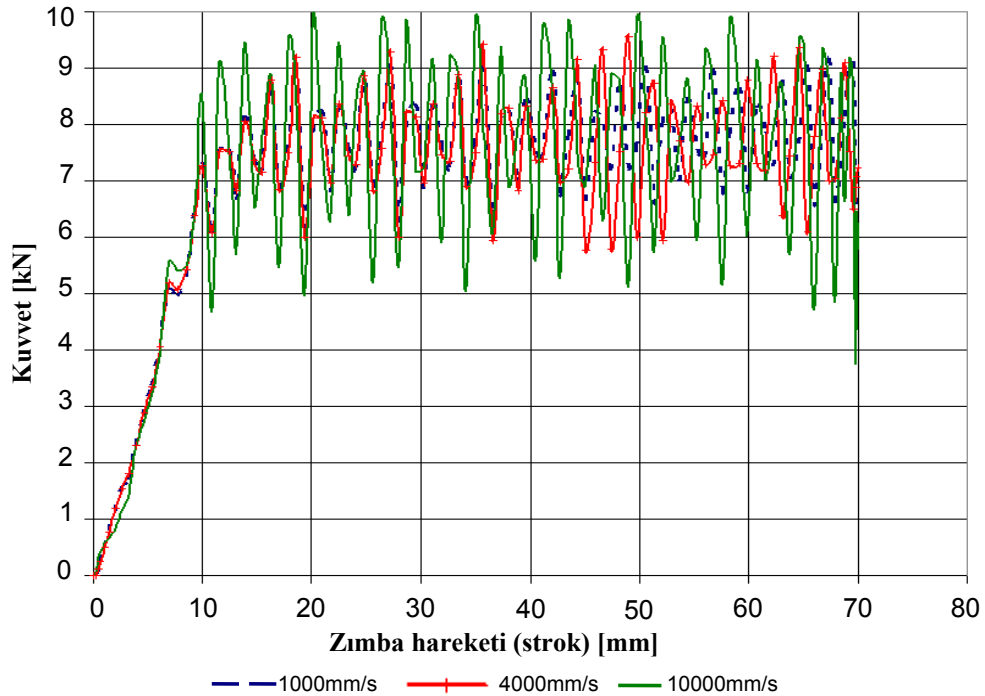
Şekil 4.8. Omuzdaki bölgesinde 12 eleman bulunan ve sürtünme katsayısı 0.06 olan modelde farklı şekillendirme hızlarına göre geri esneme miktarları



Şekil 4.9. Omuzdaki bölgesinde 12 eleman bulunan ve sürtünme katsayısı 0.06 olan modelde kanal yan duvar kesitinin farklı şekillendirme hızlarına göre değişimi (X-X kesitleri)

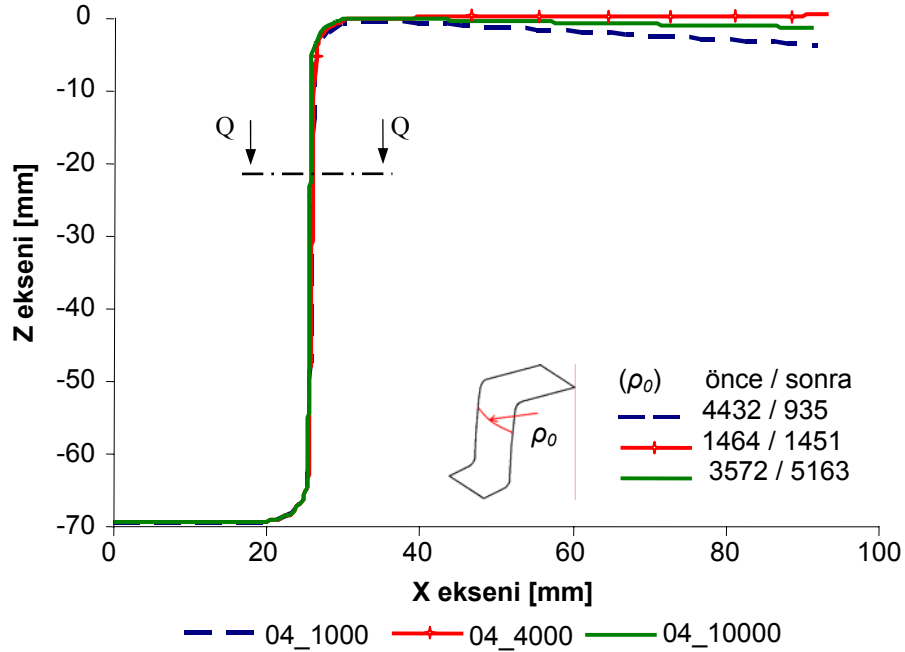
Sürtünme katsayısının artması ile pot çemberi ve dişi kalıp arasında oluşan sürtünme kuvveti miktarı arttı, bu artış şekillendirme kuvvetini de artırdı. Gerekli olan şekillendirme kuvvetindeki değişim incelendiğinde; 0.06 sürtünme katsayısı ile yapılan hesaplamalarda elde edilen ortalama şekillendirme kuvveti 3.5kN olurken 0.144 sürtünme katsayısının kullanıldığı hesaplamalarda bu değer yaklaşık olarak 7.7kN olarak hesaplandı. Bu artışın lineer olduğu kabul edilebilir. Yani sürtünme katsayısındaki değişim kalıp yüzeyleri arasında oluşan sürtünme kuvvetini ve şekillendirme kuvvetini birinci dereceden bir fonksiyon ile etkilemektedir.

İlk olarak en büyük elemanlı model üzerinde şekillendirme kuvveti hesaplanmıştır. Hesaplanan kuvvetin ortalama değer üzerinde bir salınım gerçekleştirdiği görülmektedir (Şekil 4.10). Kuvvetin yapmış olduğu bu dalgalanmanın sebebi daha önceden açıklandığı gibi temas mekanizmasının sac malzemenin akışı sırasında hesapladığı farklı sürtünme kuvvetlerinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca en büyük elemanlardan oluşan model, şekillendirme hızının dinamik etkisinden en çok etkilenen modeldir.



Şekil 4.10. Omuz bölgesinde 4 eleman bulunan, sürtünme katsayısı 0.144 olan model için farklı hızlara göre şekillendirme kuvvetinin değeri

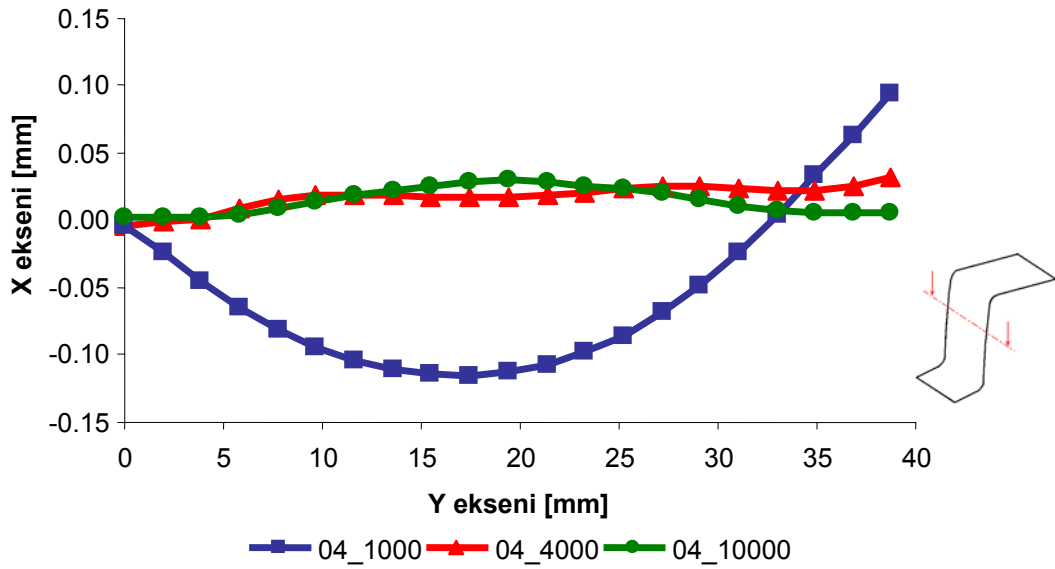
Şekillendirme kuvvetinde oluşan bu dalgalanma sac malzeme üzerinde ortalama değeri 7.7kN olan çevrimsel yükleme etkisi gerçekleştirdi. Bir önceki sürtünme katsayısı için yapılan şekillendirme hesaplamasında bu ortalama değer 3.5kN seviyesindedir. Etki eden ortalama kuvvetin bu şekilde yükselmesi hesaplanan geri esneme deformasyonlarını olumsuz etkilemektedir.



Şekil 4.11. Omuzdaki eleman büyüklüğü 4 ve sürtünme katsayısı 0.144 olan modelde farklı şekillendirme hızlarına göre geri esneme miktarları

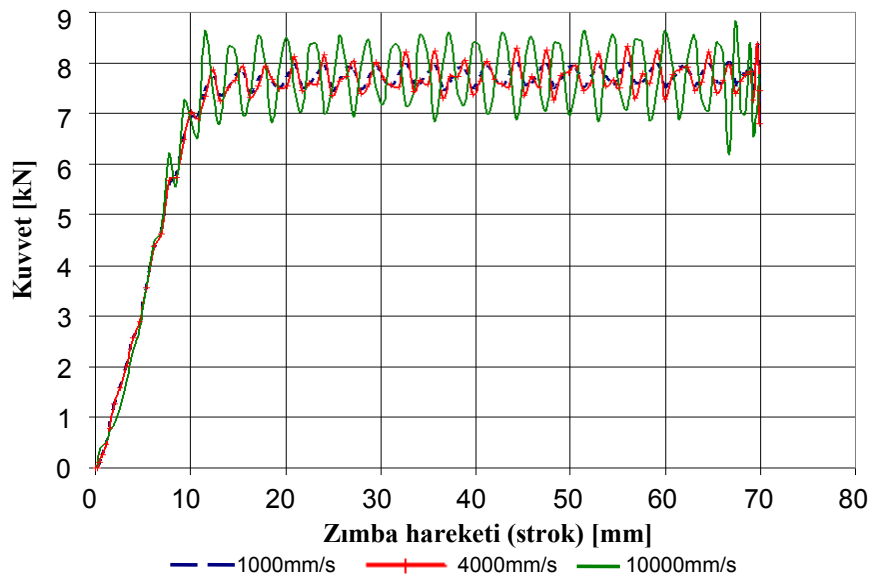
Hesaplanan geri esneme deformasyonları Şekil 4.11'de görüldüğü gibidir. Grafik incelendiğinde 4000mm/s şekillendirme hızı için elde edilen geri esneme deformasyonun ters yönde olduğu, 10000mm/s şekillendirme hızı için ise ihmal edilebilecek kadar az geri esneme deformasyonu hesaplandı. Bu durumda yan duvar üzerinde Q-Q kesitinin farklı şekillendirme hızlarındaki durumları incelendi (Şekil 4.12).

Kesitlerde yalnızca en düşük şekillendirme hızı için hesaplanan yan duvar eğriselliği kabul edilebilir formdadır. Diğer iki form ise öngörülen formun dışında bir şekil değişimine uğradığından dolayı elde edilen deformasyonlar düşer. Sonuç olarak,, özellikle büyük elemanların kullanıldığı modelde yüksek sürtünme katsayısının yüksek şekillendirme hızlarında mantıksız sonuçlar ürettiği görüldü.



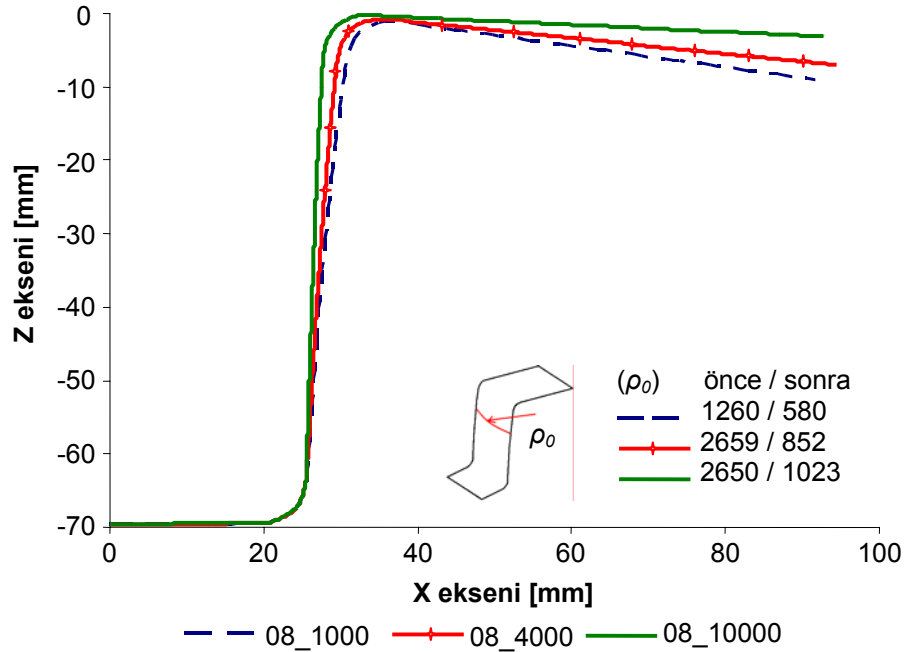
Şekil 4.12. Omuzdaki bölgesinde 4 eleman bulunan ve sürtünme katsayısı 0.144 olan modelde kanal yan duvar kesitinin farklı şekillendirme hızlarına göre değişimi (Q-Q kesitleri)

Eleman büyüklüğünün düşürülmesi temas mekanizmasından kaynaklanan kuvvet dalgalanmalarını kısmen azalttı. Şekillendirme sırasında hesaplanan kuvvetler ortalama 7.5kN seviyesindedir. Bu durum, gerek düşük sürtünme kuvveti etkisi altında, gerekse yüksek sürtünme kuvveti etkisi altında şekillendirme yapıldığında eleman büyüklüğünün ya da şekillendirme hızının ortalama kuvvete hiçbir şekilde etki etmediğini kanıtladı. Şekil 4.13'te orta büyüklükteki elemanları içeren model ile yapılan şekillendirme için hesaplanan kuvvetler görülmektedir.



Şekil 4.13. Omuz bölgesinde 8 eleman bulunan, sürtünme katsayısı 0.144 olan model için farklı hızlara göre şekillendirme kuvvetinin değeri

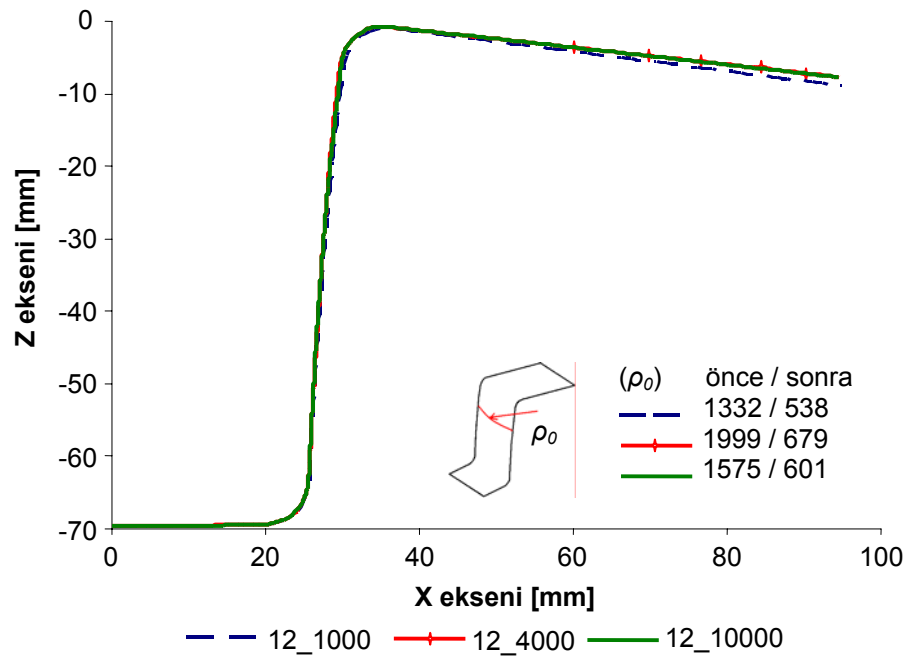
Orta büyüklükteki elemanlar kullanılarak yapılan hesaplama sonucunda geri esneme deformasyonları Şekil 4.14'te görülmektedir. Hesaplama sonuçları incelendiğinde aynı eleman büyüklüğü ve sürtünme katsayısı için artan şekillendirme hızı geri esneme deformasyon miktarını azaltmaktadır.



Şekil 4.14. Omuzdaki eleman büyüklüğü 8 ve sürtünme katsayısı 0.144 olan modelde farklı şekillendirme hızlarına göre geri esneme miktarları

Her iki sürtünme katsayısı ile tüm şekillendirme hızlarında gerek şekillendirme gerek geri esneme deformasyonları incelendiğinde, orta büyüklükteki elemanlardan oluşan model şekillendirmeye etki eden proses parametrelerinin değişimini en iyi yansıtan model oldu.

Eleman büyüklüğünün düşürülmesi ile şekillendirme hızının geri esneme deformasyonlarına olan etkisi net olarak görülemedi. Şekil 4.15'te de görüldüğü gibi birbirine çok yakın çıkan deformasyon miktarlarından dolayı bu büyüklükteki elemanlardan oluşan model üzerinde şekillendirme ve geri esnemeye etki eden parametrelerin incelenmesinin uygun olmayacağı kanaatine varıldı.



Şekil 4.15. Omuzdaki eleman büyüklüğü 12 ve sürtünme katsayısı 0.144 olan modelde farklı şekillendirme hızlarına göre geri esneme miktarları

Tablo 4.2’de sürtünme katsayısının 0.144 olması durumunda tüm eleman büyüklükleri ve şekillendirme hızlarındaki geri esneme deformasyon miktarları görülmektedir.

Tablo 4.2. Sürtünme katsayısı 0.144 olması durumunda geri esneme ölçümleri

Omuzdaki eleman	Hız (mm/s)	Yan duvar Açısı θ_1	Flanş Açısı θ_2	Eğrilik ρ (mm)
4	1000	90.877	87.503	7537.320
4	4000	90.740	91.101	5353.214
4	10000	90.667	89.202	22018.386
8	1000	94.949	86.574	785.586
8	4000	93.930	87.636	1114.982
8	10000	92.173	89.248	3655.236
12	1000	94.481	86.585	778.950
12	4000	94.111	87.219	1013.052
12	10000	94.425	87.266	902.362

Yapılan sürtünme katsayısı değişikliklerinde şekillendirme kuvvetinin değişimi (hızdan kaynaklanan salınımlar ihmal edildiğinde), her bir sürtünme değeri için eleman büyüklüğünden ve şekillendirme hızından bağımsız olduğu görüldü. Bu

durum dikkate alındığında sürtünme katsayısının değişiminin geri esneme sonuçlarına etkisini inceleyebilmek için, seçilen bir şekillendirme hızı için eleman büyüklüğü ile seçilen bir eleman büyüklüğü için şekillendirme hızı ile beraber olan ilişkisi ayrı olarak incelendi.

En uygun eleman büyüklüğünün ve şekillendirme hızının seçiminde literatürde daha önceden yapılan çalışmaların sonuçları dikkate alındı [10,11,19,20]. Bu durumda eleman büyüklüğü olarak omuzda sekiz eleman bulunduran orta büyüklükteki elemanlardan oluşan ve şekillendirme hızı olarak en düşük hız olan 1000mm/s seçildi. Seçilen bu eleman büyüklüğü ve şekillendirme hızı için hazırlanan modele bundan sonraki ifadelerde kalibre edilmiş model denilecektir.

İlk hesaplamada şekillendirme hızı sabit kalacak şekilde, üç eleman büyüklüğü ve üç sürtünme katsayısı için toplam dokuz durum dikkate alınarak cevap yüzey fonksiyonları elde edildi. Yüzey fonksiyonları elde edilirken üç farklı regresyon önerilerek bu yöntemlerden en düşük bağıl hata ile sonuca yaklaşan yöntem yüzeylerin elde edilmesinde kullanıldı. Tablo 4.3'te farklı eleman büyüklükleri ve sürtünme katsayılarına göre hesaplanan yan duvar açısı ve bu sonuçlara göre önerilen üç farklı regresyon ile elde edilen sonuçlar ve bağıl hata miktarları görülmektedir.

