

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KARE ÇEKME İŞLEMİNDE
ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİK SINIRININ SONLU
ELEMENLAR YÖNTEMİYLE TAHMİN EDİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Mustafa AKPINAR

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

Ocak 2010

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KARE ÇEKME İŞLEMİNDE
ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİK SINIRININ SONLU
ELEMENLAR YÖNTEMİYLE TAHMİN EDİLMESİ

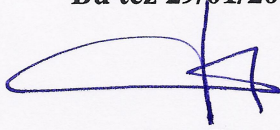
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Mustafa AKPINAR

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

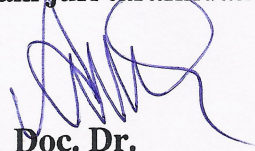
Enstitü Bilim Dalı : MAKİNA TASARIM VE İMALAT

Bu tez 29/01/2010 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.



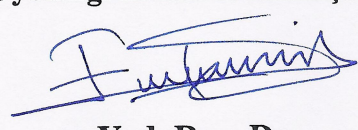
Doç. Dr.
Mehmet FIRAT

Jüri Başkanı



Doç. Dr.
Ahmet TÜRK

Üye



Yrd. Doç. Dr.
Erdal KARADENİZ

Üye

TEŞEKKÜR

Bana bu konuyu öneren ve çalıőmamın her aőamasında bana yardımcı olan, danıőman hocam, saygı değer Doç. Dr. Mehmet FIRAT'a en içten duygularımla teşekkür ederim.

Ayrıca tez savunma sınavıma olan katkıları ve önerilerinden dolayı sayın Doç. Dr. Ahmet TÜRK ve sayın Yrd. Doç. Dr. Erdal KARADENİZ' e teőekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca öğrenimim sırasında, her konuda destek olan aileme çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
TABLolar LİSTESİ.....	ix
ÖZET.....	x
SUMMARY.....	xi
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
1.1. Trip Malzemesinin Şekillendirilebilirliğine Yönelik Literatür Çalışması.....	2
1.2. Çalışmanın Ana Hatları.....	3
BÖLÜM 2.	
SAC METALLERDE ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİK VE TANIMLANMASI.....	5
2.1. Giriş.....	5
2.2. Kubbe Çekme Testi.....	6
2.3. Çekme Testi.....	11
2.4. Şekillendirme Benzetim Testleri.....	14
BÖLÜM 3.	
KARE ÇEKME TESTİ VE TRIP MALZEME İÇİN KARE ÇEKME SONUÇLARI.....	15
3.1. Kare Çekme Testi.....	15

3.2. Sac Açınım Özellikleri.....	17
3.3. Kare Çekme Testi Sonuçları.....	20
3.3.1. Zimba kuvvet sonuçları.....	20
3.3.2. Majör gerinim sonuçları.....	21
3.3.3. Minör gerinim sonuçları.....	22
3.3.4. Kalınlık gerinim ve kalınlık dağılım sonuçları.....	23
3.3.5. Yırtılma yüksekliği sonuçları.....	25
BÖLÜM 4.	
KARE ÇEKME TESTİNİN SONLU ELEMANLAR ANALİZİ.....	26
4.1. Modelleme.....	26
4.1.1. Ağ yapısı.....	27
4.2. Modellerin Tanıtılması.....	28
4.3. Sac Taslak Özellikleri.....	29
4.3.1. Sac malzemenin özelliklerinin bilgisayar ortamına aktarılması.....	30
4.4. Yüklemelerin Tanımlanması.....	33
4.3.1. Kalıp hızları.....	33
4.3.2. Tutucu kuvvetleri.....	34
4.5. Sonlu Eleman Modelleri.....	35
4.6. Deney Sonuçları İle Sonlu Elemanlar Model Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	35
4.6.1. Zimba kuvvetinin karşılaştırması.....	36
4.6.2. Majör gerinimin karşılaştırılması.....	37
4.6.3. Minör gerinimin karşılaştırılması.....	39
4.6.4. Kalınlık geriniminin ve kalınlık dağılımının karşılaştırılması	40
4.6.5. Şekillenirme sınır grafiklerinin (ŞSG) karşılaştırılması.....	43
BÖLÜM 5.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	46
KAYNAKLAR.....	48
EKLER	50
EK A.....	50

EK B.....	55
ÖZGEÇMİŞ.....	70

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

AISI	: Amerika Demir Çelik Enstitüsü
DP	: Çift Fazlı Çelikler (Dual Phase)
E	: Elastisite Modülü
K	: Malzeme Mukavemet Katsayısı
l_0	: Çekme Testi Numune İlk Boyu
l	: Çekme Testinde Yükleme Altında Numune Boyu
n	: Pekleşme Üssü
r	: Anizotropluk Parametresi
R	: Ortalama r değeri
t_0	: Kesit İlk Kalınlığı
t	: Kesit Yük Altında Kalınlığı
ω_0	: Kesit İlk Genişliği
ω	: Kesit Yük Altında Genişliği
ŞSE	: Şekillendirme Sınır Eğrisi
ŞSG	: Şekillendirme Sınır Grafiği
TRIP	: Deformasyon Dönüşümlü Martenzit Çeliği (TRansport Induced Plasticity)
σ	: Gerçek Gerilme
ε	: Gerçek Gerinim