Tablo 4.3. Eleman sayısı ve sürtünme katsayısına bağlı olarak hesaplanan yan duvar açısı ve farklı regresyon yöntemlerine göre sonuçlar

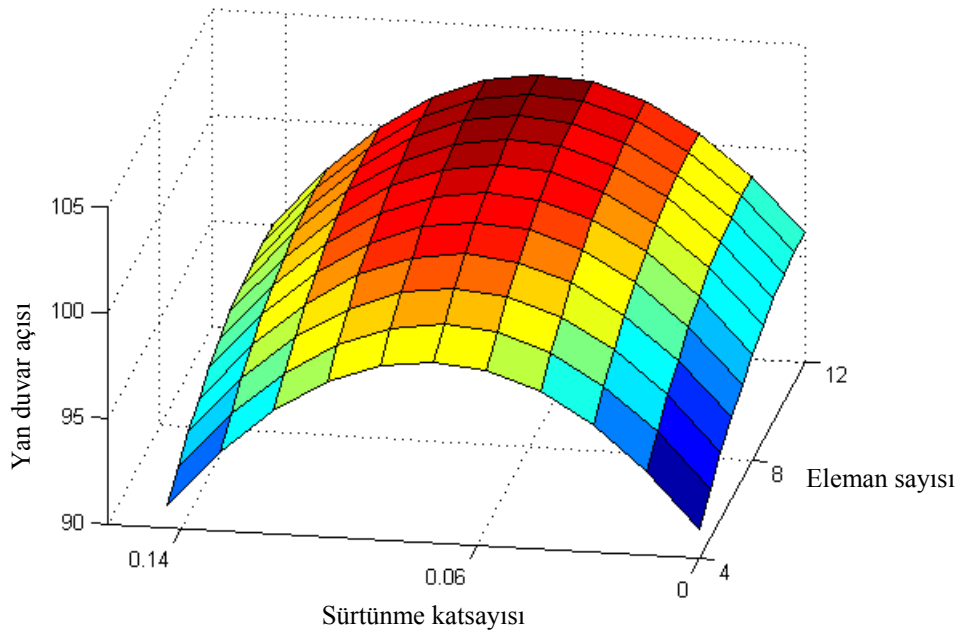
Eleman sayısı	Sürtünme katsayısı	Yan duvar Açısı θ_1	Doğrusal		Etkileşimli		İkinci dereceden	
			Değer	Hata	Değer	Hata	Değer	Hata
4	0.000	92.346	94.787	-0.026	94.589	-0.024	91.436	0.010
8	0.000	93.602	96.946	-0.036	96.946	-0.036	95.045	-0.015
12	0.000	96.683	99.104	-0.025	99.303	-0.027	96.150	0.006
4	0.060	97.683	94.139	0.036	94.116	0.037	98.388	-0.007
8	0.060	102.585	96.297	0.061	96.297	0.061	101.821	0.007
12	0.060	102.692	98.456	0.041	98.479	0.041	102.751	-0.001
4	0.144	90.877	93.231	-0.026	93.453	-0.028	91.082	-0.002
8	0.144	94.949	95.390	-0.005	95.390	-0.005	94.270	0.007
12	0.144	94.481	97.548	-0.032	97.326	-0.030	94.955	-0.005

Değerler incelendiğinde en düşük hata ile sonuçlara yaklaşan ikinci dereceden regresyon metodu cevap yüzey fonksiyonlarını oluşturmak için kullanıldı. Denklem 4.1 ve 4.2'deki yan duvar açısı ve flanş açısının eleman sayısı ve sürtünme katsayısına bağlı olarak elde eden yüzey fonksiyonları geliştirildi [31].

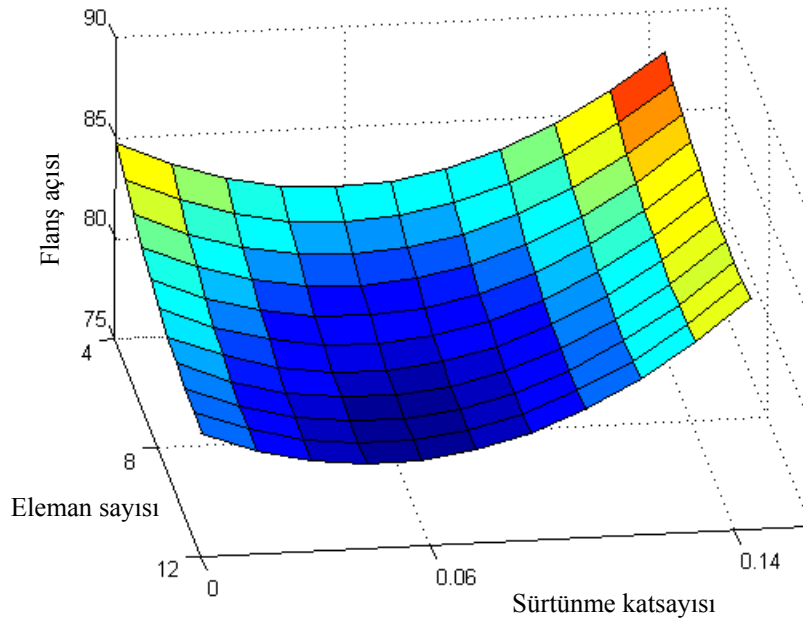
$$\theta_1 = 85.324 + 1.84es + 203.289\mu - 0.729es\mu - 0.078es^2 - 1408.553\mu^2 \quad (4.1)$$

$$\theta_2 = 89.627 - 1.464es - 101.067\mu + 1.886es\mu + 0.062es^2 + 804.348\mu^2 \quad (4.2)$$

Burada θ_1 yan duvar açısını, θ_2 ise flanş açısını temsil ederken es eleman sayısını, μ ise sürtünme katsayısını temsil etmektedir. Şekil 4.16 ve 4.17'de yan duvar ve flanş açılarının eleman sayısına ve sürtünme katsayısına bağlı değişimleri grafik olarak görülmektedir. Cevap yüzeyleri incelendiğinde, sürtünme katsayısının artması ile birlikte bir noktaya kadar geri esneme deformasyonları artmakta daha sonra bu etki ters yönde gerçekleşmektedir. Bu değişkenlik U kanal formdaki şekillendirme hesaplamalarında en uygun sürtünme katsayısının tespit edilmesinin önemini ortaya koymaktadır. Yüzey fonksiyonlarından çıkan diğer bir sonuç; eleman büyüklüğünün değişiminin doğru orantılı olarak geri esneme deformasyonlarını etkilemesidir.



Şekil 4.16. Sabit 1000mm/s şekillendirme hızında yan duvar açısının sürtünme katsayısı ve eleman büyüklüğüne bağlı olarak değişimi [31]



Şekil 4.17. Sabit 1000mm/s şekillendirme hızında flanş açısının sürtünme katsayısı ve eleman büyüklüğüne bağlı olarak değişimi [31]

Bir sonraki adımda benzer bir yaklaşım ile seçilen eleman büyüklüğü sabit tutularak şekillendirme hızının ve sürtünme kuvvetinin geri esneme deformasyonlarına olan etkileri hesaplandı. Hesaplanan değerler farklı regresyon yöntemleri kullanılarak fonksiyonlar elde edildi. En düşük bağıl hata göz önünde bulundurularak regresyon modeli belirlendi.

Tablo 4.4. Şekillendirme hızı ve sürtünme katsayısına bağlı olarak hesaplanan yan duvar açısı ve farklı regresyon yöntemlerine göre sonuçlar

Hız (mm/s)	Sürtünme katsayısı	Yan duvar Açısı θ_1	Doğrusal		Etkileşimli		İkinci dereceden	
			Değer	Hata	Değer	Hata	Değer	Hata
1000	0.000	93.602	97.327	-0.040	95.812	-0.024	93.407	0.002
4000	0.000	91.987	97.345	-0.058	96.966	-0.054	93.367	-0.015
10000	0.000	97.814	97.381	0.004	99.274	-0.015	96.630	0.012
1000	0.060	102.585	96.657	0.058	96.479	0.060	101.899	0.007
4000	0.060	101.691	96.675	0.049	96.631	0.050	100.857	0.008
10000	0.060	100.595	96.711	0.039	96.934	0.036	102.115	-0.015
1000	0.144	94.949	95.719	-0.008	97.412	-0.026	95.830	-0.009
4000	0.144	93.930	95.737	-0.019	96.161	-0.024	93.385	0.006
10000	0.144	92.173	95.773	-0.039	93.658	-0.016	91.837	0.004

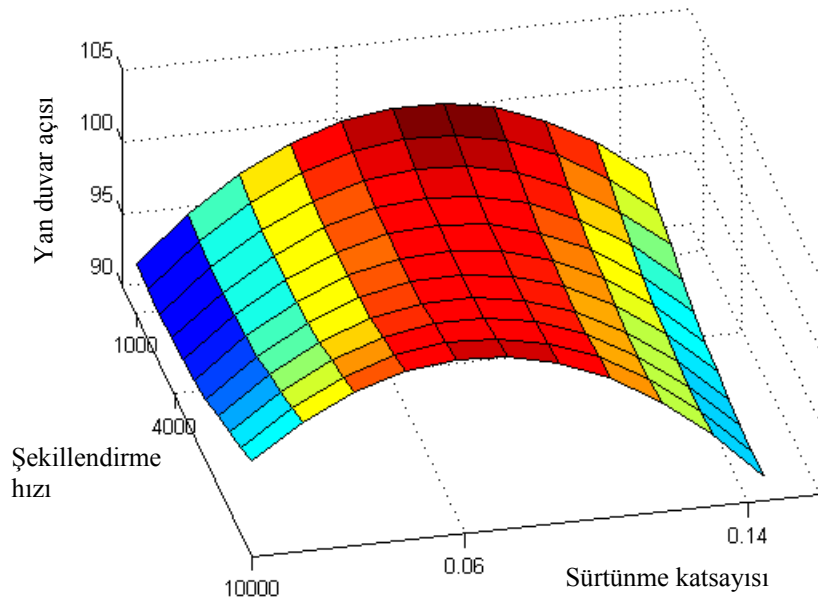
Hesaplanan değerler ile yapılan regresyon sonuçları karşılaştırıldığında ikinci dereceden regresyon ile yapılan yaklaşımın en düşük hata miktarını sağladığı görüldü. Bir önceki yaklaşımda da en düşük hata miktarı ile yaklaşım yapan ikinci dereceden regresyon yöntemi bu adımdan sonra yapılan tüm regresyonlarda kullanıldı.

Yan duvar ve flanş açısının şekillendirme hızı ve sürtünme katsayılarına bağlı olarak elde eden yüzey fonksiyonları geliştirildi.

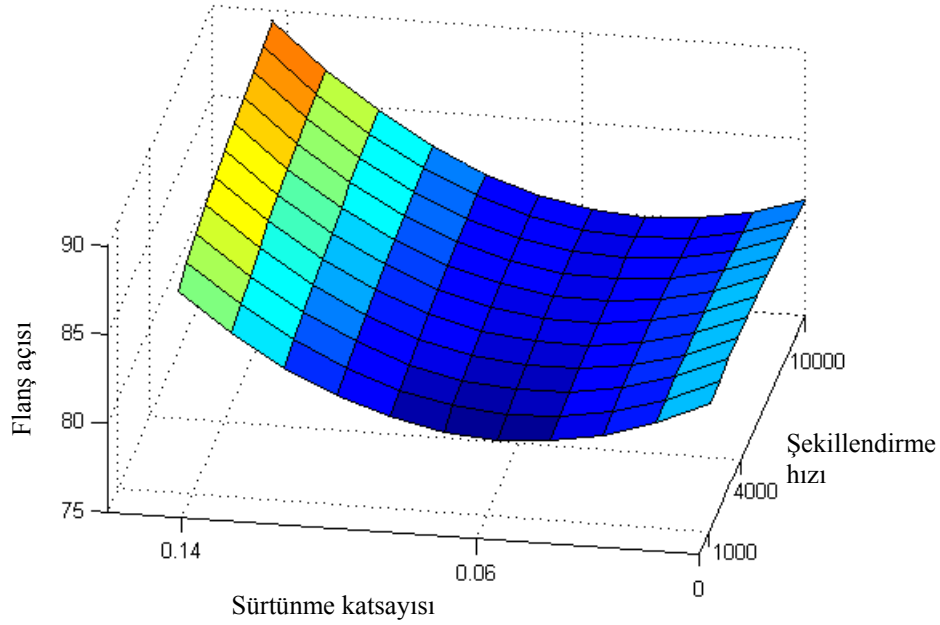
$$\theta_1 = 93.67 + 3.22 \times 10^{-4} v + 236.18 \mu - 0.0055 v \mu + 6.19 \times 10^{-8} v^2 - 1484.63 \mu^2 \quad (4.3)$$

$$\theta_2 = 82.06 + 1.14 \times 10^{-4} v - 105.47 \mu + 0.0028 v \mu - 1.7 \times 10^{-8} v^2 + 914.39 \mu^2 \quad (4.4)$$

Burada θ_1 yan duvar açısını, θ_2 ise flanş açısını temsil ederken v şekillendirme hızını mm/s olarak, μ ise sürtünme katsayısını temsil etmektedir. Şekil 4.18 ve 4.19'daki grafiklerde yan duvar ve flanş açılarının şekillendirme hızı ve sürtünme katsayısına bağlı olarak değişimleri görülmektedir.



Şekil 4.18. Omuz bölgesinde sekiz eleman bulunan modelde yan duvar açısının sürtünme katsayısı ve şekillendirme hızına bağlı olarak değişimi [31]



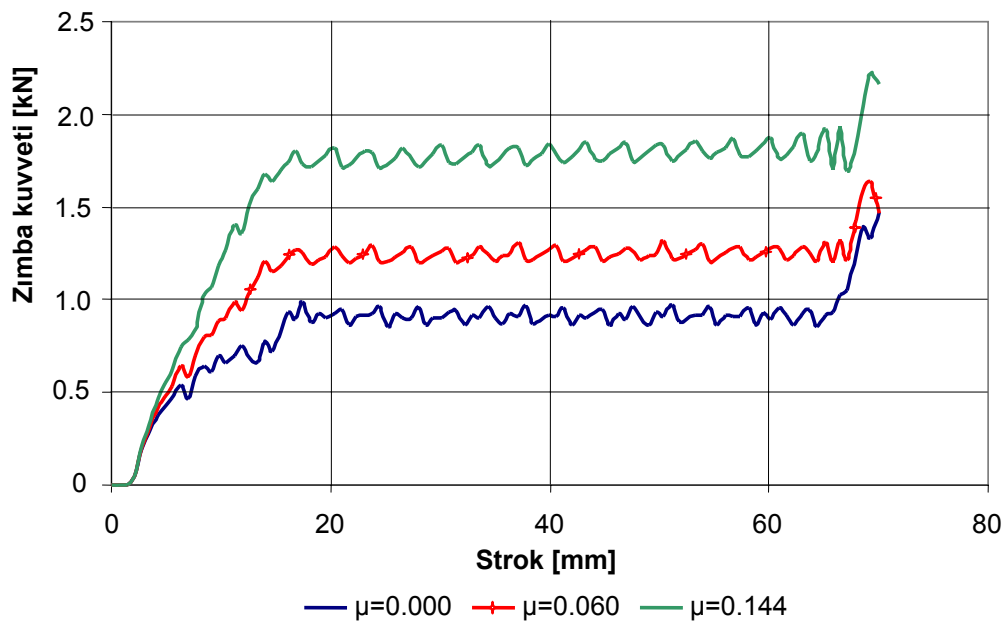
Şekil 4.19. Omuz bölgesinde sekiz eleman bulunan modelde flanş açısının sürtünme katsayısı ve şekillendirme hızına bağlı olarak değişimi [31]

Yüzey grafiklerinde sürtünme katsayısının artışı benzer şekilde sonuçları bir değere kadar artırmakta daha sonra bu etki ters yönde gerçekleşmektedir. Bu durumda sürtünme katsayısının seçiminin kritik rol oynadığı tespit edildi. Farklı şekillendirme hızları için değişimler incelendiğinde en uygun cevapların en düşük şekillendirme hızında ortaya çıktığı görülmektedir.

Oluşturulan tüm cevap yüzey fonksiyonları incelendiğinde; şekillendirme ve geri esneme hesaplamaları yapılırken, eleman büyüklüğünün ve şekillendirme hızının ortalama şekillendirme kuvvetine etkisinin olmadığı belirlendi. Diğer taraftan, belirli bir noktadan sonra artan sürtünme katsayısının hesaplamalarda mantıksız sonuçlara ulaşılmasına sebep olduğu görüldü. Şekillendirme hızının yükselmesi ile ortaya çıkan dinamik etkilerin, özellikle büyük elemanlı modellerde sonuçları çok daha fazla etkilediği görüldü. Bu durumda, eleman büyüklüğü ile şekillendirme hızının birbirine bağıntılı olduğu, artan eleman büyüklüğüne karşılık düşük şekillendirme hızlarının seçilmesinin gerekliliği belirlendi.

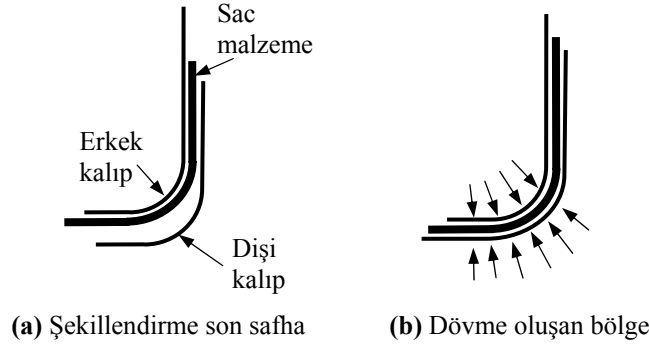
4.2. Pot Çemberi Baskı Kuvvetinin Etkisi

Bu kısımda daha önce ifade edilen kalibre edilmiş model kullanıldı. Kalibre edilen modelde omuz üzerinde sekiz elaman bulunurken şekillendirme hızı olarak 1000mm/s kullanıldı. Sonlu elemanlar modeli üzerindeki pot çemberi baskı kuvvetinin değişiminin şekillendirme kuvvetine ve geri esneme deformasyonlarına etkileri incelendi. Baskı kuvveti daha önce hesaplanan tüm modellerde 19600N olarak alınmıştı. Kuvvetin değişiminin sonuçlara etkilerini inceleyebilmek amacıyla, iki ayrı hesaplama seti oluşturuldu. İlk set için kalibre edilmiş model üzerindeki baskı kuvveti azaltıldı, diğer bir hesaplama setinde ise artırıldı. Ayrıca baskı kuvvetini sürtünme katsayısıyla ilişkilendirebilmek için her bir baskı kuvveti değeri için daha önceden seçilen üç farklı sürtünme katsayısı kullanılarak ayrı ayrı hesaplamalar yapıldı. İlk hesaplama seti için baskı kuvveti %90 kadar azaltılır, bu durumda pot çemberi baskı kuvveti 1960N olmaktadır. Kalibre edilmiş model üzerinde bu baskı kuvveti kullanılarak üç farklı sürtünme katsayısı ile hesaplama yapıldı. Hesaplama sonucunda şekillendirme kuvvetlerinin sürtünme katsayısı ile doğru orantılı olarak arttığı görüldü. Şekil 4.20’de kalibre edilen model için 1960N baskı kuvveti ile yapılan şekillendirme kuvvetleri görülmektedir.



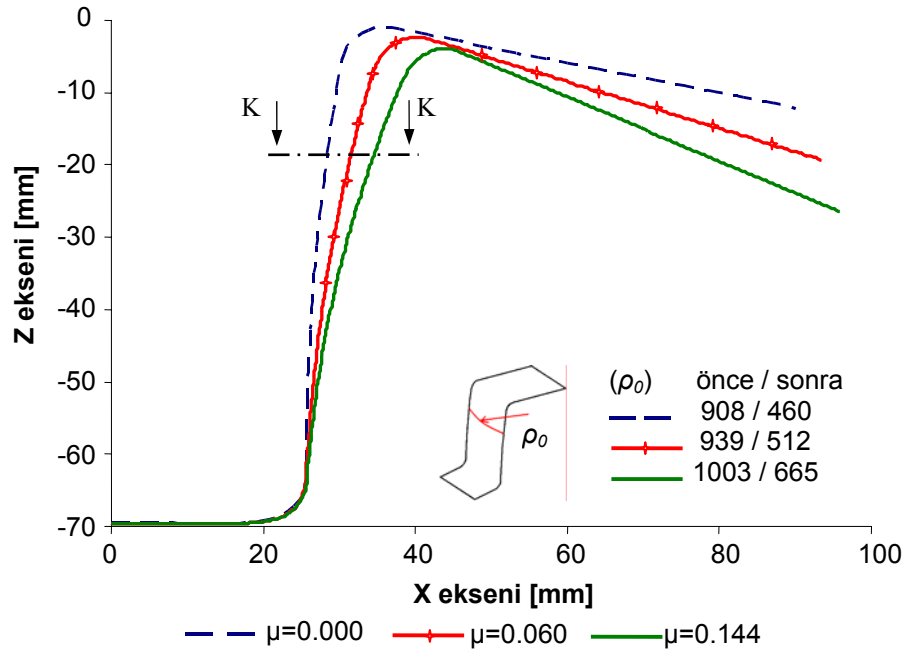
Şekil 4.20. Kalibre edilmiş modelde 1960N baskı kuvveti altında farklı sürtünme katsayılarına göre şekillendirme kuvvetleri.

Şekillendirme kuvvetleri incelendiğinde; bükme işlemleri tamamlanıncaya kadar artış gösteren şekillendirme kuvveti, yan duvar oluşumu sırasında ortalama bir değerde devam ettiği görüldü. Şekillendirmenin son kısmında kuvvet değeri ortalama değerden üstüne çıktı. Bunun sebebi son noktada oluşan dövme etkisidir. Erkek kalıbın şekillendirmede son derinliğe indiği anda sac malzemenin bu bölgede kalınlığı yönünde ezilmesine dövme etkisi denir.



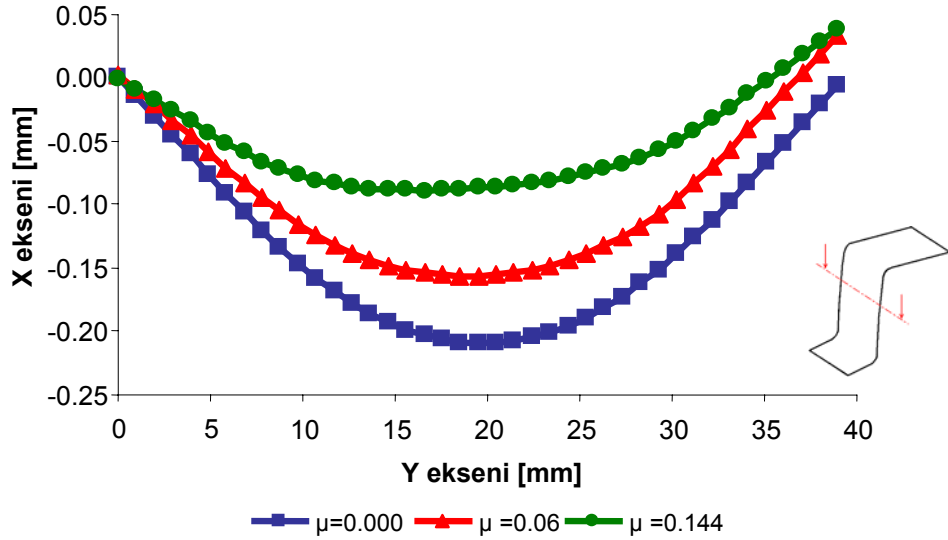
Şekil 4.21. Şekillendirme işleminin son safhasında oluşan dövme bölgesi

Geri esneme deformasyonları incelendiğinde; düşük pot çemberi baskı kuvveti altında, kalibre edilen modelde sürtünme kuvvetinin artması ile geri esneme deformasyonlarının arttığı görüldü (Şekil 4.22).