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Kubbe Çekme Testi.....	7
Şekil 2.2.	Sac Metalde Yırtılmanın Oluşması.....	7
Şekil 2.3.	Bilgisayar ve kamera ile kubbe çekme incelme sonuçlarının bulunması.....	8
Şekil 2.4.	Kubbe çekme testinde kullanılan farklı geometrilerdeki örnek taslaklar.....	9
Şekil 2.5.	Şekillendirme sınır eğrisi ve şekillendirme sınır grafiğinin şematik gösterimi.....	9
Şekil 2.6.	Şekillendirme sınır grafiğinde çekme durumları.....	10
Şekil 2.7.	Çekme test numunesinin başlangıç ve çekme durumu.....	11
Şekil 2.8.	Tek eksenli çekme testi gerilme-gerinim eğrisi ve şematik gösterimi.....	12
Şekil 3.1.	Kare çekme şematik gösterimi.....	16
Şekil 3.1a.	Kare çekme referans konumu.....	16
Şekil 3.1b.	Kare çekme işlemindeki konum.....	16
Şekil 3.2.	Kare çekme yüzey ölçüleri.....	16
Şekil 3.3.	Sacın Hizalanması.....	17
Şekil 3.4.	Kare çekme işleminde kalıp takımı.....	17
Şekil 3.5.	Kare çekme testi için göre tanımlanan taslakların genişlik ölçüleri.....	17
Şekil 3.6.	Çeliklerin çekme muvakatmeti – uzama grafiği.....	18
Şekil 3.7.	Trip600 malzemesi için Holloman denkleminde göre çekme eğrisi	19
Şekil 3.8.	Trip600 için kubbe çekme testi sonucu oluşan ŞSE ve ŞSG.....	19
Şekil 3.9.	Gerilimlerin ölçümlerinin yapıldığı yönler ve kare markalama yapılmış taslak fotoğrafı.....	20
Şekil 3.10.	Taslak I, zımba kuvveti – çekme yükseklik değişim grafiği.....	21

Şekil 3.11.	Üç kesitte bulunan majör gerinim / pozisyon grafiği.....	22
Şekil 3.12.	Üç kesitte minör gerinim / pozisyon grafiği.....	23
Şekil 3.13.	Üç kesitte kalınlık gerinimi / pozisyon grafiği.....	24
Şekil 3.14.	Üç kesitte kalınlık / pozisyon grafiği.....	24
Şekil 4.1.	Şekillendirmenin sonlu elemanlar yöntemi ile yapılması.....	27
Şekil 4.2.	Ağ yapısı oluşturulmuş kalıp takımı.....	27
Şekil 4.3a.	Taslak I; model 1 ve model 2 için sac açınım ağ yapısı.....	29
Şekil 4.3b.	Taslak I; model 3 için sac açınım ağ yapısı.....	29
Şekil 4.4.	Sonuçların alındığı kesitlerin gösterilmesi.....	30
Şekil 4.5.	Hughes-Liu kabuk elemanı.....	32
Şekil 4.5a.	Hughes-Liu kabuk elemanının birim küpte gösterimi.....	32
Şekil 4.5b.	Hughes-Liu kabuk elemanı için yedi katmanlı tam çözüm için hesaplama noktaları.....	32
Şekil 4.6.	Kayma düzeltme faktörünün şematik gösterimi.....	33
Şekil 4.7.	Çekme işlemi hız – zaman grafikleri.....	34
Şekil 4.8.	Çekme işlemi tutucu kuvvet – zaman grafikleri.....	34
Şekil 4.9.	Zımba kuvvet eğrileri.....	36
Şekil 4.10.	Kesit 1 – Majör gerinim eğrileri.....	37
Şekil 4.11.	Kesit 2 – Majör gerinim eğrileri.....	38
Şekil 4.12.	Kesit 1 – Minör gerinim eğrileri.....	39
Şekil 4.13.	Kesit 2 – Minör gerinim eğrileri.....	40
Şekil 4.14.	Kesit 1 – Kalınlık gerinim eğrileri.....	41
Şekil 4.15.	Kesit 2 – Kalınlık gerinim eğrileri.....	42
Şekil 4.16.	Kesit 1 – Kalınlıkların dağılımının karşılaştırılması.....	42
Şekil 4.17.	Kesit 2 – Kalınlıkların dağılımının karşılaştırılması.....	43
Şekil 4.18.	49.02 mm yükseklik için deneysel ŞSE göre Model 3.....	44
Şekil 4.19.	49.02 mm yükseklik için Keeler ŞSE göre Model 3.....	45

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 2.1.	Test yöntemlerinin şekillendirme üzerine etkisi.....	6
Tablo 3.1.	Trip600 1.4 mm. malzemesinin mekanik özellikleri.....	18
Tablo 3.2.	Sac ölçülerine göre yırtılmanın görüldüğü yükseklikler.....	25
Tablo 4.1.	Taslak I için hazırlanan modeller ve değişkenleri.....	28
Tablo 4.2.	Farklı modellerde bilgisayar analiz süreleri.....	35

ÖZET

Anahtar kelimeler: Kare çekme, şekillendirilebilirlik, sonlu elemanlar yöntemi, yüksek mukavemetli çelikler, şekillendirme sınır grafiği

İleri yüksek mukavemetli çelikler, otomotiv sektöründe, ağırlığı azaltılmak için kullanılmaya başlanmıştır. Ağırlığın azalmasıyla orantılı olarak yakıt tüketimi de azalmaktadır. Diğer taraftan sac mukavemeti yüksek olduğundan, çarpma esnasında normal klasik çeliklere göre daha fazla enerji emer.

Bu çalışmada yüksek mukavemetli çeliklerden Trip sacları ile yapılmış olan kare çekme işleminin deneysel sonuçları, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak hazırlanan modellerin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Aynı kalıp için üç sonlu elemanlar modeli hazırlanmıştır. Deneysel veriler ile sonlu elemanlar sonuçları; zımba kuvveti, gerinim ve kalınlık yönünden karşılaştırılmıştır. En uygun sonlu elemanlar modeli bulundu. Bu model kullanılarak şekillendirilebilirlik sınır grafiği üzerinden sonlu elemanlar yönteminin sonuçları incelenmiştir. SE sonuçlarında kalınlık, deneysel kalınlığa göre %20 fazla bulundu. Kalınlık tahmininde hata ve sonlu elemanlar yönteminde şekillendirilebilirliğin doğru tahmin edilmediği görülmüştür. Bunun sebebi olarak kalınlık tahmininde yapılan hata olarak açıklandı.

ESTIMATING LIMITS OF FORMABILITY IN SQUARE DRAW WITH FINITE ELEMENT METHOD

SUMMARY

Key Words: Square draw, formability, finite element method, high strength steels, formability limit diagram, FLC

In automotive industry, advanced high strength steels are used to reduce total vehicle weight. With lower weight, fuel consumption reduces too. Moreover, because of high strength of sheet, more impact energy is absorbed compared to conventional steels. In this study, results of square draw tests in which Trip material was used were compared using finite element simulation. Three finite element models are prepared for the same die set. Experimental results and finite element results were compared in terms of punch force, strain and thickness distributions. A suitable finite element model is determined. Finite element analyses were examined at forming limit diagram using this model. Computed minimum thickness with FE was found 20 percent higher than the experimental results. Errors are found in thickness predictions and formability of square draw with forming in finite element method is not predicted accurately. The reason for this situation is explained with errors in thickness results.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Sac parçaların şekillendirme yoluyla imalatında en önemli iki adım; uygulanacak şekillendirme işleminin belirlenmesi ve kalıp elemanlarının hazırlanmasıdır. Belirlenen şekillendirme işlemi ve uygun kalıp elemanlarının hazırlanması, daha sonra hata oluşmasını engellemek için üzerinde tartışılması gereken bir konudur. Günümüzde uygun işlem ve kalıp elemanlarının seçiminde, bilgisayar üzerinden yapılan mühendislik hesaplamaları, daha sonra oluşabilecek hataları öngörmeye önemlidir [1].

Sac parçanın üretimi için çoğu zaman birden fazla işlem adımına ve her işlem adımı için farklı kalıp ve imalat takımlarına gerek duyulur [2]. Sac parçanın derin çekme, sıvama, bükme, çekme gibi [1-3] şekillendirme işlemlerinden hangisine gireceği daha önce belirlenmelidir. Bunun dışında kullanılan malzeme, parçanın kullanım alanına göre değişmektedir. Şekillendirme işleminin yüksek olmadığında daha gevrek malzeme kullanılırken, derin çekme gibi şekillendirmenin yüksek olması gereken yerlerde sünek malzemelerin kullanılması gerekmektedir. Yüksek mukavemet ve yüksek süneklik istenen işlemlerde ise, bu istekleri karşılayabilecek yeni nesil çelikler (ileri yüksek mukavemetli çelikler) kullanılmaktadır [4]. Tüm bu süreçler imalat öncesi tasarımıdır.

Sac parçaların şekillendirilmesi sırasında yüzeyde bozulmalar, kırışmalar ya da yırtılmalar, imalat öncesi tasarım sürecinde engellenmelidir. Yüzey bozuklukları, kırışmalar ve yırtılmalar çoğu zaman istenmeyen problemlerdir. Bu problemlerin giderilmesi için bilgisayar üzerinde çeşitli benzetimler yapılmıştır. Bu benzetimler yapılırken çeşitli yaklaşımlar söz konusudur. Bu yaklaşımların başında sonlu elemanlar yöntemi (SEY) gelmektedir. Sonlu elemanlar yönteminde sonuçlar, kendi içerisinde yaptığı kabuller nedeniyle, bir miktar hata barındırmaktadır.