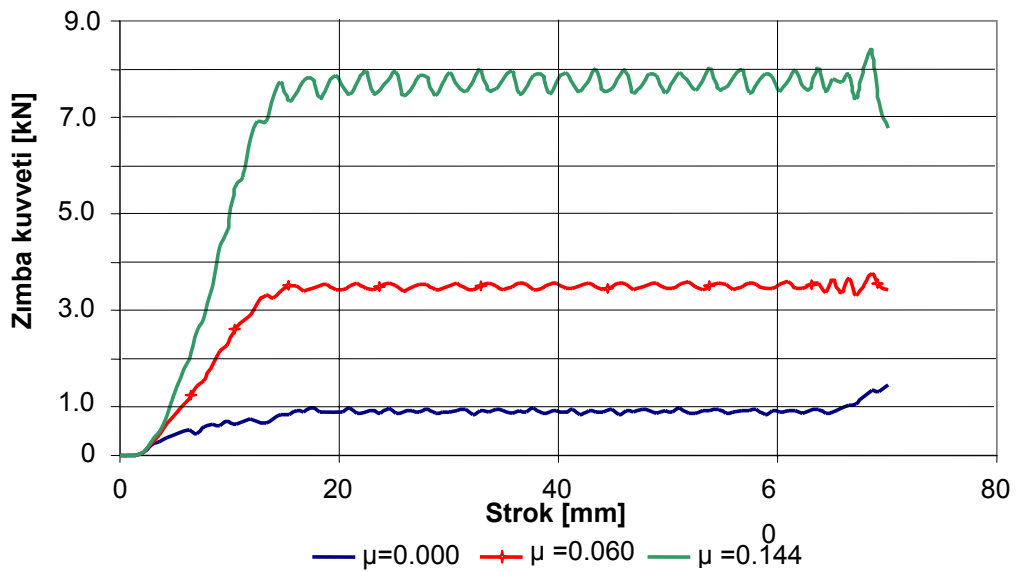
Şekil 4.22. Kalibre edilmiş modelde 1960N baskı kuvveti altında geri esneme deformasyonları

Geri esneme hesaplaması sonrasında oluşan yan duvar geometrileri üzerindeki K-K kesitleri incelendiğinde eğrisellik değerlerinin geri esneme sonuçlarını destekler biçimde olduğu görüldü (Şekil 4.23).



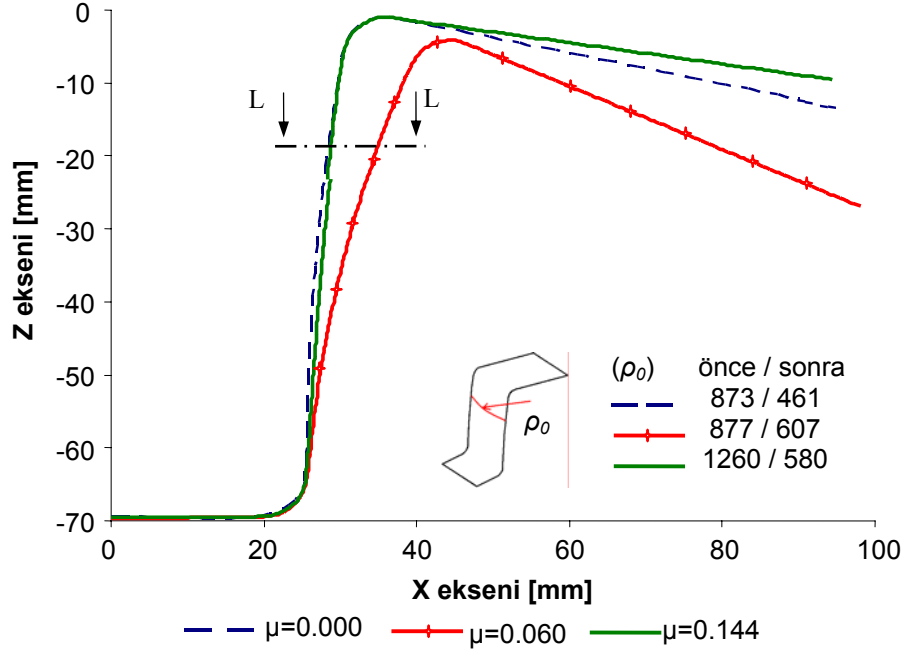
Şekil 4.23. Kalibre edilmiş modelde 1960N baskı kuvveti altında kanal yan duvar kesitinin farklı sürtünme katsayılarına göre değişimi (K-K kesitleri).

Daha önceki kısımlarda 19600N baskı kuvveti altında farklı sürtünme kuvvetleri ile yapılmış olan hesaplamalar, karşılaştırma imkânı sağlamak amacı ile bu kısımda düzenlenerek tekrar verildi.



Şekil 4.24. Kalibre edilmiş modelde 19600N baskı kuvveti altında şekillendirme kuvvetleri.

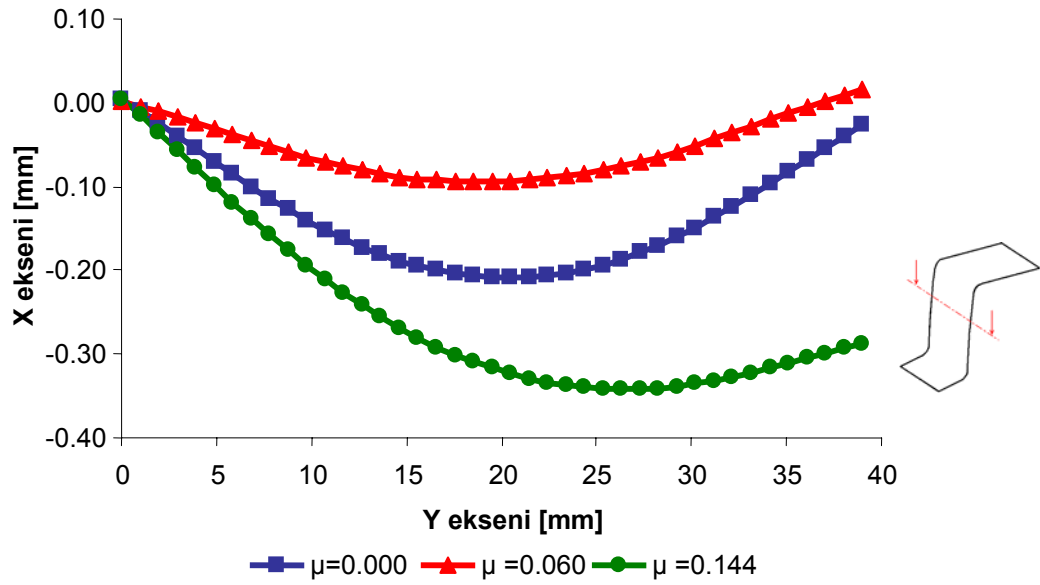
Geri esneme deformasyonlarının bir önceki baskı kuvveti miktarı ile karşılaştırıldığında, sürtünme kuvvetinin artması ile doğru orantılı olarak artmadığı tespit edildi.



Şekil 4.25. Kalibre edilmiş modelde 19600N baskı kuvveti altında geri esneme deformasyonları

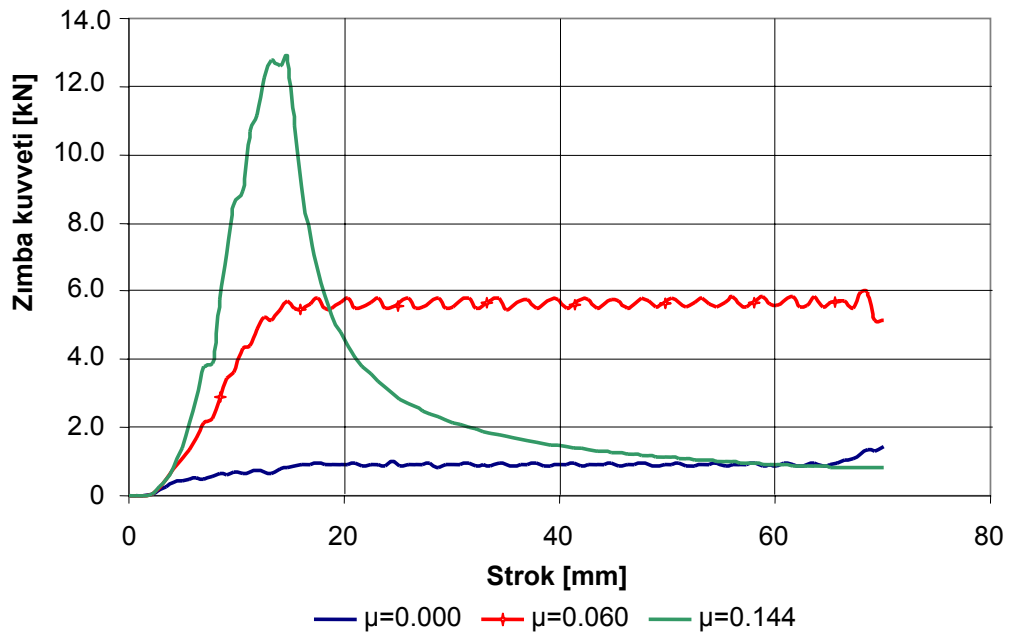
Aynı baskı kuvveti altında yapılan geri esneme hesaplamasında artan sürtünme katsayısı geri esneme deformasyonunu artırdı, sürtünme katsayısının bir sonraki artışta geri esneme deformasyon miktarını azalttı.

Hesaplama sonuçlarında sürtünme katsayısının, dolayısıyla sürtünme kuvvetinin artmasıyla geri esneme deformasyonunun artması beklenirken bu durum gerçekleşmedi. Şekil 4.26'da yan duvar üzerinde oluşan eğriselliklerin kesitleri görülmektedir. 0.144 sürtünme katsayısı ile yapılan hesaplamada oluşan kesitin eğilmeye karşı atalet momenti diğer kesitlere göre daha yüksektir. Bu durum beklenenden daha düşük geri esneme deformasyonu elde edilmesinin sebebidir.



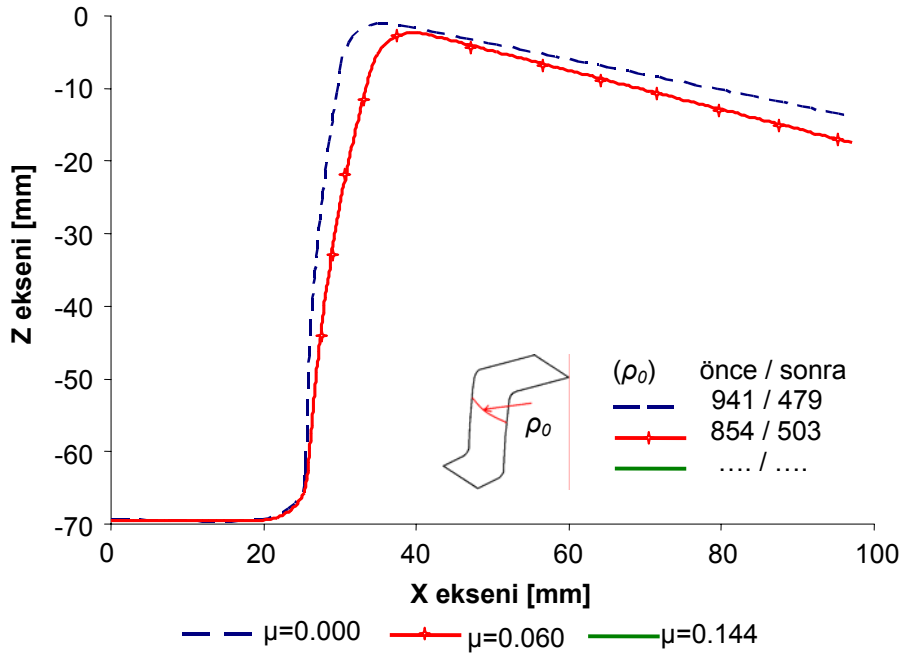
Şekil 4.26. Kalibre edilmiş modelde 19600N baskı kuvveti altında kanal yan duvar kesitinin farklı sürtünme katsayılarına göre değişimi (L-L kesitleri).

Baskı kuvvetinin %90 kadar arttırılması ile oluşan baskı kuvveti miktarı 37240N dur. Bu durumda ortaya çıkan sürtünme kuvvetleri oldukça yüksektir. Hatta en yüksek sürtünme katsayısı ile yapılan şekillendirme sırasında hesaplama başarısız oldu. Şekil 4.27'de 37240N baskı kuvveti altında yapılan şekillendirme için gerekli şekillendirme kuvvetleri görülmektedir.



Şekil 4.27. Kalibre edilmiş modelde 37240N baskı kuvveti altında şekillendirme kuvvetleri.

Bu durumda geri esneme hesaplamaları yalnızca iki sürtünme katsayısı için yapıldı. Şekillendirme için gerekli zımba kuvvetleri beklendiği gibi sürtünme katsayısına bağlı olarak doğrusal bir şekilde arttı. Yapılan geri esneme hesaplamaları sonucunda öngörülen değerler elde edildi. Sürtünme kuvvetinin artışı ile artan geri esneme deformasyonları Şekil 4.28’de görülmektedir.



Şekil 4.28. Kalibre edilmiş modelde 37240N baskı kuvveti altında geri esneme deformasyonları

Tablo 4.5’te değişen baskı kuvveti ve sürtünme katsayıları verilmektedir. Hesaplanan değerler kullanılarak ikinci dereceden regresyon yapılarak yüzey fonksiyonları elde edildi. Tablo 4.5’te ayrıca yüzey fonksiyonlarından elde edilen cevap değerleri de görülmektedir. Denklem 4.5 ve 4.6’da yan duvar açısı ve flanş açısının, pot çemberi baskı kuvveti ve sürtünme katsayısına bağlı olarak elde eden yüzey fonksiyonları geliştirilmiştir.

$$\theta_1 = 91.75 + 2.11 \times 10^{-4} bk + 211.49\mu - 0.0025bk\mu - 3.96 \times 10^{-9} bk^2 - 1038.97\mu^2 \quad (4.5)$$

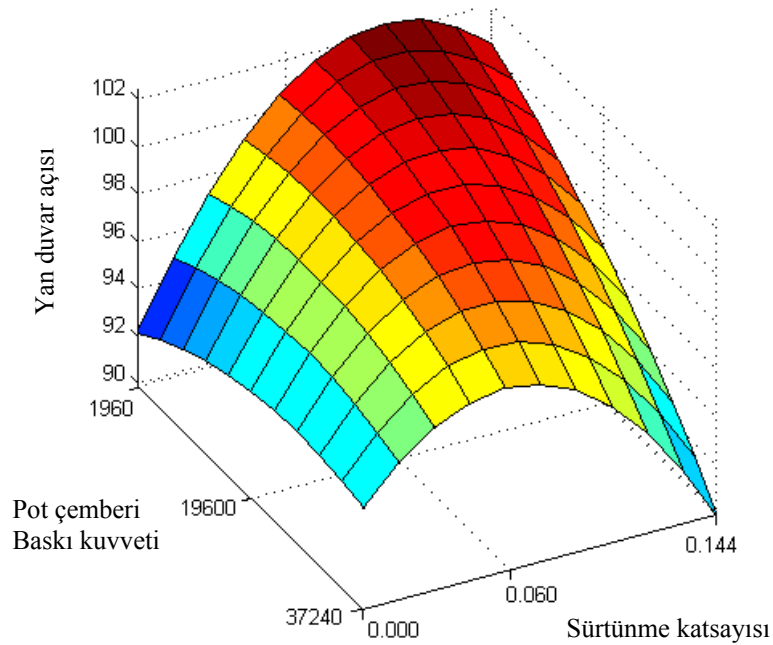
$$\theta_2 = 83.30 - 1.01 \times 10^{-4} bk - 124.06\mu + 0.0032bk\mu + 1.43 \times 10^{-9} bk^2 + 605.77\mu^2 \quad (4.6)$$

Burada θ_1 yan duvar açısını, θ_2 ise flanş açısını temsil ederken bk pot çemberi üzerindeki baskı kuvvetini N olarak, μ ise sürtünme katsayısını temsil etmektedir.

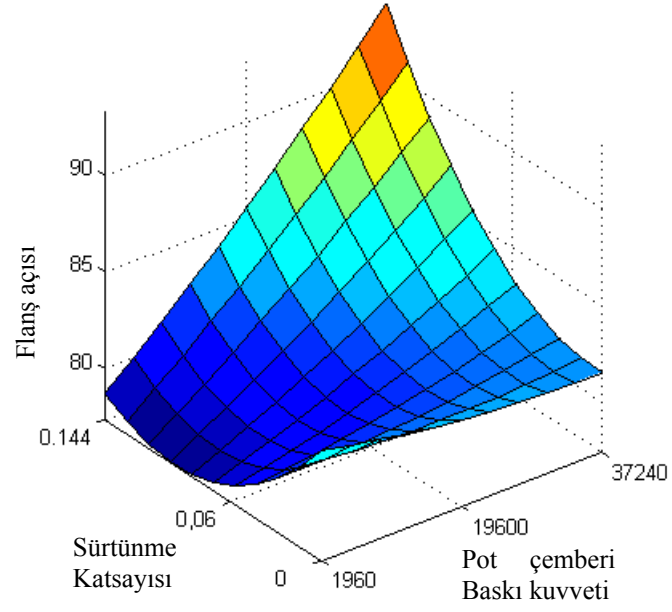
Tablo 4.5. Pot çemberi baskı kuvveti ve sürtünme katsayısına bağlı olarak hesaplanan geri esneme deformasyon sonuçları ve oluşturulan matematiksel model çıktıları

Baskı kuvveti (N)	Sürtünme katsayısı	Yan duvar Açısı θ_1		Flanş Açısı θ_2	
		Hesaplanan Değer	Regresyon Değeri	Hesaplanan Değer	Regresyon Değeri
1960	0.000	93.502	92.144	82.219	83.108
1960	0.060	98.055	100.804	80.115	78.220
1960	0.144	101.753	100.361	77.700	78.704
19600	0.000	93.602	94.368	82.242	81.869
19600	0.060	102.585	100.426	78.981	80.358
19600	0.144	94.949	96.340	86.574	85.569
37240	0.000	93.536	94.127	82.043	81.525
37240	0.060	98.175	97.583	82.873	83.390
37240	0.144	---	---	---	---

Şekil 4.29 ve 4.30'da yan duvar ve flanş açılarının pot çemberi baskı kuvveti ve sürtünme katsayısına bağlı değişim grafikleri görülmektedir.



Şekil 4.29. Kalibre edilmiş modelde yan duvar açısının pot çemberi baskı kuvveti ve sürtünme katsayısına bağlı olarak değişimi [31]



Şekil 4.30. Kalibre edilmiş modelde flanş açısının pot çemberi baskı kuvveti ve sürtünme katsayısına bağlı olarak değişimi [31]

Bu bölümde yapılan hesaplama sonuçları dikkate alındığında; sürtünmenin ihmal edilmediği durumlarda, pot çemberi baskı kuvvetinin artması geri esneme deformasyonlarını düşürdü. Sürtünme katsayısının artışı belli bir seviyeye kadar deformasyonları artırırken bir noktadan sonra tam tersi bir etki gösterdi.

BÖLÜM 5. BENZETİM YÖNTEMİNİN PROSES TASARIMINDA UYGULANMASI

Bu bölümde, daha önceki bölümlerde gerçekleştirilen mühendislik yaklaşım ve yöntemler endüstriyel bir parça üzerinde uygulandı. Amaç; parçanın üretim sürecinde gerek maliyet gerekse süre açısından büyük bir yer tutan proses tasarımı daha etkin bir yöntem geliştirmektir. Bu kapsamda daha önceki bölümlerde üzerinde durulan, proses şartlarına etki eden parametrelerden pot çemberi baskı kuvvetinin ve şekillendirme sırasında sac üzerindeki gerekli gergi kuvvetini sağlamak üzere kullanılan süzdürme çubuklarının değişkenliği sistematik bir yaklaşımla incelendi. İstenen üretim şartlarını sağlayan parçaların elde edilebilmesi için en uygun parametre değerlerini tespit edebilmek için ortogonal regresyon analizleri yapılarak yüzey cevap fonksiyonları geliştirildi. Parçanın benzetim modellerinin hazırlanması; kalıp yüzeylerinin elde edilmesi, eleman yapısının ve malzeme modelinin oluşturulması, sınır şartlarının belirlenmesi gibi birçok noktada daha önceki bölümlerde anlatılan, U-kanal benzetimlerinde kullanılan SE yaklaşımları aynen kullanıldı. Elde edilen sonuçlar, üretimi ve geliştirme süreci halen devam etmekte olan parçanın, üretim sırasında ve sonunda elde edilen parça kontrol sonuçları ile karşılaştırıldı.

5.1. Motor Traversi Üst parçası

Ford Otosan tarafından üretilmekte olan, hafif ticari araç sınıfındaki V184 modelinde kullanılan motor bağlama traversi iki ayrı sac parçanın birleştirilmesi ile elde edilir. Bu yapısal elemanı oluşturan parçalardan araç konumuna göre üst tarafta olan parça endüstriyel uygulama yapmak üzere seçildi. Şekil 5.1’de motor bağlama traversinin ürün hali ve geliştirilmek üzere kullanılacak yüzey modeli görülmektedir.



Şekil 5.1. Motor traversi üst parçası ürün hali ve yüzey modeli

Motor bağlama traversi, geometrisi gereği birbirine dik iki farklı düzlemdeki ters bükme işlemini üzerinde barındıran bir parçadır. Bu özelliği geri esneme problemlerini de beraberinde getirmektedir. Diğer taraftan kalın sayılabilecek 2.5mm lik sac kalınlığı üretim zorluğunu bir derece daha artırmaktadır. Ürün halindeki parçanın araç şasisindeki yerine doğru bir şekilde montaj edilebilmesi için özellikle istenen geometrik toleranslar içerisinde üretilme zorunluluğunu ortaya çıkarmaktadır. Maksimum çekme derinliği 90mm olan parça tek tesirli çekme işlemi ile üretilmektedir.



Şekil 5.2. Motor bağlama traversi üst parçasını üreten tek tesirli çekme kalıbı

5.2. Motor Traversi SE Benzetimi

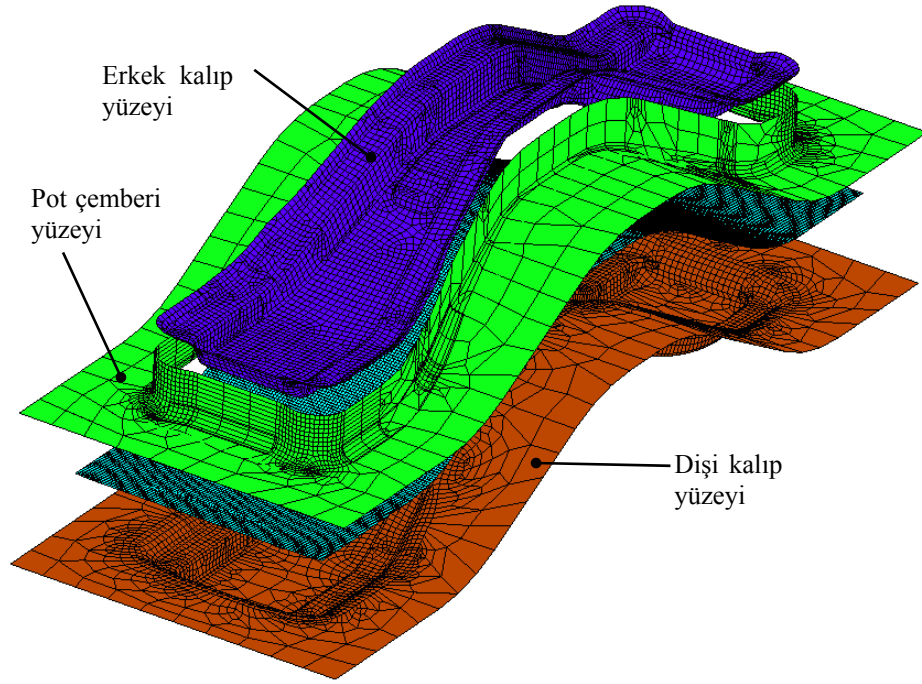
Şekillendirilecek sac levha kalınlığı 2.5mm, akma gerilmesi ortalama 350MPa, kopma gerilmesi ortalama 460MPa olan yüksek mukavemetli düşük alaşımlı bir çeliktir. Sonlu elemanlar benzetimlerinde kullanılmak üzere malzeme özelliklerini belirlemek için sac malzeme üzerinden haddeme yönüne göre üç farklı açıda üçer adet numune alınarak standart çekme testi yapılmıştır. Tablo 5.1’de yapılan testlerin ortalama değerleri her üç yön için verilmiştir.

Tablo 5.1. HSLA350 çeliği için üç yöndeki çekme testi verileri

	Numune açıları		
	0°	45°	90°
Akma gerilmesi (MPa)	366	356	399
Çekme gerilmesi (MPa)	459	461	467
Akma uzaması (%)	4.6	4.8	6.1
Toplam uzama (%)	17.9	18.6	17.5
Pekleşme sabiti; K (MPa)	719	713	701
Pekleşme üsteli; n	0.18	0.16	0.14
Anizotropi oranı	0.84	1.14	1.09

Tüm SE benzetimlerinde Hill akma fonksiyonu kullanıldı. Malzeme özellikleri ortalama test verileri kullanılarak Holloman malzeme fonksiyonu ile ifade edildi (Denklem 2.3). Bu durumda benzetimlerde kullanılacak malzeme özelliklerinde; pekleşme katsayısı 762, pekleşme üsteli 0.149 olarak alındı.

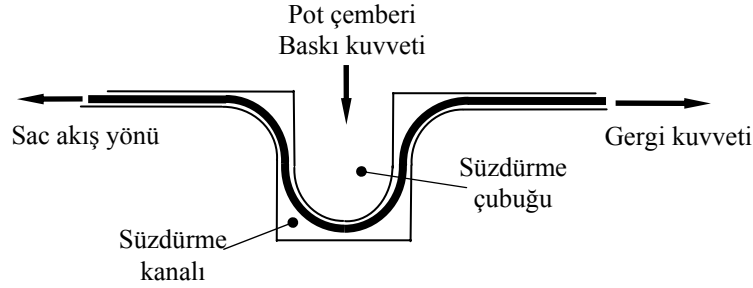
Rijit kalıp elemanları üçgen ve dörtgen kabuk elemanlar kullanılarak ağ yapısı elde edildi. Ayrıca kalıp elemanları ağ yapısı oluşturulurken yuvarlatılmış köşelerde, eğrisellik yönünde en az altı eleman kullanılmasına dikkat edildi. Şekillendirilecek olan sac levha 3mm büyüklüğünde dörtgen BT kabuk elemanlar kullanılarak ağ yapısı oluşturuldu. Her bir eleman üzerinde kalınlık yönünde yedi katman tanımlanarak, her bir katman üzerinde dört hesaplama noktası ile tam çözüm yapıldı (Bkz. Bölüm 2.2). Motor traversi hesaplamalarının tamamında kalıp yüzeyleri ile sac levha arasında sürtünme katsayısı olarak 0.125 alındı.



Şekil 5.3. Motor bağlama traversi üst parçası için benzetim modeli (ağ yapısı)

5.3. Şekillendirmeye Etki Eden Proses Parametreleri

Bir sac levhanın başarılı bir şekilde şekillendirilebilmesi için kalıp boşluğuna dolan sac malzemenin akışının kontrol altında tutulması gereklidir. Bunun yapılabilmesi için kalıp içine akan sac malzemeye akış yönünün tersine gelecek şekilde gergi kuvveti uygulanmalıdır. Gergi kuvveti pot çemberi üzerine uygulanan baskı kuvveti nedeniyle kalıp elemanları ile sac levha arasında oluşan sürtünme kuvveti ile sağlanabilir. Ancak çoğu çekme işlemi sırasında istenen gergi kuvvetini elde edebilmek için yalnızca pot çemberine uygulanan baskı kuvvetini artırma yoluna gitmek yeterli gelmez. İstenen baskı kuvveti pres özelliklerinin çok üzerine çıkmaktadır. Bu durumda pot çemberi üzerine kalıp boşluğuna uygun olacak şekilde süzdürme çubukları yerleştirilir. Süzdürme çubukları sacın kalıp içine akışına direnç göstererek sac levha üzerinde istenen gergi kuvvetine ulaşılabilmesine izin verir. Böylece istenen gergi kuvvetini sağlamak için daha düşük pot çemberi baskı kuvvetleri kullanılır.



Şekil 5.4. Süzdürme çubuğu şematik gösterimi

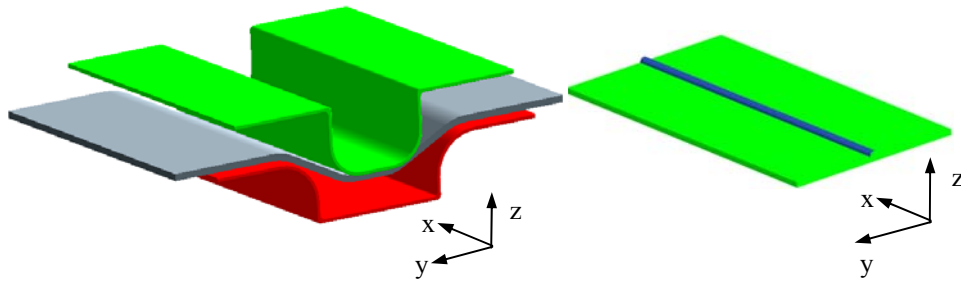
Yukarıdaki şematikte görüldüğü gibi süzdürme çubukları; süzdürme kanalı ve süzdürme çubuğu olarak iki kısımdan oluşmaktadır. Süzdürme kanalı, kalıp üzerinde sacın kalıp boşluğuna girmesinden hemen önce konumlandırılmalıdır. Süzdürme kanalı konum ve ölçülerine bağlı olarak pot çemberi üzerinde oluşturulan kismada süzdürme çubuğu denir. Süzdürme çubuğundan geçen sac malzeme üzerinde iki ayrı kuvvet oluşmaktadır. Bunlardan birincisi sacın bükülmeye karşı olan direncinden kaynaklanan kaldırma kuvvetidir ve bu kuvvet pot çemberi baskı kuvvetine zıt yönde oluşur. Diğer kuvvet ise gergi kuvvetidir ve sacın akış yönüne ters, saca teğet olarak oluşur. Süzdürme çubuğunu süzdürme kanalı içinde istenen konumda tutulması için kaldırma kuvvetinin yenilmesi gerekir. Bunun için gerekli olan kuvvet pot çemberine eklenen ilave baskı kuvveti ile sağlanmaktadır. Elde edilen gergi kuvveti şu şekilde hesaplanabilir.

$$F_{GERGI} = F_{POT} + F_{SÜZDÜRME} \quad (5.1)$$

Burada F_{GERGI} kuvveti saca etki eden toplam gergi kuvvetini temsil ederken F_{POT} pot çemberi ile kalıp arasından akan sac malzemeye etki eden sürtünme kuvvetini, $F_{SÜZDÜRME}$ ise süzdürme çubuğundan geçen sac malzemeye etki eden ilave gergi kuvvetini temsil etmektedir.

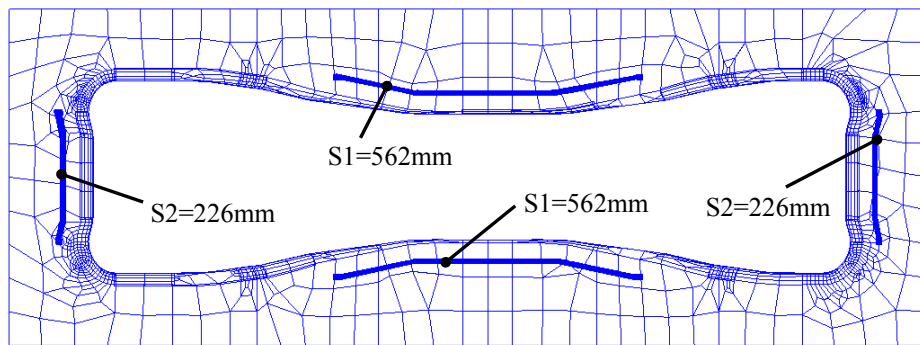
Sonlu eleman benzetimleri yapılırken süzdürme çubukları çoğu zaman gerçek fiziksel yapıları ile modellenmezler. Bunun nedeni kalıp geometrisine nazaran çok daha küçük boyutlarda olan süzdürme çubuklarının içinden sac malzemenin geçiş sırasındaki davranışının modellenenebilmesi için oldukça küçük kabuk elemanlara ihtiyaç duyulmasıdır. Bu durum hesaplama sürelerini uzatarak gerçek amacı

şekillendirme hesaplamalarını ve sonuçlarını incelemek olan benzetim yönteminin amacının dışına çıkarmaktadır. Bu durumun önüne geçebilmek için şekillendirme hesaplamalarında süzdürme çubuklarının ihtiyaç duyulduğu yerlerde eşdeğer süzdürme çubukları kullanılır. Eşdeğer süzdürme çubukları gerçek süzdürme çubuklarının kesitine dik olan çizgiler olarak modellenirler. Oluşturulan bu çizgiler pot çemberi üzerine yerleştirilirler. Hesaplamalar sırasında gerçek süzdürme çubukları ile elde edilecek olan gergi kuvvetini sacın akışına ters yönde sac malzemeye uygularlar.



Şekil 5.5. Süzdürme çubuğunun fiziksel şekli ve eşdeğer süzdürme çubuğunun şematik gösterimi

Motor traversi şekillendirme hesaplamalarında yukarıda açıklanan sebeplerden dolayı eşdeğer süzdürme çubukları kullanıldı. Pot çemberi üzerine yerleştirilen iki farklı özellikte toplam dört süzdürme çubuğu yerleştirildi. Yatay ve düşeyde yerleştirilen süzdürme çubukları kendi aralarında aynı özelliklerdedir. Şekil 5.6'da pot çemberi üzerinde süzdürme çubuklarının konumları ve boyları görülmektedir.



Şekil 5.6. Süzdürme çubuklarının pot çemberi üzerindeki konumları

Şekillendirilen parçanın geometrisine bağlı olarak S1 ve S2 süzdürme çubukları kendi içlerinde eşdeğer özelliktedirler. Denklem 5.2'de şekillendirilecek HSLA350

sac malzeme için sac kalınlığı ve süzdürme çubuğunun batma miktarına bağlı olarak birim uzunluktaki gergi kuvvetini hesaplayan fonksiyon görülmektedir [32].

$$F_{GERGI} = -101.88 + 122.91t_0 + 19.6p - 6.944t_0^2 + 1.607p^2 \quad (5.2)$$

Burada F_{GERGI} birim uzunluktaki süzdürme çubuğu için elde edilen kuvveti (N/mm) olarak, t_0 başlangıçtaki sac kalınlığını (mm), p ise süzdürme çubuğunun batma miktarı (mm) olarak ifade edilmektedir.

Motor traversi şekillendirme hesaplaması yapılırken hem pot çemberi üzerine baskı kuvveti uygulandı hem de süzdürme çubukları kullanıldı. Kullanılan baskı kuvvetinin ve süzdürme çubuklarının batma miktarlarının sonuçlara olan etkilerini inceleyebilmek amacıyla her bir parametre için üç farklı değer kullanıldı. Seçilen parametrelerin şekillendirme ve geri esneme sonuçlarına olan etkileri incelendi. Parametre değişikliklerinin şekillendirmeye olan etkisi şekillenmiş sac parçadaki incelme miktarı ile geri esneme sonuçlarına etkisi ise yer değişimi miktarı ile değerlendirildi. Tablo 5.2’de değişen baskı kuvveti ve iki farklı süzdürme çubuğunun farklı batma değerlerine göre elde edilen sonuçlar görülmektedir.

Tablo 5.2. Baskı kuvveti ve süzdürme çubuklarının batma miktarına göre elde edilen şekillendirme ve geri esneme sonuçları

Model Numarası	Baskı kuvveti [ton]	Süzdürme çubukları Batma miktarları		İncelme [%]	Geri esneme [mm]
		S1 [mm]	S2 [mm]		
M1	50	0	0	9.4	6.2
M2	50	2	2	12.5	5.7
M3	50	4	4	16.7	5.3
M4	75	0	4	12.9	5.1
M5	75	2	0	14.3	4.9
M6	75	4	2	17.8	4.3
M7	100	0	2	13.8	5.2
M8	100	2	4	21.7	3.8
M9	100	4	0	22.4	3.7

Tabloda, ortogonal regresyon uygulanabilmesi için tüm parametrelerin her bir değişimi için ayrı hesaplama yapılmadı. Bunun yerine dokuz hesaplama yapılarak giriş parametrelerine bağlı sonuçlar üzerinde regresyon modelleri geliştirildi.

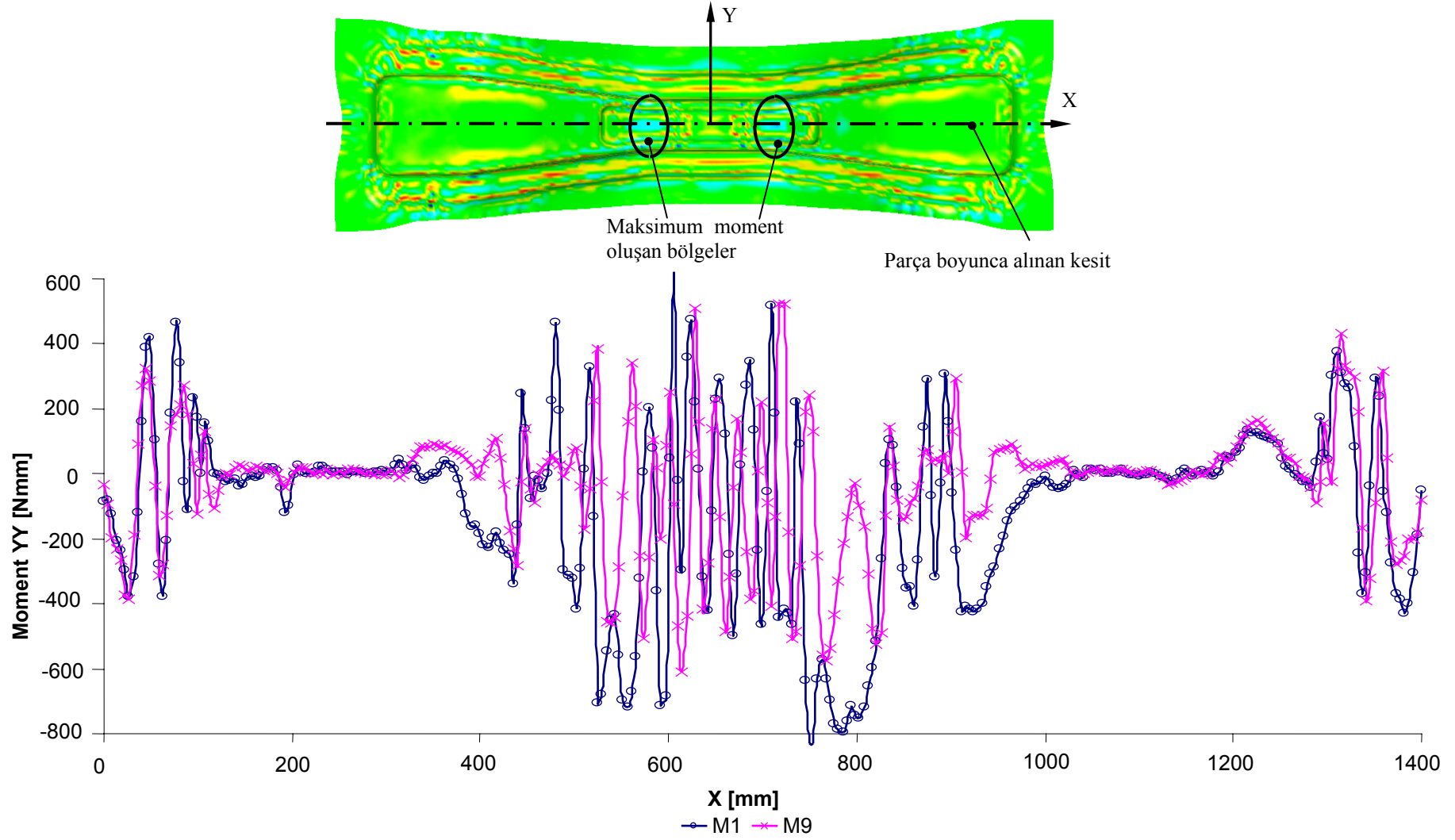
$$incelme = 5.62 + 0.082bk - 2.34p_1 + 1.02p_2 + 0.045bk p_1 - 0.0091bk p_2 + 0.31p_1 p_2 \quad (5.3)$$

$$esneme = 6.62 - 0.009bk - 0.18p_1 + 1.19p_2 - 0.0035bk p_1 - 0.0051bk p_2 + 0.054p_1 p_2 \quad (5.4)$$

Yukarıdaki ifadelerde *incelme* % olarak sac malzemedeki incelme miktarını, *esneme* mm olarak en yüksek geri esneme deformasyonunu ifade etmektedir. *bk*, p_1 ve p_2 ise sırasıyla pot çemberi baskı kuvvetini, S1 ve S2 süzdürme çubuğu için batma miktarını temsil etmektedir.

Sac malzemedeki incelme değerleri incelendiğinde, sac üzerindeki gergi kuvveti arttıkça incelme miktarının arttığı görüldü. Sac üzerindeki gergi kuvveti ise pot çemberi baskı kuvveti ve süzdürme çubuklarının batma miktarının artması ile doğru orantılı olarak değişmektedir.

Geri esneme miktarları ise çekilmiş olan sac malzeme üzerinde bulunan eğilme momentlerinden kaynaklanmaktadır. En yüksek ve en düşük geri esneme miktarlarının hesaplandığı modeller incelendiğinde; eğilme momentlerinin yüksek geri esneme deformasyonları hesaplanan modelde daha çok olduğu görüldü. Şekil 5.7’de en yüksek geri esneme deformasyonunun hesaplandığı M1 modeli ve en düşük geri esneme deformasyonunun hesaplandığı M9 modelleri için parça boyunca alınan kesitteki moment dağılımı görülmektedir.



Şekil 5.7. M1 ve M9 hesaplama modellerinde parça boyunca elde edilen bükme momenti dağılımı

Kesit incelendiğinde özellikle orta kısımda (şekilde işaretlenen bölgeler) hesaplanan yüksek bükme momenti geri esneme deformasyonunu etkileyen en büyük etkenlerden birisidir. Parçanın tam ortasından geçen dikey kesitteki moment dağılımı da geri esneme deformasyonuna etki eder. Dikey kesitteki moment dağılımı ise Şekil 5.8’de görülmektedir.