Malzeme şekillenirken, mikro yapıda çeşitli bozulmalar olmaktadır. Yeni nesil yüksek mukavemetli çeliklerde bu bozulma, faz değişimi olarak görülmektedir. Faz değişimlerinin matematiksel olarak modellenememesinden dolayı, SEY üzerinde yapılan tahminlerdeki hata miktarı artmaktadır.

Sac metal şekillendirme ve yeni nesil çeliklerden Trip çeliğini sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak konu alan çeşitli çalışmalar yapılmıştır.

1.1. Trip Malzemesinin Şekillendirilebilirliğine Yönelik Literatür Çalışmaları

Trip çeliğinin çekme işlemi ile ilgili bazı çalışmalar yapılmıştır.

T. K. Shan ve arkadaşları Trip malzemesine yönelik çekme şekillenmesini tahmin eden model geliştirmişlerdir. Buna göre üç eksenli gerilme ve plastik gerinimine bağlı olan kinetik dönüşüm eşitliği yazmışlardır. Buna göre zımba köşelerinde oluşmasını bekledikleri yırtılmaları tahmin etmeye çalışmışlardır [5].

K. Roll ve A. Faust, Trip çelik malzeme özelliklerini kullanarak çekme işlemi gerçekleştirmişlerdir. Sonuçları gerinim bazında iki kesitte inceleyip, uygun olmadığını görmüşlerdir [6].

R. Padmanabhan ve arkadaşları sonlu elemanlar yöntemi ile yumuşak fazlı çelik ile çift fazlı çeliği (DP) kaynaklayıp derin çekme işlemini gerçekleştirip anizotropi etkisini görmek istemişlerdir. Buna göre malzemeler farklı kalınlık değişimi göstermişler ve düğüm noktaları farklı miktarda ilerlemiştir [7].

Sadece Trip çeliğinin modellenmesine yönelik olarakta çalışmalar da bulunmaktadır.

P.J. Jacques yüksek mukavemetli çeliklerin plastisite içeren dönüşümü üzerine çalışmıştır ve Trip malzemesi için karmaşık dönüşüm şematiği tanımlamıştır [8].

A. Wasilkowska ve arkadaşları ise soğuk şekillendirilmiş Trip çeliklerinin mikro yapısı ve çekme davranışlarını incelemişlerdir. Homojen mikroyapı ve blok halinde bulunan martenzit yapının, daha fazla uzama sağladığını belirtmişlerdir [9].

Hai-yan Yu ve arkadaşları Trip çeliklerinin çekme işlemi gerçekleşirken deformasyon davranışını incelemişlerdir (2006). Sonuç olarak Trip çeliği için daha önce Tomota Y. ve arkadaşlarının önerdiği çekme eğrisi modelini kullanarak, çekme eğrisi önermişlerdir [10].

Qiang Liu ve arkadaşları ise çekme mukavemeti 780 MPa olan Trip malzemesi araştırılması ve geliştirilmesi üzerine çalışmıştır. Farklı tavlama sıcaklıkları ve izotermal sıcaklıklarında durumları belirlenmiştir [11].

Hoan Huh ve arkadaşları Trip ve DP sac metallerinin dinamik çekme karakterlerini belirlemeye çalışmışlardır. Farklı çekme hızları altında malzemelerin çekme eğrilerini karşılaştırmışlardır. Trip malzemenin kopma uzamasını DP malzemesine göre daha fazla olduğunu göstermişlerdir [12].

1.2. Çalışmanın Ana Hatları

Bu tez içerisinde sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak normal mukavemete sahip sac metallerde şekillendirilebilirliği doğru tahmin eden malzeme modeli ile yeni nesil yüksek mukavemetli sac metallerin şekillendirilebilirliği tahmin edilmiştir.

İkinci bölümde, sac metal şekillendirmede kullanılacak malzemenin mekanik özelliklerini bulmayı sağlayan “çekme testi” ve şekillendirilebilirlik tahmininde bulunması gereken şekillendirilebilirlik sınır eğrisini veren “kubbe çekme testi” tanıtılmıştır.

Üçüncü bölümde, kare çekme işlemi, kare geometrisi ve kullanılan sac metal malzeme tanıtılmıştır. Basit çekme testi, kubbe çekme testi sonucu elde edilen malzeme verileri ve kare çekme işlemi sonuçları gösterilmiştir [4].

Dördüncü bölümde, sonlu elemanlar modelleri tanıtılmış, değişkenler gösterilmiştir. Sonlu elemanlar tahmini, deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış, şekillendirilebilirlik sınır grafiği üzerinden yırtılma yüksekliğindeki durum irdelenmiştir.

Beşinci bölümde, tez içeriği ana hatlarıyla belirtilmiş, sonuçlar değerlendirilmiş ve sonraki çalışmalara öneri getirilmiştir.

BÖLÜM 2. SAC METALLERDE ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİK VE TANIMLANMASI

2.1. Giriş

Sac metallerde şekillendirilebilirlik; sac malzemenin belirli bir yük etkisi altında gerçekleştirebileceği şekil değiştirme kabiliyetidir. Şekillendirilebilirlik; malzemenin elastisite modülü, ısı iletkenliği, elektrik iletkenliği ve yoğunluk gibi temel ayırt edici özelliklerinden biri değildir. Bunun sebebi şekillendirilebilirliğin kalıp geometrisi, yüzeyde kullanılan yağlayıcı, form işlemin yapılma şekli, sac kalınlığı ve malzemeye bağlı olmasıdır. Otomotiv ve kalıp sektöründe farklı malzemeler, farklı kalınlıklar ve farklı geometriler kullanılarak, şekillendirilebilirliğin tespiti için çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalar son yıllarda yüksek mukavemetli çelikler (DP, Trip, vb.) üzerine yoğunlaşmaktadır.

Tez içerisinde bu çalışmalardan biri olan ve Amerikan Demir Çelik Enstitüsü (AISI - American Iron and Steel Institute) ile Otomotiv Çelik Ortaklığının (A/SP – Auto Steel Partnership) beraber çalışma sonucu ortaya koyduğu “Yeni Nesil Yüksek Mukavemetli Çeliklerin Şekillendirilebilirlik Karakteristiği” yaklaşımı söz konusu olacaktır. Bu yaklaşıma göre şekillendirilebilirliği etkileyen faktörler, tespit edilen şekillendirme parametresi üzerinden, çeşitli testler yapılarak bazı ölçütlerle bulunur. Bu yaklaşıma göre şekillendirilebilirliği etkileyen faktörler, tanımladığı şekillendirme parametresi üzerinden, çeşitli testler yapılarak bazı ölçütlerle bulunabilir (Tablo 2.1).

Bu bölümde tez içerisinde kullanılmış olan şekillendirilebilirlik ölçütleri, test yöntemleri, tespit edilen şekillendirilebilirlik parametreleri ve şekillendirilebilirliği etkileyen faktörler açıklanmıştır.

Tablo 2.1. Test yöntemlerinin şekillendirme üzerine etkisi [4]

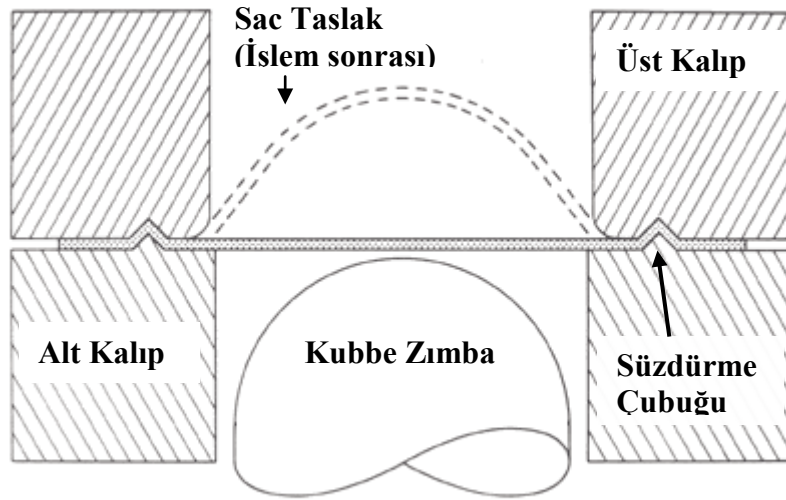
Şekillendirilebilirlik Ölçütü	Test Yöntemi	Tespit Edilen Şekillendirilebilirlik Parametresi	Şekillendirilebilirliği Etkileyen Parametreler (Faktörler)
Şekillendirme Limiti	100 mm. kubbe çekme testi	Şekillendirilebilirlik Sınır Eğrisi (ŞSE)	n – değeri, Kalınlık
Keskin – kenar gerdirmeye sınırları	Delik genişletme testi	Delik genişleme miktarı (%)	Çekme gerilmesi, ortalama r değeri
Bükme Altında Gerilme Sınırları	Açılı – bükme gerdirmeye testi	Yırtılma yüksekliği, gerdirerek bükülebilirlik gösterimi	Çekme gerilmesi, ortalama r değeri
Geri Esneme ve eğrilik	Kanal çekme testi	Geri esneme açısı, yan duvar eğrilik çapı	Akma gerilmesi, kalıp radüsü, süzdürme çubuğu gerdirmeye kuvveti, kalıp boşluğu
Germe Şekillendirilebilirliği	Silindirik (tava) çekme testi	Yırtılma yüksekliği	n – değeri, kalınlık
Germe Çekilebilirliği	Kare çekme testi	1) Yırtılma yüksekliği 2) Tutucu süre kontrolü 3) Gerininim ölçülmesi	Homojen uzama (ortalama r), taslak büyüklüğü, yağlama, kaplama, kalınlık

Tez içerisinde bu testlerden şekillendirme sınır eğrisinin (ŞSE) bulunmasında kubbe çekme testi değerleri; malzemenin mekanik davranışı bulunurken çekme testi kullanılmıştır. ŞSE ve çekme testi sonuçları benzetim testlerinde kullanılmıştır. Bu tez içerisinde benzetim testlerinden “kare çekme testi” üzerinden hesaplamalar ve karşılaştırılmalar yapılmıştır.