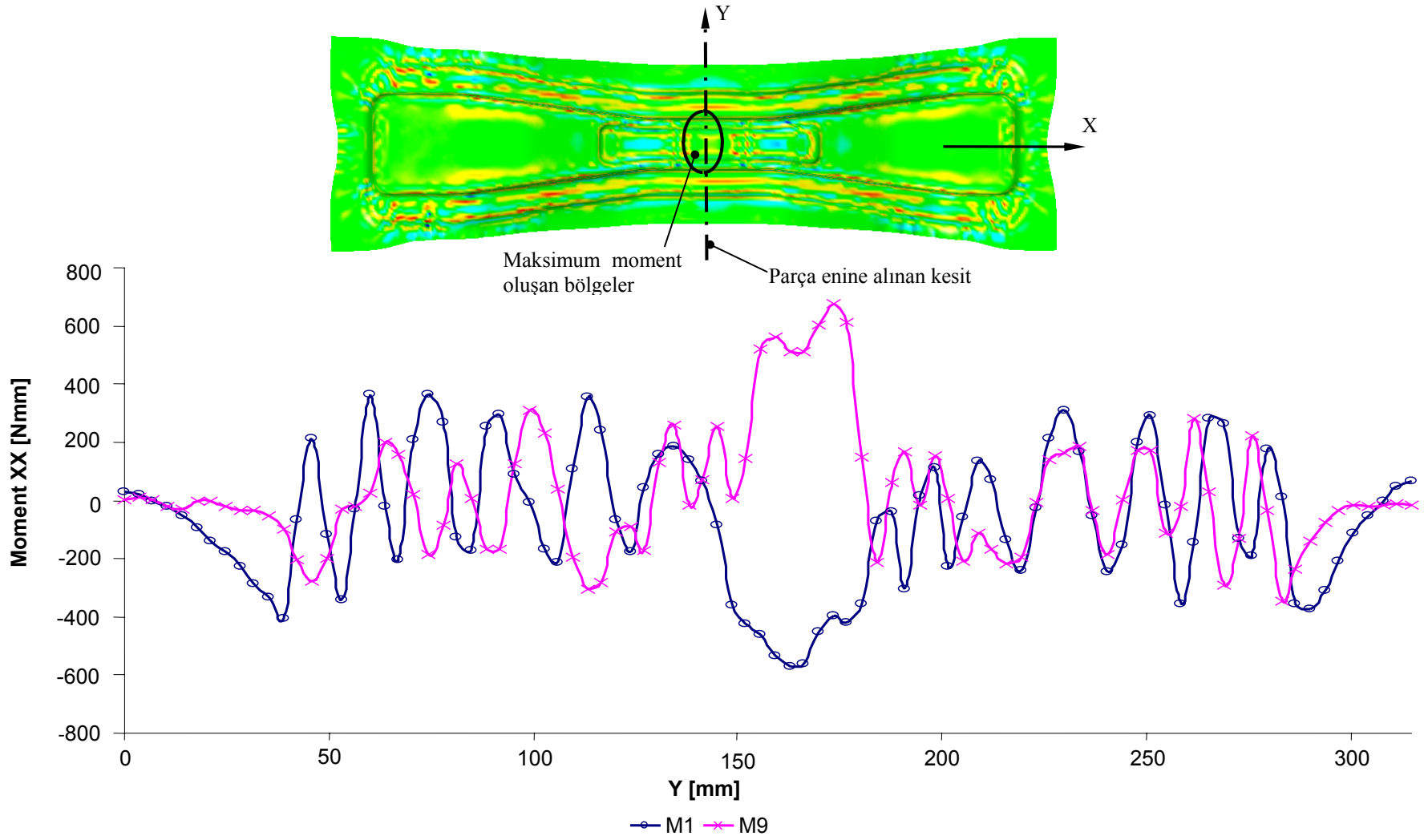
Dikey kesitteki moment dağılımı incelendiğinde M1 modelinde oluşan moment değeri, parça boyunca elde edilen maksimum moment ile aynı yöndedir. Bu durum hesaplanan geri esneme deformasyonunun daha yüksek çıkmasını açıklamaktadır. M9 modelindeki durum ise farklıdır. Dikey kesitte oluşan moment ile parça boyunca elde edilen kesitteki moment zıt yöndedir. Bu durum geri esneme deformasyonunun azalmasını sağlamaktadır.

İncelme miktarı; şekillendirilebilme özelliğinin ve parça kalitesinin tespiti için kullanılabilecek uygun bir kıstastır. Baskı kuvvetinin ve süzdürme çubuklarındaki batma miktarlarının arasındaki ilişkiyi inceleyebilmek için şekillendirme sürecinde kabul edilebilir alt incelme limiti olan %18 sabit olarak alınır. Denklem 5.3’te incelme değeri yerine yerleştirilip baskı kuvvetinin süzdürme çubuklarının batma miktarlarına bağlı olan ifade elde edildi.

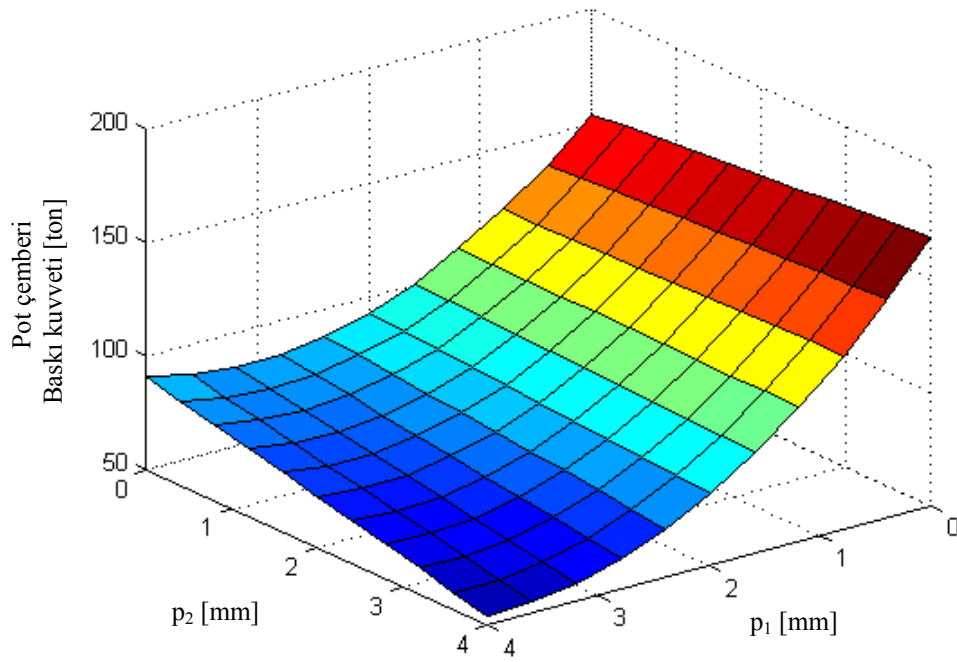
$$18 = 5.62 + 0.082bk - 2.34p_1 + 1.02p_2 + 0.045bk.p_1 - 0.0091bk.p_2 + 0.31p_1.p_2 \quad (5.5)$$

$$bk = \frac{5.62 - 18 - 2.34p_1 + 1.02p_2 + 0.31p_1.p_2}{-0.082 - 0.045p_1 + 0.0091p_2} \quad (5.6)$$

Denklem 5.6’da baskı kuvvetinin her iki süzdürme çubuğunun batma miktarına göre değişimini temsil etmektedir. Şekil 5.9’da bu değişimin oluşturduğu yüzey grafiği görülmektedir.



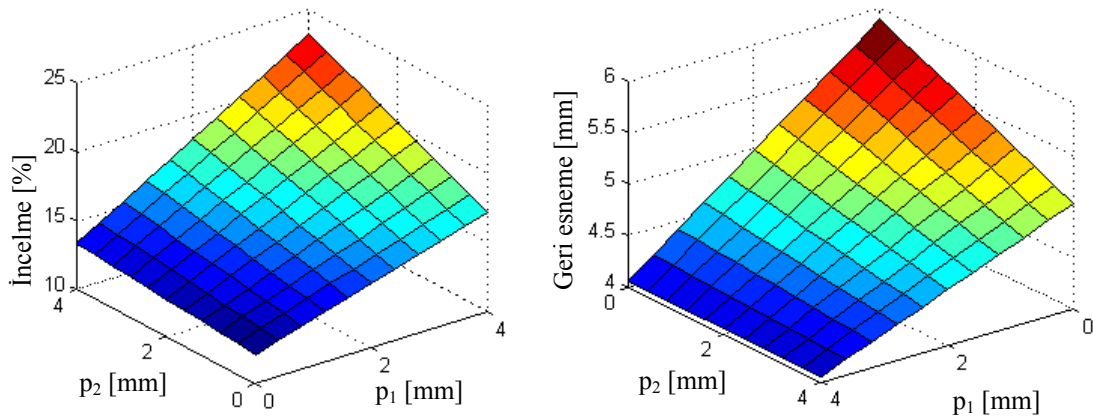
Şekil 5.8. M1 ve M9 hesaplama modellerinde kesit boyunca elde edilen bükme momenti dağılımı



Şekil 5.9. %18 incelme için; baskı kuvvetinin süzdürme çubukları batma miktarlarına göre değişimi

Grafik incelendiğinde süzdürme çubuklarının artan batma miktarları gerekli olan baskı kuvvetini azaltmaktadır. Ancak parça boyunca uzanan S1 süzdürme çubuğunun batma miktarının azalması pot çemberi baskı kuvvetini üstel bir biçimde artırmaktadır. S2 süzdürme çubuğunun batma miktarının azalması ise baskı kuvvetinin çok daha düşük değerlerde artmasına sebep olmaktadır. Bu durumda S1 süzdürme çubuğunun pot çemberi kuvvetine olan etkisi daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır.

Süzdürme çubuklarının batma miktarları S1 ve S2 için sırasıyla 3mm, 2mm seçildiğinde yaklaşık olarak baskı kuvvetinin yaklaşık 80 ton olduğu Denklem 5.6 kullanılarak hesaplanır. Sabit baskı kuvveti altında süzdürme çubuklarının batma miktarlarının şekillendirme sırasındaki incelmeye ve şekillendirme sonrasındaki geri esnemeye etkisini inceleyebilmek için tespit edilen baskı kuvveti Denklem 5.3 ve 5.4 te yerine konur. Bu durumda süzdürme çubuklarının batma miktarının incelme ve geri esneme deformasyonlarına olan etkisi Şekil 5.10'da görülmektedir.



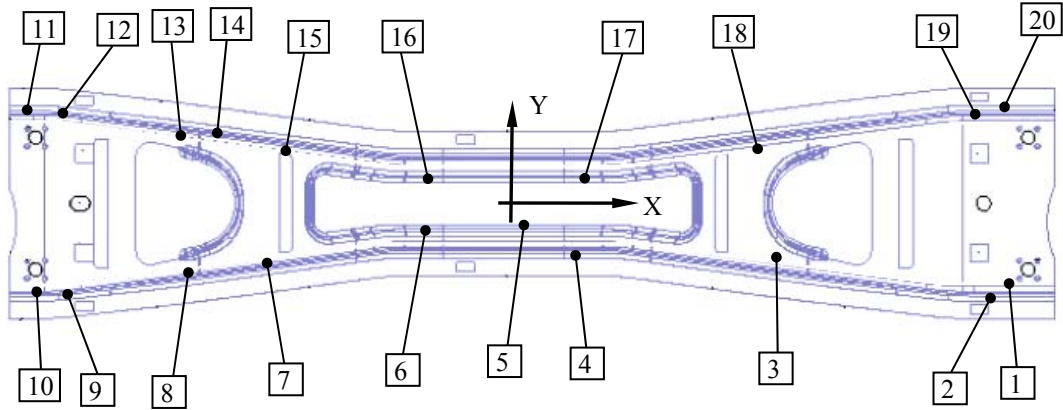
Şekil 5.10. 80 ton baskı kuvveti için sac malzemedeki incelme ve geri esneme deformasyonlarının süzdürme çubukları batma miktarlarına göre değişimi

Aynı baskı kuvveti altında süzdürme çubuklarının batma miktarının artması incelmeyi artırmaktadır. Fakat S2 süzdürme çubuğunun incelmeye olan etkisinin daha düşük olduğu görülmüştür. Geri esneme deformasyonları incelendiğinde durum tam tersidir. Artan batma miktarları deformasyonları azaltmaktadır. Ayrıca S2 süzdürme çubuğunun geri esneme deformasyonlarına etkisi yüksek batma miktarlarında yok denecek kadar azdır.

5.4. Sayısal Yaklaşım ile Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması

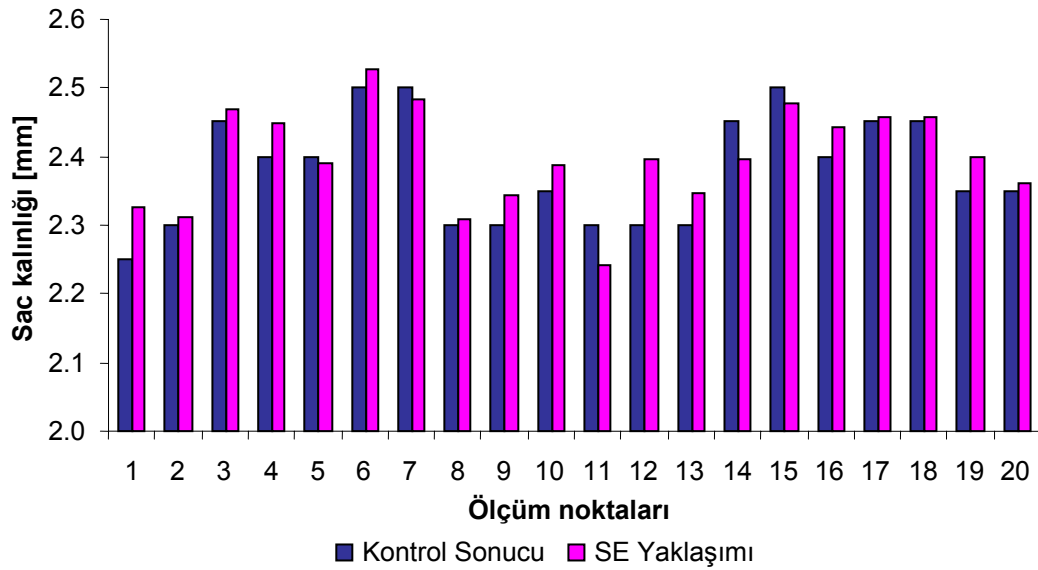
Dana önceki kısımlarda motor traversi parçası için sac kalınlığındaki incelme değerleri ve geri esneme deformasyonları hesaplandı. Bu kısımda sayısal yöntemle hesaplanan bu değerler koordinat ölçme cihazları (CMM) ile yapılan ölçümlerle kıyaslandı. Motor traversi parçası için üretim esnasında periyodik olarak yapılan koordinat ölçümleri ve fikstür kontrolleri burada referans olarak kullanıldı. Referans ölçü olarak farklı beş parçada yapılan ölçüm sonuçlarının ortalaması kullanıldı. Sayısal olarak karşılaştırma yapılacak model Tablo 5.2’de gösterilmeyen farklı bir hesaplama modelidir. Bunun sebebi yapılan hesaplama ile parametre etkilerini incelemek yerine gerçek imalat şartlarında elde edilen ürün ile karşılaştırma yapılacağından dolayı SE hesaplama modeli için imalat şartlarına uygun değerler seçildi. Bu durumda pot çemberi baskı kuvveti 80ton seviyesine çekilerek, S1 süzdürme çubuklarının batma miktarı 3mm ve S2 süzdürme çubuklarının batma miktarı 2mm olarak alındı.

Öncelikle üretici tarafından tespit edilen bölgelerdeki sac malzeme inceltme miktarları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma için Şekil 5.11’de görülen şematikte parça üzerinde numaralandırılan 20 noktadaki sac kalınlıkları ele alınacaktır.



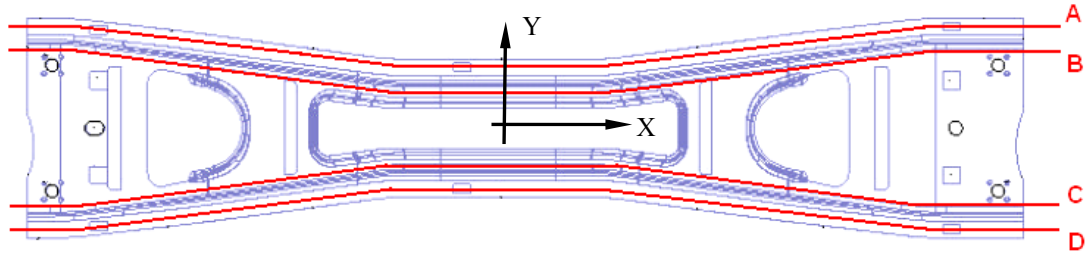
Şekil 5.11. Motor traversi üst parçası üzerinde sac kalınlığı incelenecek 20 nokta

Kontrol sırasında ölçülen sac kalınlıkları ve SE hesaplamaları sonucunda elde edilen sac kalınlıkları Şekil 5.12’deki grafikte görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde SE hesaplamaları, toplam ölçüm noktalarının %75’inde ölçme – kontrol değerlerinin üzerinde sonuçlar verdi. Tüm ölçüm noktalarındaki SE yaklaşımlarında maksimum bağıl hata %4 seviyesindedir.



Şekil 5.12. Motor traversi üst parçası üzerindeki 20 noktadaki sac kalınlığı bilgisi için SE yaklaşımları

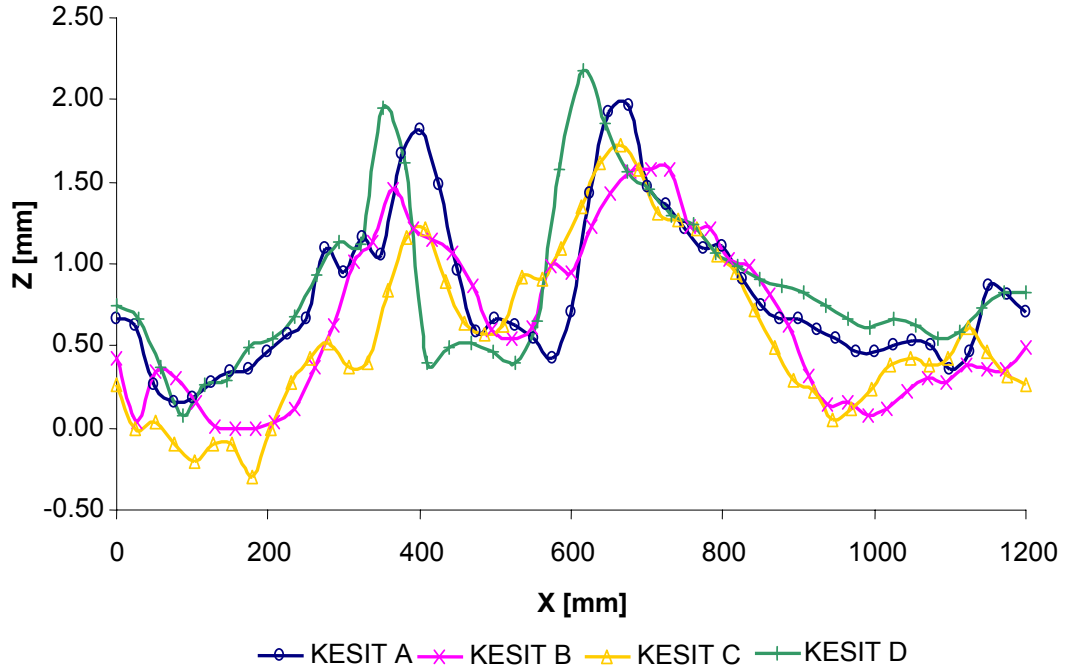
Geri esneme deformasyonlarının tespiti için dijital koordinat ölçme cihazları kullanılmıştır. Bu cihazlar şekillendirme sonrasında elde edilmesi gereken geometriyi temel alır. Ürün halindeki parçanın üzerinde belirlenmiş olan kesitlerin ya da noktaların üzerinden konum bilgilerini toplar, olması gereken değerle aradaki farkı sapma olarak gösterirler. Bu sapma miktarlarının belirlenen toleranslar içinde olması gerekmektedir. SE hesaplamalarında ise şekillendirilmiş geometri geri esneme hesaplaması öncesinde ve sonrasındaki toplam konumsal yer değiştirmeleri sapma miktarı olarak gösterirler. Karşılaştırmanın yapılacağı kesitler Şekil 5.13'te parça üzerinde gösterilmektedir.



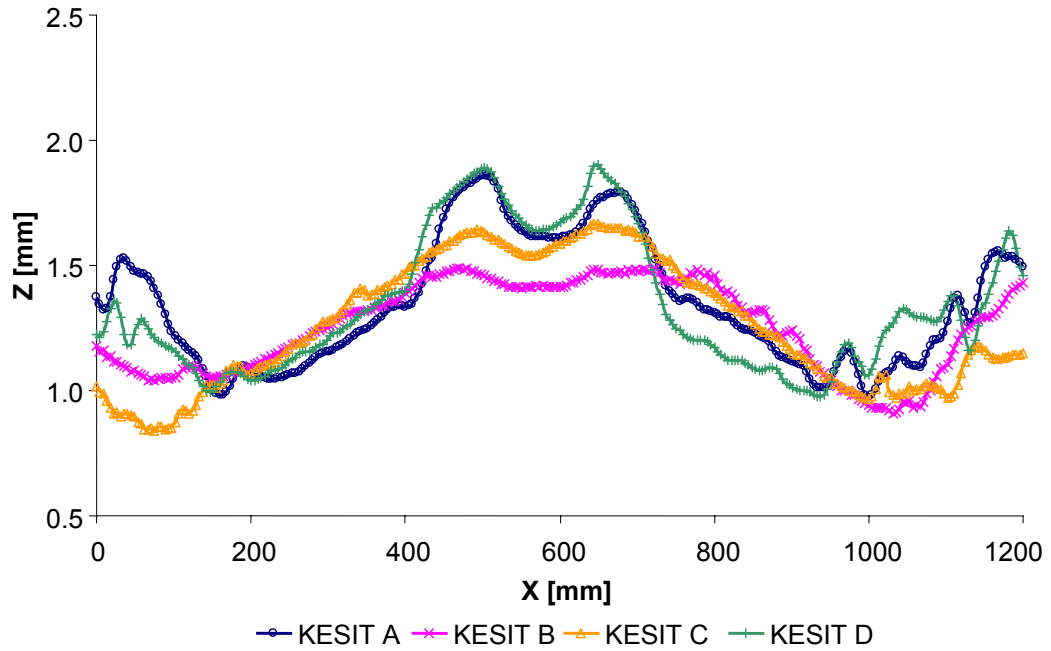
Şekil 5.13. Motor traversi üst parçası üzerindeki karşılaştırma yapılacak kesitler

Şekil 5.13'te gösterilen kesitler, parça üzerinde özellikle Z yönündeki geri esneme miktarına en çok etki eden Y yönündeki eğilme momentlerinin en yüksek seviyede tespit edildiği kesitlerdir. Ayrıca kesitler kanal yapısındaki parçanın boyunca oluşan omuz bölgelerinin çok yakınından geçirilmiştir. Şekil 5.14'te koordinat ölçme cihazları ile elde edilen konumsal sapma miktarlarının kesit boyunca değişimleri görülmektedir.

Kesitler incelendiğinde, parça boyunca koordinat ölçme cihazı ile tespit edilen geometrik sapmaların SE yöntemi ile elde edilen değerlere benzer bir değişim gösterdiği görüldü. Özellikle parçanın orta bölgesinin her iki tarafında pik yapan yer değiştirme değerlerinin SE yöntemi ile yapılan hesaplamalar ile net bir şekilde örtüştüğü görülmektedir. Hesaplanan eğilme momentleri Şekil 5.7'de gösterilen bölgelerde en yüksek değerlere ulaşmıştır. Bundan dolayı bu bölge geri esneme değerleri açısından en kritik bölgedir.



Şekil 5.14. Kesitlerdeki yer değıştirme miktarının ölçüm cihazı (CMM) ile elde edilen dağılımı



Şekil 5.15. Kesitlerdeki yer değıştirme miktarının SE yöntemi ile elde edilen dağılımı

Sonuç olarak; otomotiv endüstrisinde üretimi planlanan bir parçanın, proses tasarımı sistematik bir SE yaklaşımı kullanılarak etkin bir şekilde yapılmıştır. Klasik proses

tasarımında üretim sürecine etki eden parametrelerin birbirleri ile etkileşimleri tam olarak tespit edilememekte ve bu durum tekrarlı bir üretim süreci ortaya çıkartmaktadır. Prosese etki eden parametre değerlerinin tespit edilmesinde kullanılan ortogonal tablo ve geliştirilen cevap yüzey fonksiyonları, üretim sonuçlarına etki eden parametrelerin birbirleriyle olan ilişkilerinin daha kolay anlaşılmasını sağlamaktadır. Bu durum, en uygun imalat için gerekli olan şartların daha kısa sürede elde edilmesini ve parçanın daha kısa bir süre içinde istenen özelliklerde üretilmesine olanak sağlar.

BÖLÜM 6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

6.1. Sonuçların Değerlendirilmesi

Bu tezde, otomotiv endüstrisinde sac şekillendirme yöntemi ile üretilmekte olan bir parçanın proses tasarımı, SE yöntemi kullanılarak sistematik bir yaklaşım ile yapıldı. Şekillendirme hesaplamalarında kullanılan parametreler ve sonuçlar ortogonal tablo oluşturularak değerlendirildi. Geliştirilen cevap yüzey fonksiyonları birbirleriyle etkileşim halinde olan parametrelerin sonuçlara nasıl etki ettiğini açıkça ortaya koydu. Elde edilen en uygun proses parametreleri ile yapılan SE hesaplama sonuçları, üretim sürecinde yapılmakta olan parça kontrol verileri ile karşılaştırıldı. Karşılaştırma sonuçları, ortaya atılan sistematik yaklaşımla yeterli seviyede yakınsama sağlandığını ortaya çıkardı.

Planlanan sistematik yaklaşımın ilk olarak karmaşık bir endüstriyel parça üzerinde uygulanmasının bazı güçlükleri vardı. Bunlar; büyük ve karmaşık hesaplama modellerindeki hesaplama sürelerinin uzun ve maliyetli olması, değişik parametre değerleri ile yapılan hesaplama sonuçlarında etkilerin açık bir şekilde görülememesi ve hesaplanan parametre etkilerinin daha önceki dönemde yapılan literatürdeki sonuçlar ile karşılaştırılamaması olarak sıralanabilir. Bu nedenle literatürde birçok araştırmacıya konu olmuş, üzerinde çeşitli SE hesaplamaları yapılmış ve deneysel olarak yapılan şekillendirme sonuçları belirlenmiş olan U-kanal geometrisi yaklaşımın temellerini oturtmak için kullanıldı.

SE yaklaşımı ile yapılan hesaplama sonuçlarına etki eden birçok parametre bulunmaktadır. Ancak daha önceki dönemlerde yapılan çalışmalar bu parametrelerden bazılarının sonuçlar üzerine etkin olduğunu ortaya koymuştur. Bu durum karşısında bu tez çalışmasında az sayıdaki önemli olduğu düşünülen parametrelerin etkilerin incelenmiştir. Sonuçların daha açık bir şekilde

değerlendirilebilmesi açısından şekillendirmeye etki eden parametreler; sayısal yöntemden ve proses şartlarından kaynaklanan parametreler olarak iyi ayrı grupta incelendi. SE yönteminin getirdiği parametreler içinde, sonuçlar üzerine en büyük etkiyi yaptığı bilinen; ağ yapısındaki eleman büyüklüğü ve şekillendirme hızıdır [11,19,20,25,28]. Tez çalışmasının üçüncü bölümünde bu parametrelerin U-kanal şekillendirme ve geri esneme sonuçlarına etkileri incelendi. Bu bölümde yapılan hesaplamalarda sürtünme kuvveti ihmal edilirken, pot çemberi baskı kuvveti nominal değer kabul edilen 19.6kN olarak alındı [23,25,30]. Seçilen iki parametrenin her biri için üç farklı değer öngörüldü ve bunların kombinasyonu olarak toplam dokuz hesaplama yapıldı. Sayısal yöntemden kaynaklanan değişkenliklerin şekillendirmeye olan etkilerini incelemek için ortalama şekillendirme kuvveti ve en yüksek plastik gerinim değerleri kıstas kabul edildi. Hesaplama sonuçları, eleman büyüklüğünün değişiminin ortalama şekillendirme kuvvetine etki etmediğini gösterdi. Şekillendirme sırasında oluşan en yüksek plastik gerinim değerinin de belirli bir aralıkta değiştiği ve bu değerlerin literatürde daha önceden yapılan çalışmalarla benzerlik gösterdiği görüldü [30]. Ancak geri esneme hesaplamaları incelendiğinde; geri esneme deformasyonlarının, artan şekillendirme hızı ile arttığı ve artan eleman büyüklükleri ile azaldığı görüldü. Hesaplama sonuçları kullanılarak eleman sayısına ve şekillendirme hızına bağlı olarak geri esneme deformasyonlarını elde edebilecek bir fonksiyon geliştirildi. Bu fonksiyon kullanılarak hesaplanmamış parametre değerleri için de sonuçlar elde edildi. Geliştirilen fonksiyonun elde ettiği değerler ve hesaplama sonuçları karşılaştırılarak fonksiyonun doğruluğu ortaya konuldu.

Şekillendirme hesaplamalarına etki eden birçok proses parametresi bulunmaktadır. Ancak bunlardan hesaplama sonuçlarına birinci derece etki eden parametrelerden ikisi seçildi. Bunlar; pot çemberi baskı kuvveti ve kalıp elemanları ile şekillenmemiş sac malzeme arasındaki sürtünme katsayısıdır [19,23,24,25,28]. Bir önceki adımda oluşturulan modeller, sınır şartları, malzeme modelleri aynen kullanıldı. Sürtünmenin hesaplamalara katılması ile birlikte temas mekanizmasının oluşturduğu değişken kuvvetler şekillendirme kuvvetlerinin çok fazla salınım yapmasına sebep oldu. Bazı durumlarda bu salınımlar çevrimsel yükleme gibi davranarak beklenmeyen sonuçlar elde edildi. Diğer taraftan sürtünmenin hesaba katılması ile artan şekillendirme hızı geri esneme deformasyonlarını artırmak yerine azalttı. Bu artış; şekillendirme hızının

artması ile artan dinamik etkinin sürtünme mekanizması ile elde edilen kuvvetlerle birleşerek çevrimsel yüklemelere sebep olmasından kaynaklanmaktadır. Sürtünmenin hesaplara katıldığı hallerde artan pot çemberi baskı kuvvetinin geri esneme deformasyonlarını azalttığı görüldü. Ancak bu durum sürtünmenin ihmal edildiği durumlarda tam tersi bir durum sergiledi. Bu da, sürtünme mekanizması ile elde edilen teğetsel ve normal kuvvetlerin geri esneme sonuçlarına direkt olarak etki ettiğini ortaya çıkardı. Sürtünme katsayısının artışının belirli bir değere kadar geri esneme deformasyonlarını artırdığı, ancak bir noktadan sonra artan sürtünme katsayısının geri esneme deformasyonlarını azalttığı görüldü [23,24]. Ortaya çıkan bu durum sürtünme katsayısının seçiminin önemini ortaya çıkarttı. Artan sürtünme katsayısı ile beraber artan pot çemberi baskı kuvveti sonuçların mantıksız değerlere ulaşmasına sebep oldu. Bu durum sürtünme katsayısı ile pot çemberi baskı kuvvetinin birbirlerine uygun olarak seçilmesinin önemini ortaya koymaktadır. Hesaplama sonuçları kullanılarak pot çemberi baskı kuvvetine ve sürtünme kuvvetine bağlı olarak geri esneme deformasyonlarını elde edebilecek bir fonksiyon geliştirildi.

U-kanal üzerinde yapılan mühendislik yaklaşımlar son bölümde seçilen endüstriyel parça üzerinde uygulandı. Hesaplama yönteminden kaynaklanan sayısal parametreler incelenmedi. Oluşturulan sayısal modelde eleman büyüklüğü, şekillendirme hızı ve malzeme özellikleri tüm hesaplamalarda aynen kullanıldı. Üretim sürecinde önemli olan proses parametrelerinden ikisi seçilerek değişkenlikleri incelendi. Bunlar; pot çemberi baskı kuvveti ve süzdürme çubuklarının batma miktarlarıdır. Süzdürme çubukları fiziksel olarak modellenmek yerine eşdeğer süzdürme çubukları kullanıldı [32]. Pot çemberi baskı kuvveti ve süzdürme çubuklarının batma miktarlarına bağlı olarak, şekillenmiş parçadaki incelme miktarını ve geri esneme sonuçlarını hesaplayan fonksiyonlar geliştirildi. Bu fonksiyonlar kullanılarak oluşturulan cevap yüzey grafikleri ile süzdürme çubuklarının batma miktarlarının etkileri incelendi. Kabul edilebilir sac incelme sınırı olan %18 değeri esas alınarak pot çemberi baskı kuvveti ve süzdürme çubuğu batma miktarları arasında bağlantı kurularak en uygun değerler tespit edildi. Tespit edilen 80ton baskı kuvveti ve 3-2mm batma miktarı için hesaplama yapılarak sonuçlar üretim sürecindeki ölçüm sonuçları ile karşılaştırıldı. Karşılaştırma sac kalınlığı ve geri esneme deformasyonları ile yapıldı. Sac kalınlığı

tahminleri %75 oranında ölçülen değerin üzerinde çıktı. Kalınlık değerlerinin bağıl hatası %4 seviyesinde oldu. Geri esneme karşılaştırmasında ise en kritik kesitler incelendi. Bu kesitlerdeki deformasyon dağılımı SE hesaplamaları ile benzerlik gösterdi. Ayrıca hesaplanan geri esneme değerleri de kabul edilebilir sınırlar içinde bulundu.

6.2. Öneriler

Bu çalışmada, bir otomotiv parçası için proses tasarımı, SE yöntemi kullanılarak sistematik bir yaklaşım ile yapıldı. Çalışmada elde edilen sonuçlar, kullanılan parça geometrisine ve prosese bağlı olarak bulunmuştur. Ayrıca SE benzetimleri için kullanılan yazılımın hesaplama yöntemi, kullanılan temas algoritması ve kabuk eleman formülasyonu sonuçların elde edilmesinde etkili olmuştur. Literatürde daha önceki dönemde yapılan birçok çalışmada olduğu gibi bu çalışmada da kalıp yüzeylerinin elastik deformasyonları ihmal edilmiştir. Bundan sonraki dönemde yapılacak çalışmalarda, kullanılacak SE yönteminin yanı sıra farklı kabuk eleman formülasyonları ve çevrimsel yüklemelerin etkilerini dikkate alacak bir pekleşme davranışını içeren malzeme modeli kullanılarak yapılacak hesaplamalar ile mevcut şekillendirme ve geri esneme deformasyon sonuçlarının irdelenmesi etkili olabilir. Ayrıca büyük kuvvetlerin söz konusu olduğu problemlerde kalıp yüzeylerinin elastik deformasyonlarının da hesaplamalara dahil edileceği bir çalışma ile mevcut sonuçların karşılaştırılması da farklı bir çalışma konusu olabilir.

KAYNAKLAR

- [1] STONE R., BALL J.K., “Automotive Engineering Fundamentals”, SAE International, 2004
- [2] Schuler GmbH, “Metal Forming Handbook”, Taylan ALTAN (consulting editor), Springer, June 1998
- [3] REBELO N., NAGTEGAAL J.C., HIBBITT H.D., “Finite Element analysis of Sheet Forming Processes”, *Int. J. for Numerical Methods in Engineering*, vol. 30: 1739-1758, 1990
- [4] KARAFILLIS A.P., BOYCE M.C., “Tooling Design in Sheet Metal Forming Using Springback Calculations”, *Int. J. Mach. Sci.*, vol. 34: 503-526, 1992
- [5] KARAFILLIS A.P., BOYCE M.C., “Tooling And Binder Design For Sheet Metal Forming Processes Compensating Springback Error”, *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, 36: 503-526, 1996
- [6] SHU J.S., HUNG C., “Finite Element Analysis and Optimization of Springback Reduction: The DOUBLE-BEND Technique”, *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, 36: 423-434, 1996
- [7] PRIOR A.M., “Applications of Implicit and Explicit Finite Element Techniques to Metal Forming”, *J. Mater. Process. Technol.* 45:649-656, 1994
- [8] ROJEK J., ONATE E., POSTEK E., “Application of Explicit FE Codes to Simulation of Sheet and Bulk Metal Forming Processes”, *J. Mater. Process. Technol.* 80-81: 620-627, 1998
- [9] TEKKAYA A.E., “State-of-the-art simulation of sheet metal forming”, *J. Mater. Process. Technol.* 103: 14-22, 2000
- [10] ONATE E., ROJEK J., GARINO C.G., “NUMISTAMP: a research project for assessment of finite-element models for stamping processes”, *J. Mater. Process. Technol.*, 50:17-38, 1995
- [11] 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”, *J. Mater. Process. Technol.* 50: 395-409, 1995

- [12] KIM S.H., HUH H., “Design Sensitivity Analysis of Sheet Metal Forming Processes with a Direct Differentiation Method”, *J. Mater. Process. Technology*, 130-131 :504-510, 2002
- [13] HSU C.W., ULSOY A.G., DEMERI M.Y., “Development of process control in sheet metal forming”, *J.Mater. Process. Technol.*, 50: 395-409, 1995
- [14] ZHANG Z.T., “Stress and Residual Stress Distributions in Plane Strain Bending”, *Int. J. Mech. Sci.*, 40: 533-543, 1998
- [15] KEUM Y.T., HAN B.Y., “Springback of FCC sheet in warm forming”, *Journal of Ceramic Processing Research*, 3; 159-165, 2002
- [16] MAMALIS A.G., MANOLAKOS D.E., BALDOUKAS A.K., “Simulation of sheet metal forming using explicit finite element techniques: effect of material and forming characteristics. Part 1. Deep-drawing of cylindrical cups”, *J.Mater. Process. Technol.*, 72: 48-60, 1997
- [17] MAMALIS A.G., MANOLAKOS D.E., BALDOUKAS A.K., “Simulation of sheet metal forming using explicit finite element techniques: effect of material and forming characteristics. Part 2. Deep-drawing of square cups”, *J.Mater. Process. Technol.*, 72: 110-116, 1997
- [18] CHOU I.N., HUNG C., “Finite element analysis and optimization on springback deuction”, *I. Journal of Machine Tools & Manufactur*, 39, 517-536, 1999
- [19] LEE S.W., YANG D.Y., “An assessment of numerical parameters influencing springback in explicit finite element analysis of sheet metal forming process”, *J.Mater. Process. Technol.*, 80-81: 60-67, 1998
- [20] LIN Z., LIU G., XU W., BAO Y., “Study on the Effects of Numerical Parameters on the Precision of Springback Prediction”, *Proc. of 6th Int. LS-DYNA Users Conference*, 2000.
- [21] LI G.Y., TAN M.J., LIEW K.M., “Springback analysis for sheet forming processes by explicit finite element method in conjunction with the orthogonal regression analysis”, *I. Journal of Solid and Structures*, 36, 4653-4668, 1999
- [22] SAMUEL M., “Experimental and numerical prediction of springback and side wall curl in U-bendings of anisotropic sheet metals”, *J.Mater. Process. Technol.*, 105: 382-393, 2000
- [23] PAPELEUX L., PONTHOT J.P., “Finite element simulation of springback in sheet metal forming”, *J.Mater. Process. Technol.*, 125-126: 785-791, 2002

- [24] CHO J.R., MOON S.J., MOON Y.H., KANG S.S., “Finite element investigation on spring-back characteristics in sheet metal U-bending process”, *J.Mater. Process. Technol.*, 141: 109-116, 2003
- [25] XU W.L., MA C.H., LI C.H., FENG W.J., “Sensitive factors in springback simulation for sheet metal forming”, *J.Mater. Process. Technol.*, 151: 217-222, 2004
- [26] NACEUR H., GUO Y.Q., BEN-ELECHI S., “Response surface methodology for design of sheet forming parameters to control springback effects”, *Computers & Structures.*, 84:1651-1663, 2006
- [27] FIRAT M., “U-channel forming analysis with an emphasis on springback deformations”, *Materials & Design.*, 28: 147-154, 2007
- [28] FIRAT M., METE O.H., KOCABICAK U., “A Sensitivity Analysis of Springback Deformations in Stamping Process”, *4th Int. Conference and Exhibition on Design and Production of MACHINES and DIES /MOLDS, 2007*
- [29] LS-DYNA Theoretical Manual, Livermore Software Technology Corporation, 1998.
- [30] MAKINOUCHI M., NAKAMICHI E., ONATE E., WAGONER R., *Proceedings of the NUMISHEET'93 Second International Conference on Numerical Simulation of 3D sheet Metal Forming Processes*, Tokyo, Japan, 1993
- [31] MATLAB Version 7.1, *The MathWorks, Inc. 1994-2007*
- [32] FIRAT M., “An Analysis of Sheet Metal Deformations inside the Drawbead Element”, *4th Int. Conference and Exhibition on Design and Production of MACHINES and DIES /MOLDS, 2007*

EKLER

EK-A Elastik Modül Değişkenliğinin Geri Esnemeye Etkisi

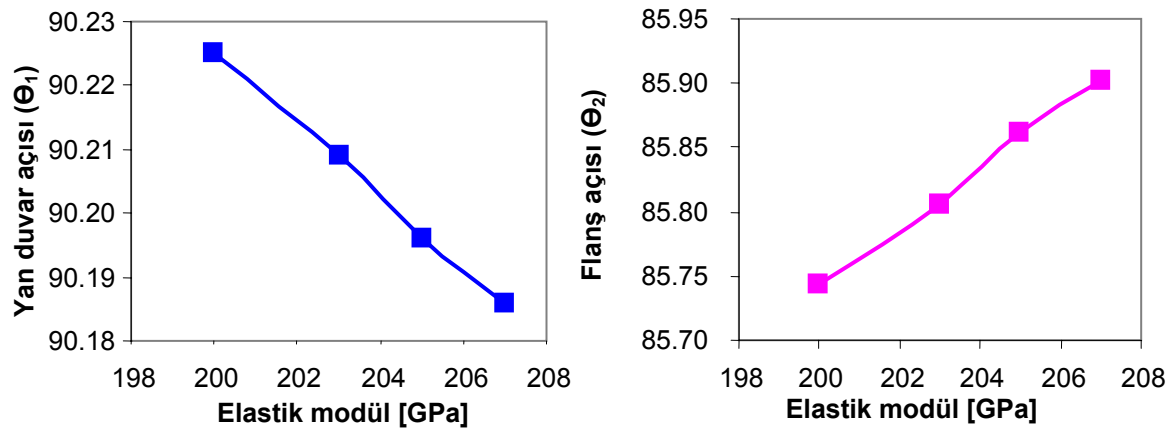
Elastik modül, malzemenin lineer davranış gösterdiği elastik bölge için değerlendirilebilecek fiziksel bir özellik olduğundan dolayı bu değişkenlik yalnızca geri esneme hesapları için incelenmiştir. Geri esneme parametreleri incelendiğinde yüksek eleman sayısı ve düşük şekillendirme hızında oldukça yüksek geri esneme değerleri hesaplanırken; düşük eleman sayısı ve yüksek şekillendirme hızında oldukça düşük geri esneme değerleri hesaplanmıştır.

Daha önceki hesaplamaların tamamında kullanılan 207GPa elastik modül değeri %1, %2 ve %4 oranında azaltılarak bu noktalardaki geri esneme değerlerine olan etkisi incelenmiştir.

Tablo B.1’de elastik modül değişkenliğinin düşük eleman sayısı ve yüksek şekillendirme hızı ile yapılan hesaplamaaya olan etkisi görülmektedir. Sonuçlar ayrıca grafik olarak Şekil B.1’de gösterilmiştir.