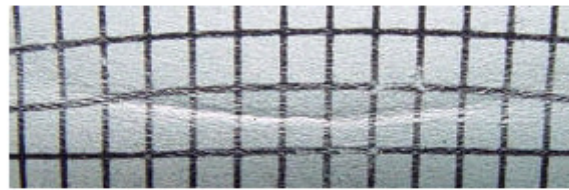
2.2. Kubbe Çekme Testi

Kubbe çekme testi; mühendislikte sac basma yöntemlerinde malzemedeki deformasyona göre yırtılma oluşacak bölgeyi öncelikli tespit etmede etkili ve basit bir yöntemdir [13]. Kubbe çekme testi, temelde bir benzetim testidir. Benzetim testi üzerinden şekillendirme sınır eğrisinin (ŞSE) bulunmasını sağlamaktadır. Şekillendirme sınır eğrisi bulmada en sık kullanılan testtir. Şekillendirme sınır eğrisi, kullanılan malzemenin şekillenebilme kabiliyetini bize gerininimler üzerinden veren bir eğridir. Bu eğrinin özelliği asal eksenlerdeki (taslak düzlemi üzerindeki) gerininimleri alarak, bunları iki boyutlu bir grafiğe yerleştirmesidir. Böylece şekillendirme sınır eğrisinin noktaları bulunur.

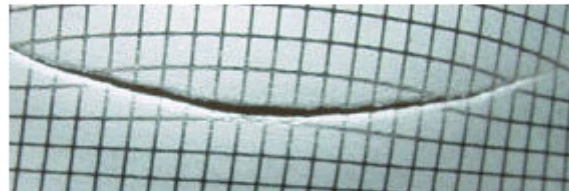
Kubbe çekme testinde düz sac (taslak), önce markalanır. Daha sonra markalanan sac, kalıp yerine yerleştirilir (Şekil 2.1). Yarım küre şeklinde zımbanın üzerine basılmasıyla taslak şekillenecektir. Bu şekil verme esnasında taslağın içeri akmasını engellemek için süzdürme çubuğu ile tutulur. Taslakta şekil değişirken, bazı bölgeler incelenecek ve yırtılacaktır (Şekil 2.2).



Şekil 2.1. Kubbe çekme testi [14].



Bölgesel boyun verme



Yırtılma

Şekil 2.2. Sac metalde yırtılmanın oluşması [15].

Tüm benzetim testlerinde, taslak önce markalanmaktadır. Bilgisayar teknolojileri gelişmeden önce markalama işlemi daireler çizilerek yapılıyordu, bilgisayar

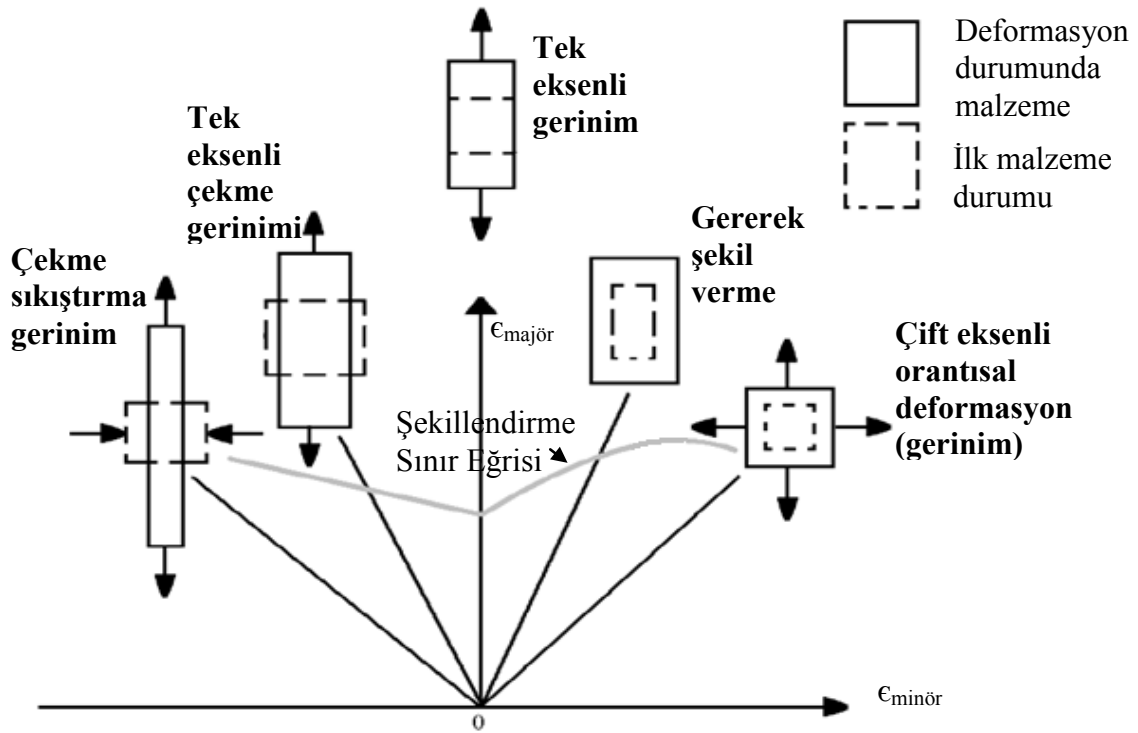
teknolojilerinin gelişmesinden sonra markalama işlemi kareler çizilerek yapılmaktadır. Markalama işleminden sonra, taslağa kubbe çekme testine uygulanır. Uygulama esnasında incelme ve yırtılmanın görüldüğü yerler kamera sistemi ile takip edilir (Şekil 2.3) ve şekillendirme sınır eğrisi üzerinde bir nokta bulunur. Bu işlem farklı boyutlarda taslaklar kullanılarak tekrar edilir (Şekil 2.4). Her taslak asal eksen grafiğinde (şekillendirme sınır grafiği) belirli bir noktayı temsil eder. Taslaklar şekil değiştirip yırtılma görüldükçe, şekillendirme sınır eğrisi üzerinde çeşitli noktalar belirlenir. Bu noktalar birleştirilerek şekillendirme sınır eğrisi (ŞSE) oluşur.