Tablo B.1. Eleman sayısı 4, şekillendirme hızı 4000mm/s olan modeldeki Elastik modül değişkenliği

Elastik modül	Elastik modül oranı	Yan duvar açısı (Θ_1)	(Θ_1) değişimi %	Flanş açısı (Θ_2)	(Θ_2) değişimi %
200	0.96	90.225	0.043	85.743	0.185
203	0.98	90.209	0.026	85.805	0.113
205	0.99	90.196	0.011	85.862	0.047
207	1.00	90.186	0.000	85.902	0.000

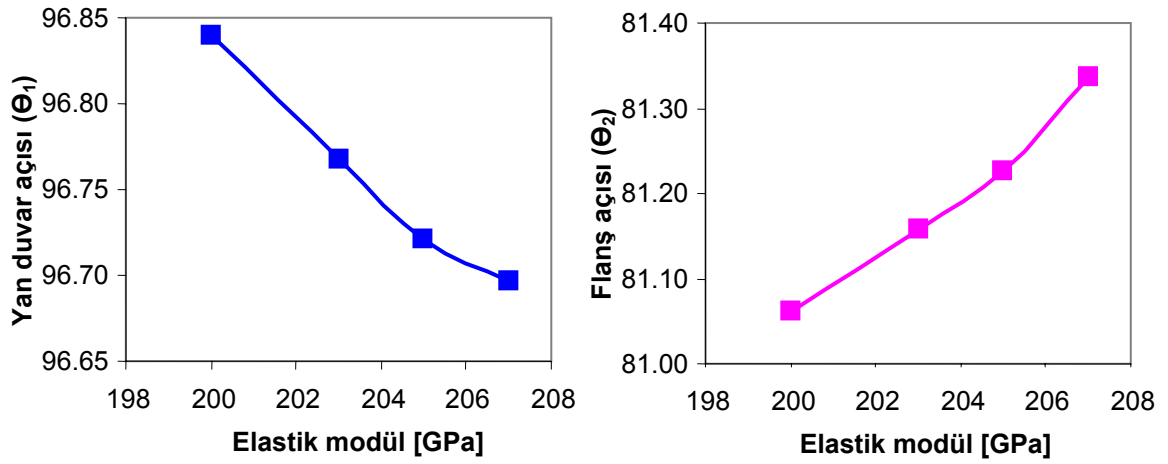


Şekil B.1. Eleman sayısı 4 şekillendirme hızı 4000mm/s olan modeldeki Elastik modül değişkenliğinin geri esneme açılarına olan etkisi

Değişkenliğin daha büyük geri esneme değerleri hesaplanmış olan diğer bir modele olan etkisi ise Tablo B.2’de ve Şekil B.2’te gösterilmiştir

Tablo B.2 : Eleman sayısı 12, şekillendirme hızı 1000mm/s olan modeldeki Elastik modül değişkenliği

Elastik modül	Elastik modül oranı	Yan duvar açısı (Θ_1)	(Θ_1) değişimi %	Flanş açısı (Θ_2)	(Θ_2) değişimi %
200	0.96	96.840	-0.148	81.06	0.341
203	0.98	96.768	-0.073	81.157	0.221
205	0.99	96.721	-0.025	81.227	0.135
207	1.00	96.697	0.000	81.337	0.000

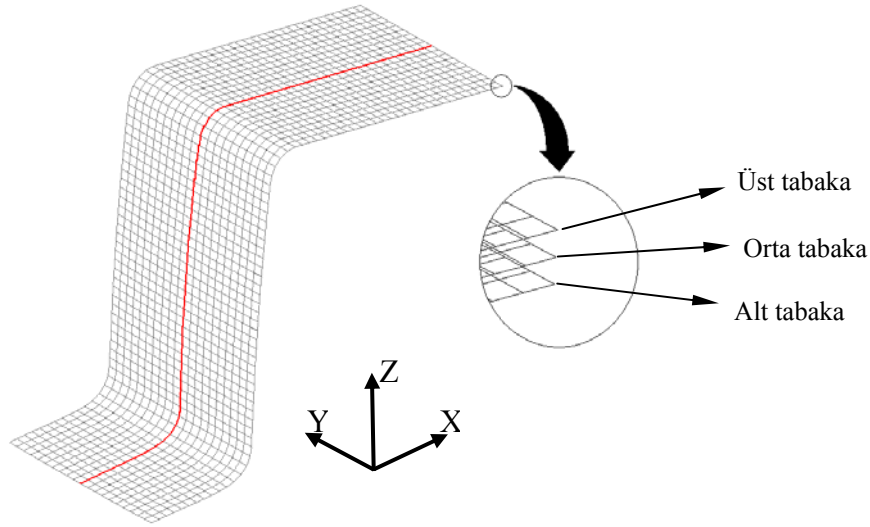


Şekil B.2. Eleman sayısı 12 şekillendirme hızı 1000mm/s olan modeldeki Elastik modül değişkenliğinin geri esneme açılarına olan etkisi

Sonuç olarak malzeme tanımlamasında kullanılan elastik modül değişkenliğinin, şekillendirme ve geri esneme deformasyon sonuçlarına etkisi ihmal edilebilecek seviyededir. Bu durum öngörülen proses parametrelerinin sonuçlara etkisinin yanında hesaplamalara dahil edilmemiştir.

EK-B Geri Esneme Hesaplaması Öncesi Ve Sonrasındaki Levha Üzerindeki Gerilme, Gerinim Dağılımları

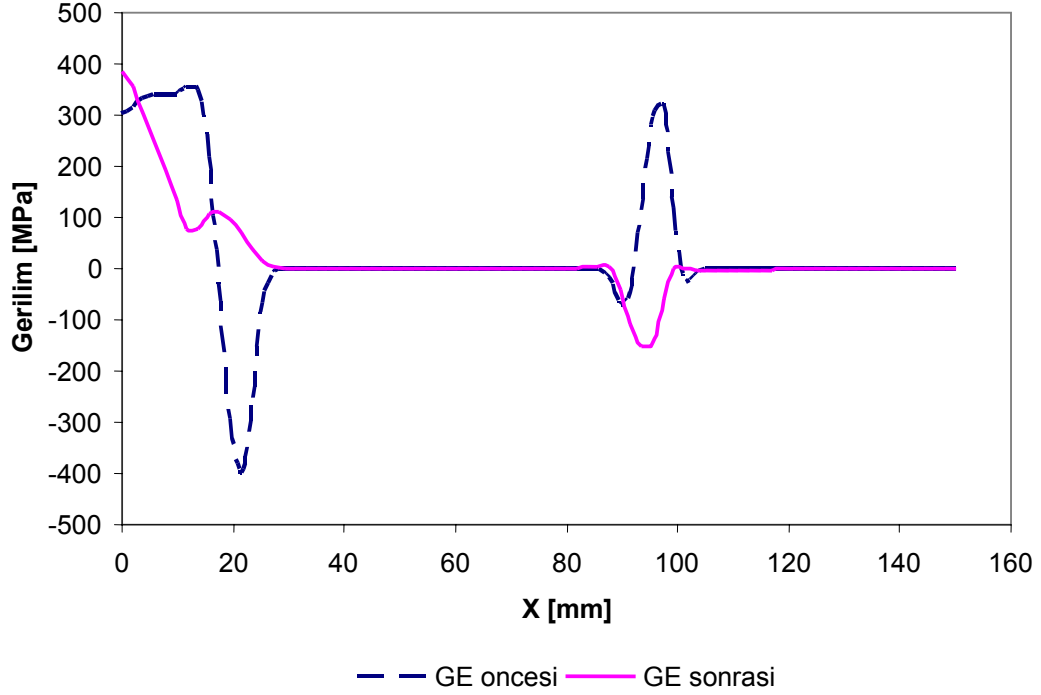
Bu kısımda geri esneme öncesi ve sonrasındaki sac levha üzerindeki gerilme ve gerinim değerleri incelenmiştir. En büyük geri esneme değerlerinin hesaplandığı düşük şekillendirme hızı ile şekillendirilmiş sac levhaları büküm eksenine dik olacak şekilde orta kısımdan kesit alınmıştır. Bükme ve çekme işlemleri ile ortaya çıkan levha boyunca oluşan normal gerilme değerleri sac levhanın kalınlığı boyunca alt, üst yüzeylerde ve orta düzlemde değerlendirilmiştir. Yine aynı düzlemde gerilme ile aynı yönde oluşan gerinim değerleri de birbirleri ile karşılaştırılmıştır.



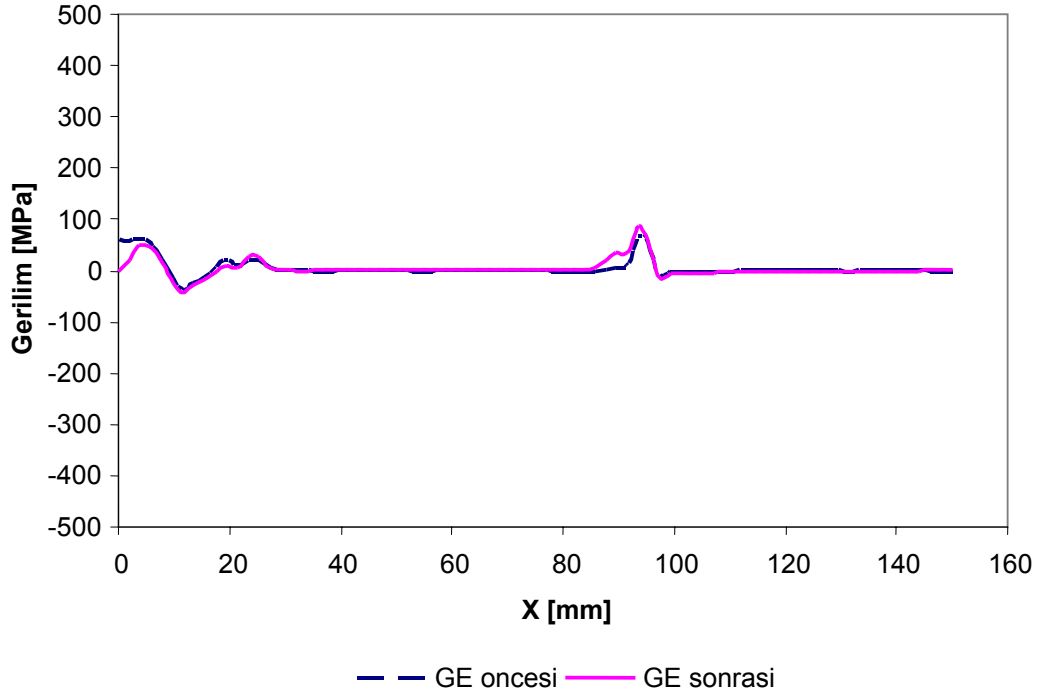
Şekil B.1. Sac levha boyunca alınan kesit ve sac kalınlığı yönündeki tabakalar

Sürtünmesiz hesaplamada kesit üzerindeki gerilme ve gerinim dağılımı

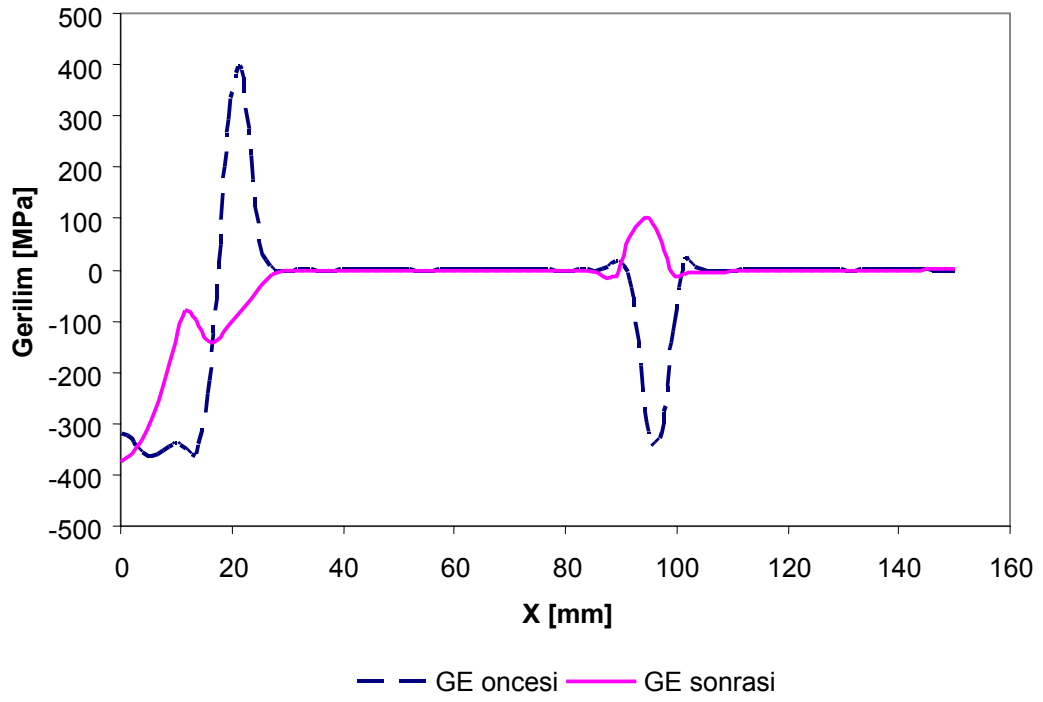
Omuz üzerinde 4 eleman bulunduran ve şekillendirme hızı 1000mm/s olan modelde yapılan geri esneme hesaplaması öncesi ve sonrası sac levha tabakalarında oluşan gerilme durumları Şekil B.2’de görülmektedir.



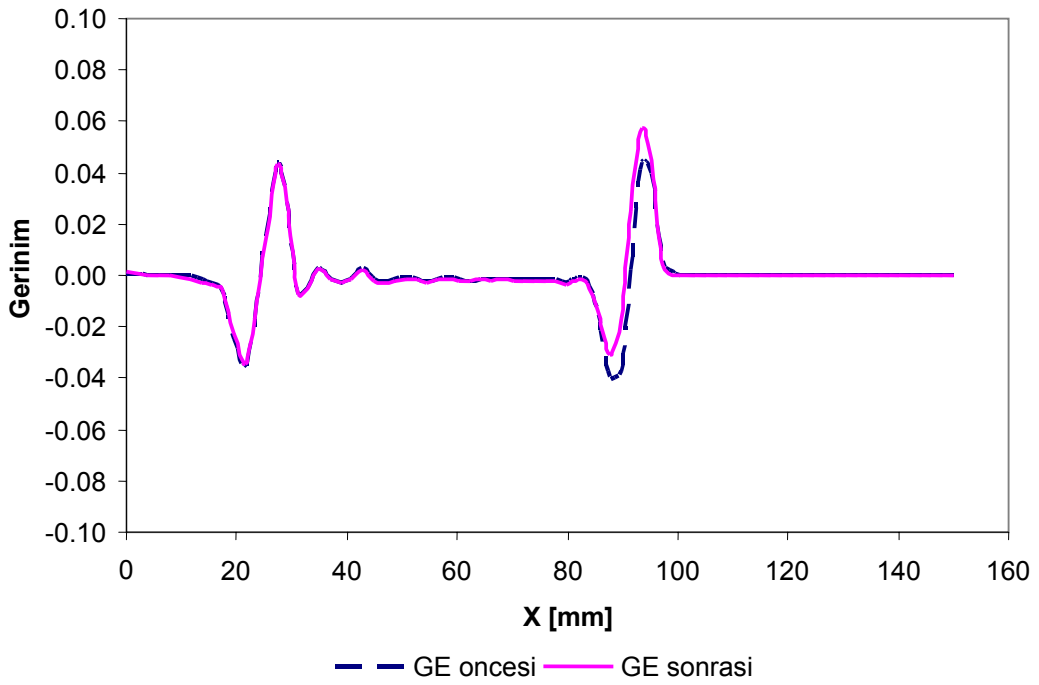
Şekil B.2. 4 elemanlı 1000mm/s şekillendirme hızı için üst tabakadaki gerilme değişimi



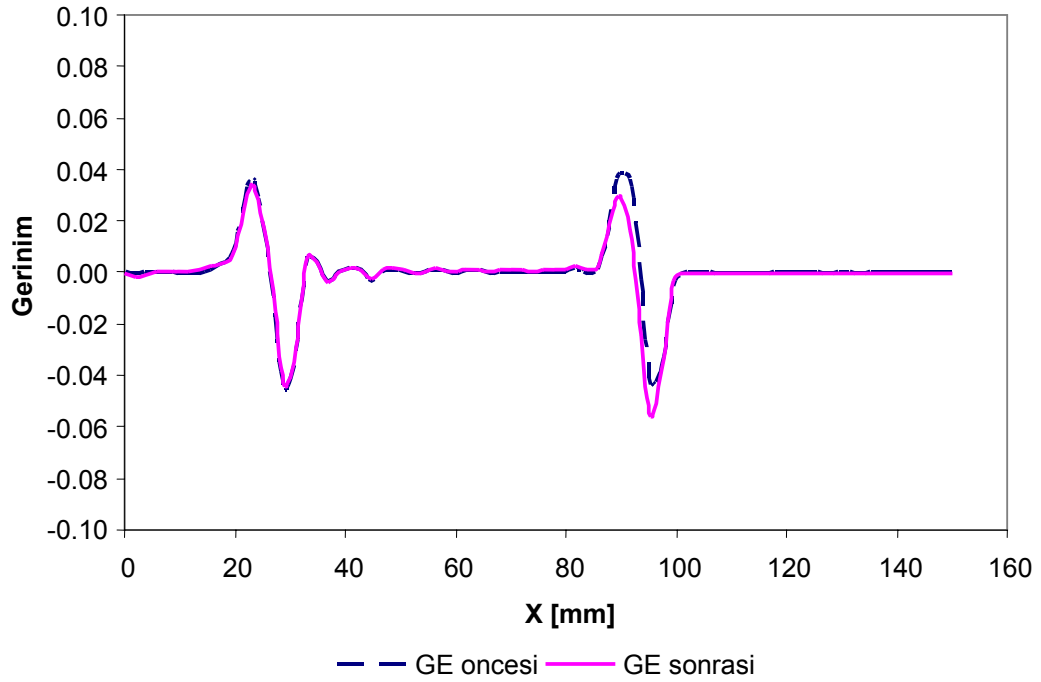
Şekil B.3. 4 elemanlı 1000mm/s şekillendirme hızı için orta tabakadaki gerilme değişimi



Şekil B.4. 4 elemanlı 1000mm/s şekillendirme hızı için alt tabakadaki gerilme değişimi

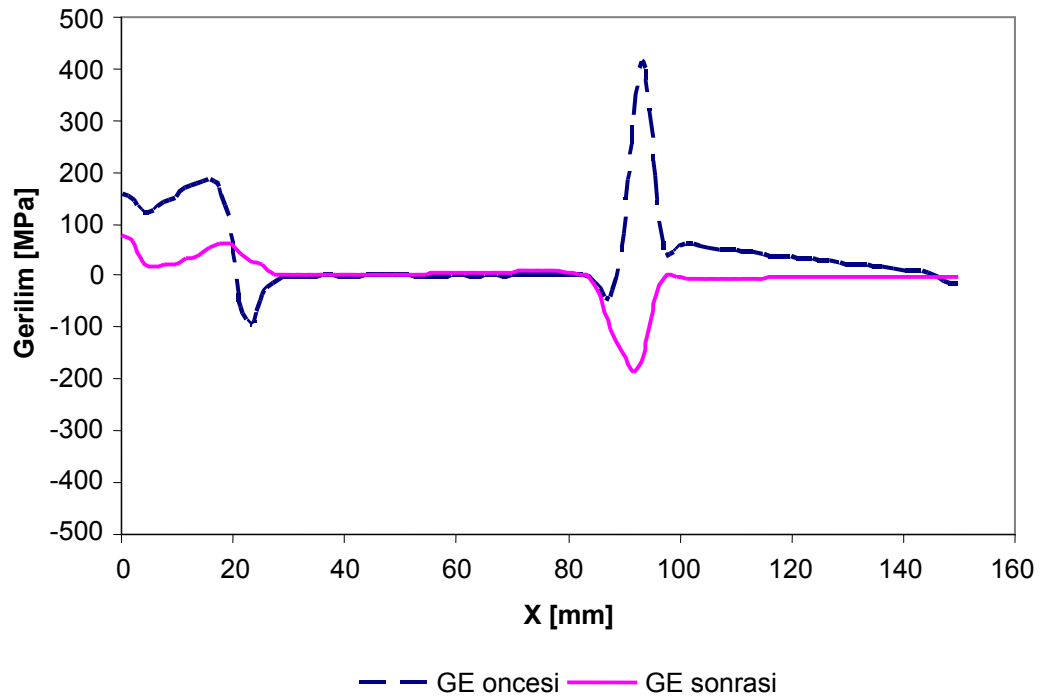


Şekil B.5. 4 elemanlı 1000mm/s şekillendirme hızı için üst tabakadaki gerinim değişimi

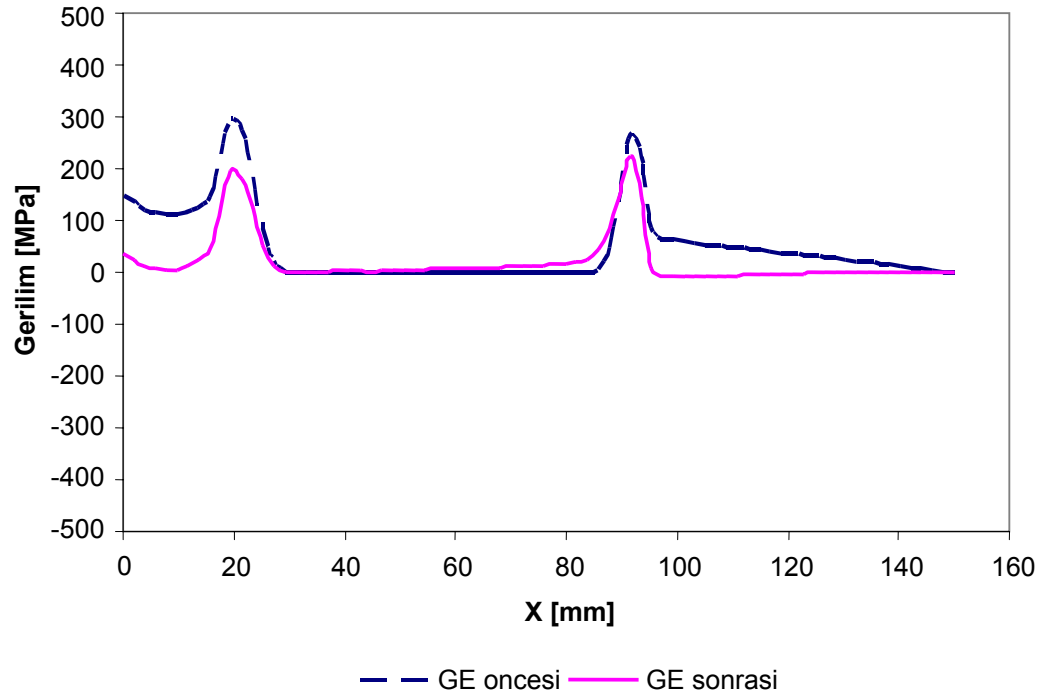


Şekil B.6. 4 elemanlı 1000mm/s şekillendirme hızı için alt tabakadaki gerinim değişimi