Şekil 2.3. Bilgisayar ve kamera ile kubbe çekme incelme sonuçlarının bulunması [16].

Kubbe çekme testinde kullanılan farklı geometrielerde taslaklar, şekillendirme sınır grafiğinde farklı bölümlerdeki şekillendirme sınır eğrisinin noktalarını tespit etmeyi sağlar (Şekil 2.5). Şekil 2.4 de isimlendirilmiş taslakların Şekillendirme Sınır Eğrisi üzerindeki bölgeleri Şekil 2.5 de gösterilmiştir. Burada majör gerinim, çift eksenli gerinim halinde ortaya çıkar ve genişleme söz konusu olur. Minör gerinimde ise bir eksen üzerinde genişleme olurken, diğer eksen üzerinde daralma olmaktadır.

düzlem zorlanma koşullarından izin verdiği şekillendirme miktarını gösteren bir malzeme eğrisidir. Şekillendirme sınır grafiği; şekillendirme işleminde yırtılma ve kopma koşullarının hangi bölgede olacağını kolaylıkla gösterimine izin verir. Çoğu sac metal şekil verme işlemlerinde deformasyon, çekme işlemiyle ortaya çıkar [16]. Şekil 2.5 'de görüldüğü gibi, taslak genişliği düşürüldükçe gerinim azalmakta, genişlik arttırıldıkça gerinim artmaktadır. Genişlik ile yükseklik birbirine yaklaştıkça germe işlemi ortaya çıkmaktadır (Şekil 2.6).



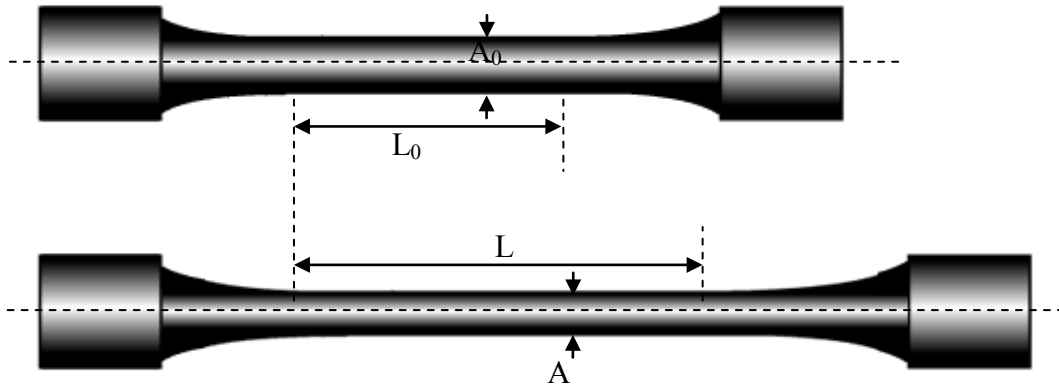
Şekil 2.6. Şekillendirme sınır grafiğinde çekme durumları [16].

Tez içerisinde AISI projesinin yaklaşımına göre genişlikleri 25.4 mm. den 177.8 mm. ye kadar olan 177.8 mm. uzunluğunda 6 farklı taslak kullanılarak şekillendirme sınır eğrileri bulunmuştur. Tüm şekillenen taslaklarda, incelen (boyun veren) bölge tanımlanmıştır. Kubbe çekme testi sonucu bulunan şekillendirme sınır eğrisi, pekleşme üssü (n) ve kalınlık üzerinden bulunmuştur.

2.3. Çekme Testi

Çekme testi, malzemenin temel özelliklerini verir. Bu testte statik bir yük tek eksenli olarak sabit hızda artan kuvvetle numune kopuncaya kadar çekilmesiyle uygulanır (Şekil 2.7). Çekmenin etkisiyle numune boyu artar. Numune boyunun artması, kesitte daralma meydana getirir. Burada değişken kesit alanı “A” ile gösterilirse, gerilme; uygulanan kuvvetin alana oranı olarak bulunur.