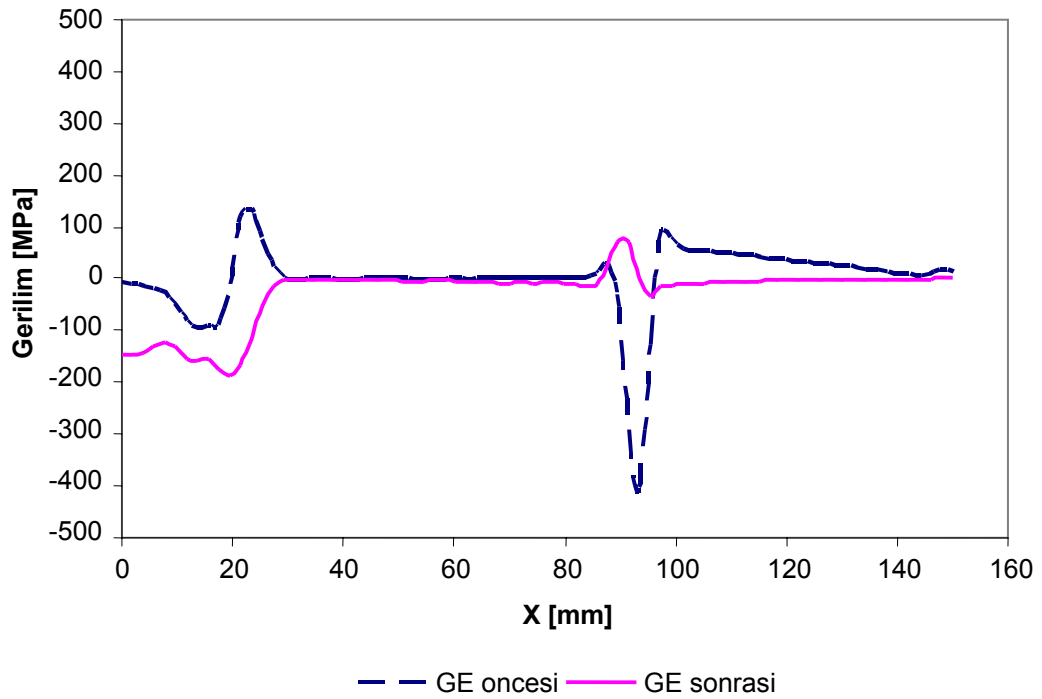
Sürtünme 0.06 olması halinde kesit üzerindeki gerilme ve gerinim dağılımı



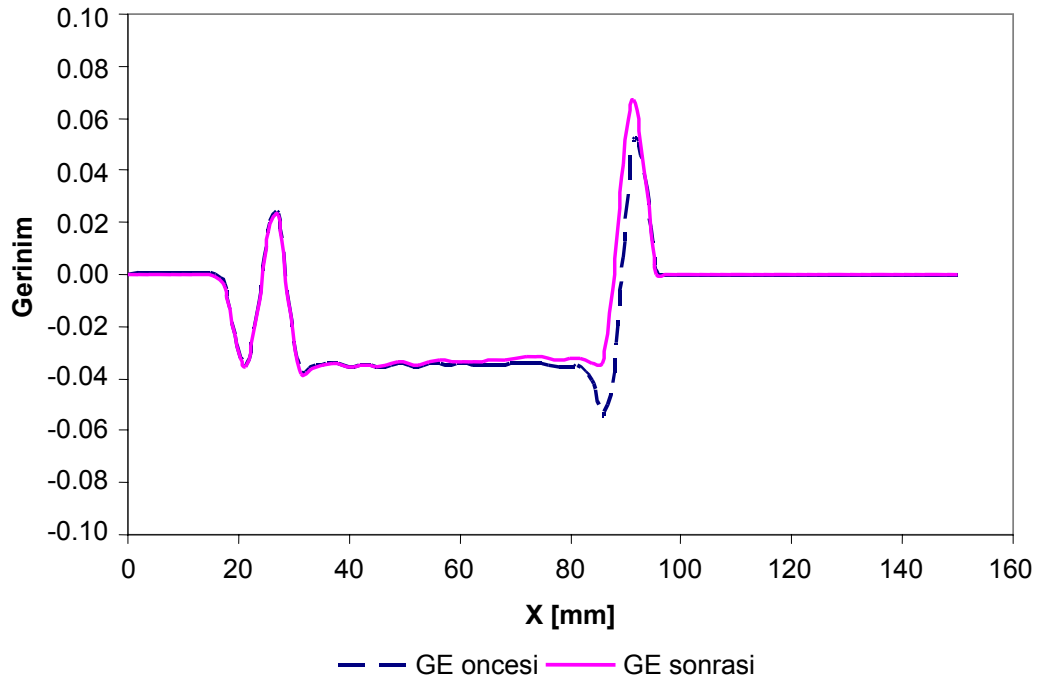
Şekil B.7. 4 elemanlı 1000mm/s şekillendirme hızı ve 0.06 sürtünme katsayısı için üst tabakadaki gerilim değişimi



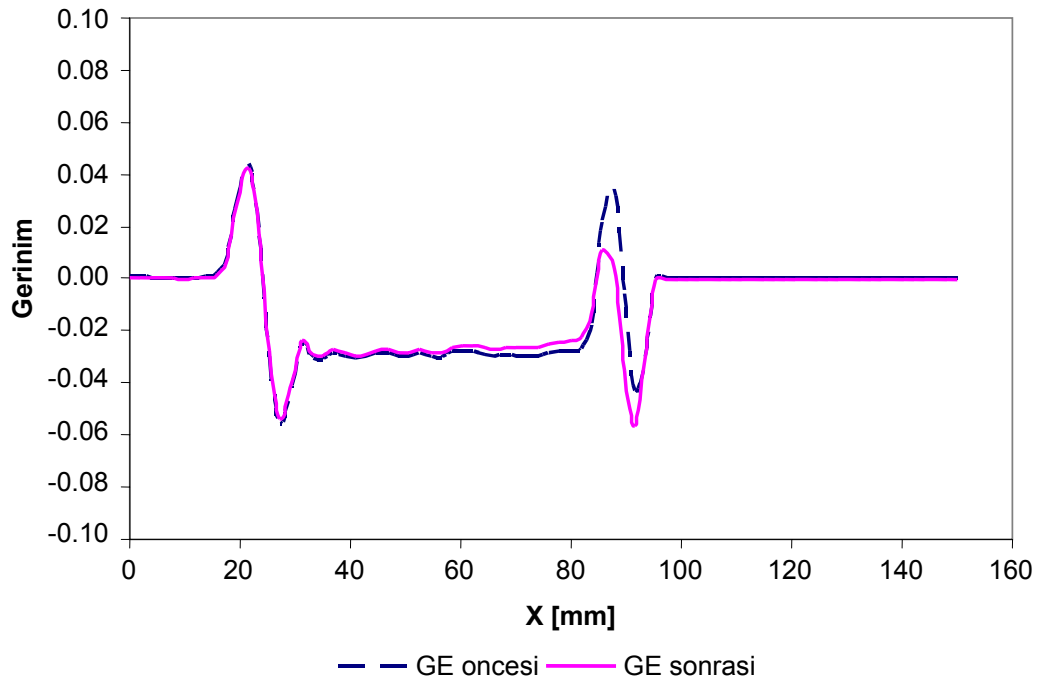
Şekil B.8. 4 elemanlı 1000mm/s şekillendirme hızı ve 0.06 sürtünme katsayısı için orta tabakadaki gerilim değişimi



Şekil B.9. 4 elemanlı 1000mm/s şekillendirme hızı ve 0.06 sürtünme katsayısı için alt tabakadaki gerilim değişimi

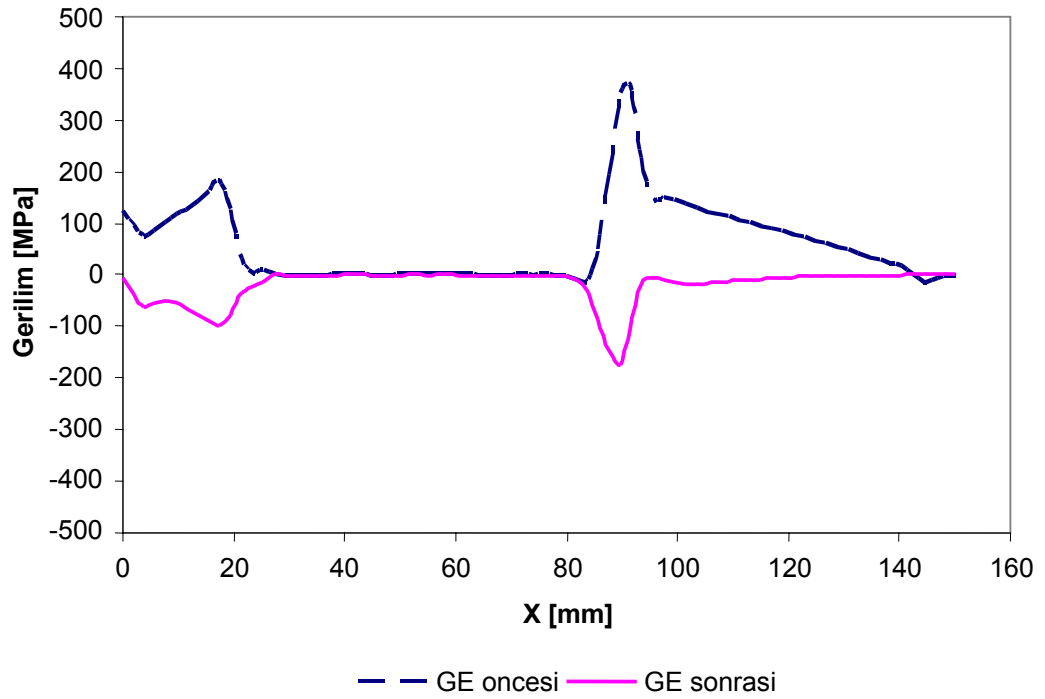


Şekil B.10. 4 elemanlı 1000mm/s şekillendirme hızı ve 0.06 sürtünme katsayısı için üst tabakadaki gerinim değişimi

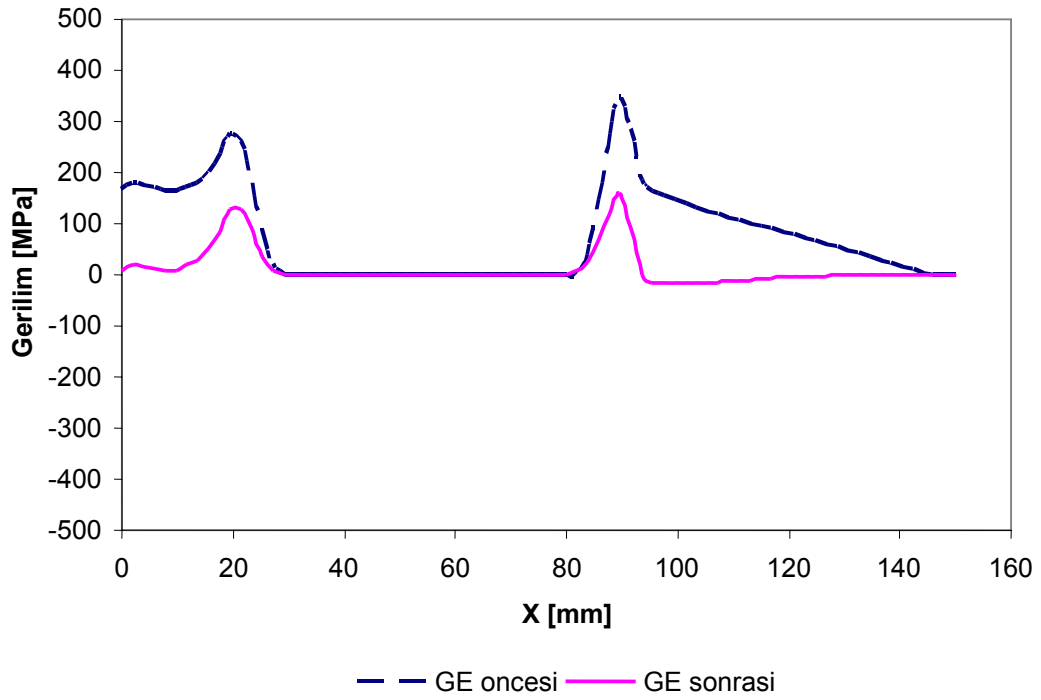


Şekil B.11. 4 elemanlı 1000mm/s şekillendirme hızı ve 0.06 sürtünme katsayısı için alt tabakadaki gerinim değişimi

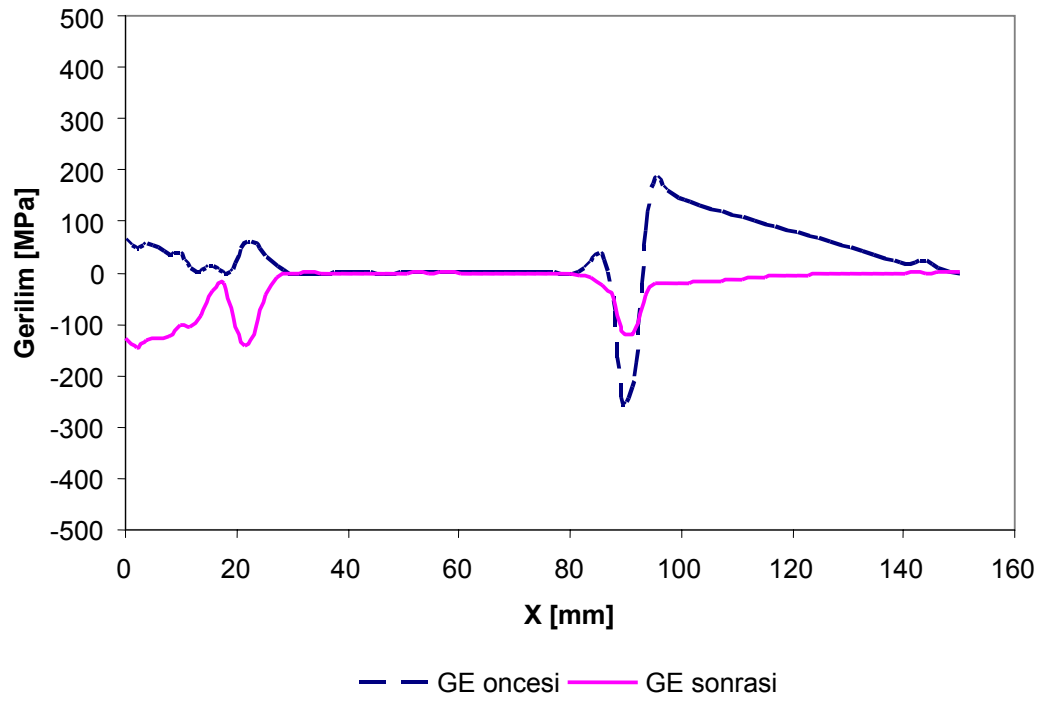
Sürtünme 0.144 olması halinde kesit üzerindeki gerilme ve gerinim dağılımı



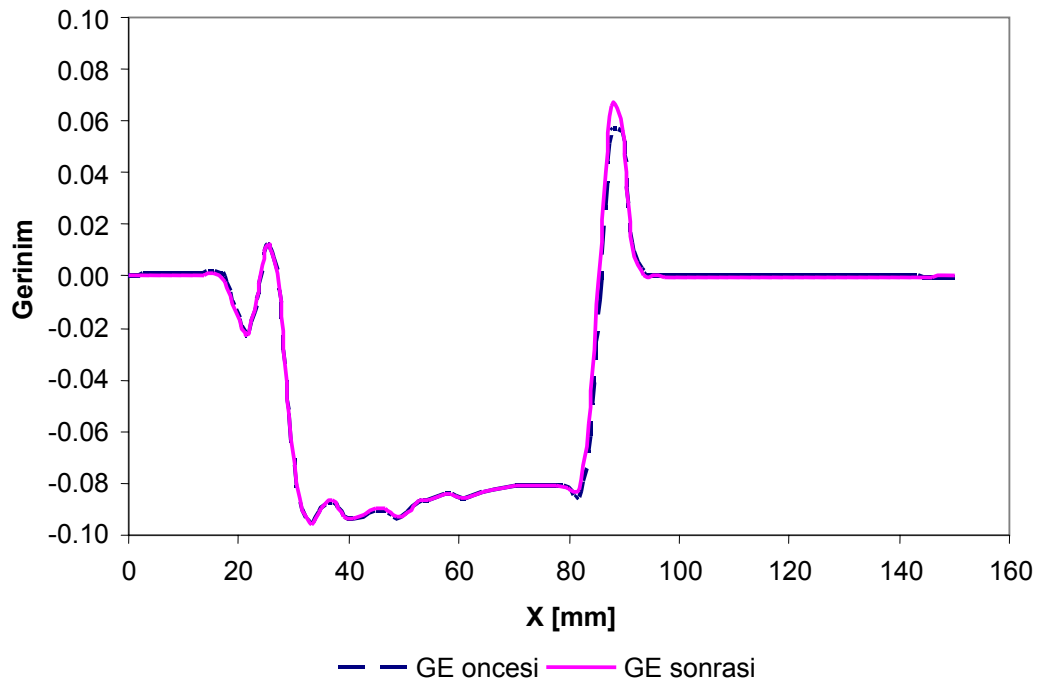
Şekil B.12. 4 elemanlı 1000mm/s şekillendirme hızı ve 0.144 sürtünme katsayısı için üst tabakadaki gerilim değişimi



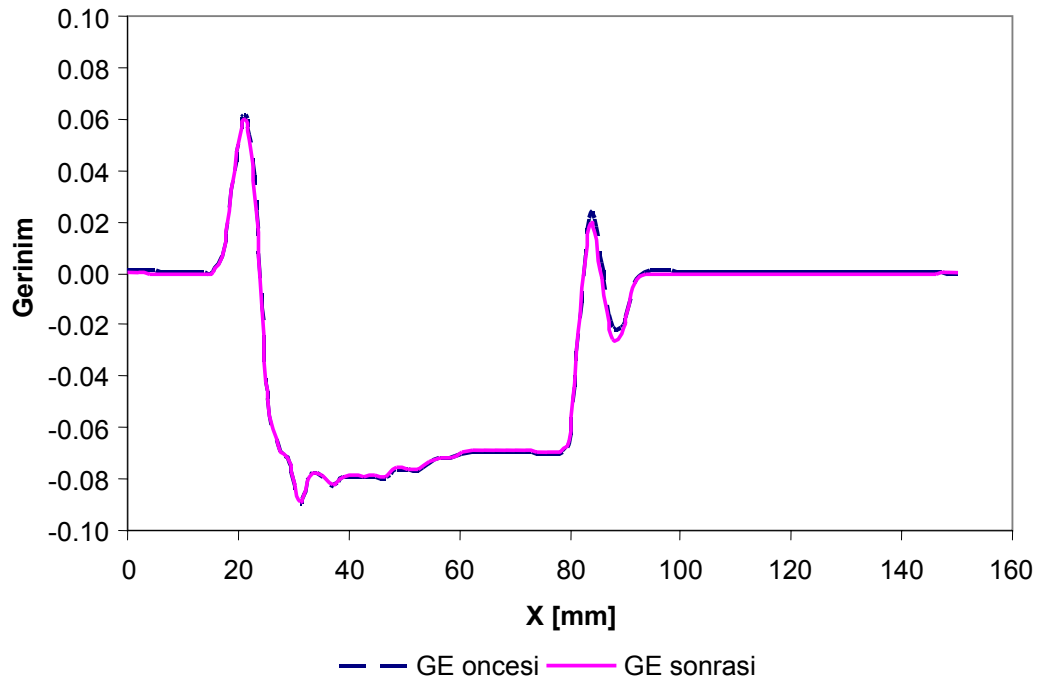
Şekil B.13. 4 elemanlı 1000mm/s şekillendirme hızı ve 0.144 sürtünme katsayısı için orta tabakadaki gerilim değişimi



Şekil B.14. 4 elemanlı 1000mm/s şekillendirme hızı ve 0.144 sürtünme katsayısı için alt tabakadaki gerilim değişimi



Şekil B.15. 4 elemanlı 1000mm/s şekillendirme hızı ve 0.144 sürtünme katsayısı için üst tabakadaki gerinim değişimi



Şekil B.16. 4 elemanlı 1000mm/s şekillendirme hızı ve 0.144 sürtünme katsayısı için alt tabakadaki gerinim değişimi

ÖZGEÇMİŞ

Osman Hamdi METE 1977 yılında İzmit'te doğdu. 1994 yılında Derince Lisesinden mezun olduktan sonra aynı yıl, Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümüne girdi. 1998 yılında Makine Mühendisliği bölümünü başarı ile tamamlayarak aynı yıl Makine Tasarım İmalat bilim dalında Yüksek Lisans programına kaydoldu. 2001 yılında tamamladığı Yüksek Lisans programının ardından aynı yıl aynı bilim dalındaki Doktora programına başladı. 1998 yılında başladığı, Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümündeki Araştırma görevlisi görevini halen sürdürmektedir.