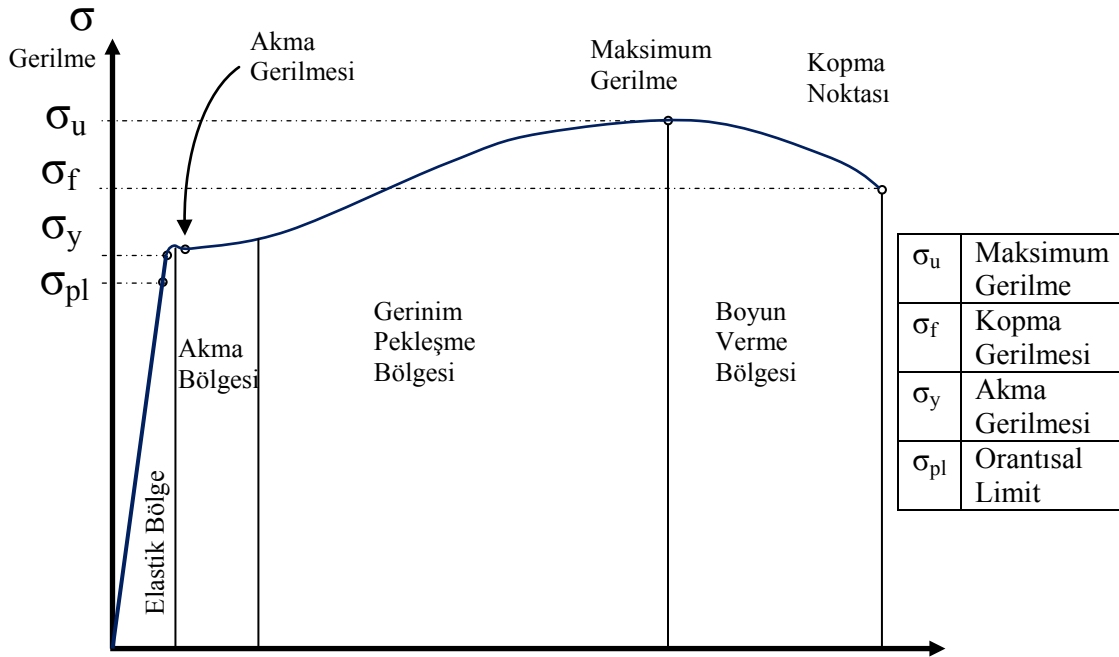
$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$



Şekil 2.7. Çekme test numunesinin başlangıç ve çekme durumu.

Burada “A”, uzama ile değişeceğinden, bulunan gerilme, gerçek gerilmedir. Yüklenen kuvvetin % 0.2 kadar numune boyunda değişiklik göstermesi, yük kaldırıldığında numunenin ilk boyu geleceğini gösterir. Bu bölge “Elastik Bölge” olarak adlandırılır. Kesit alan daralması, belli bir yük ve boya kadar homojen dağılım gösterir.

Burada; elastik bölge sonu ile homojen uzamanın bittiği bölge arasında kalan kısım “Pekleşme Bölgesi” dir. Homojen kesit daralması geçtikten sonra bölgesel daralma başlar ve boyun verme gerçekleşir. Daha sonra numune boyun verdiği bölgeden kopar. Pekleşme bölgesinin sonundan, kopma gerçekleşene kadar geçen bölgeye “Boyun Verme Bölgesi” olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 2.8. Tek eksenli çekme testi gerilme-gerinim eğrisi ve şematik gösterimi.

Gerilme – gerinim eğrisinde gerinim pekleşme bölgesi; “Pekleşme Yasası” veya “Hollomon Denklemi” olarak bilinen denklem;

$$\sigma = K \cdot \varepsilon^n \quad (2.2)$$

bağıntısı ile ifade edilmektedir. Burada;

σ = Gerçek plastik gerilme

K = Mukavemet katsayısı

ε = Gerçek plastik gerinim

n = Gerinim bekleşme üssü

Hollomon denklemi ile akma gerilmesinden, maksimum gerilmeye kadar olan bölgede (homojen uzama bölgesi) geçerlidir. Eğri oturtulduktan sonra plastik bölgedeki eğim “n” olur ve gerinim pekleşme üssü olarak bilinir. “K” ise mukavemet katsayısıdır (2.3) [3,14,15,18].

Anizotropi: Malzemenin farklı doğrultularda, farklı gerilme – deformasyon davranışı göstermesidir. Sac metaller haddelenirken, hadde yönüne göre değişkenlik gösteren mekanik özelliklere sahip olurlar. Anizotropi, sac şekillendirme işlemleri sırasında malzemenin incelmeye karşı gösterdiği dirençtir. Plastik birim şekil değiştirme değerlerinin oranı olan dikey anizotropi değeri (r) ile ölçülür. r değeri, çekme testindeki genişlik yönündeki gerçek uzama (ε_w) ile kalınlık yönündeki gerçek uzama (ε_t) oranıdır.

Bilindiği gibi madde şekil değiştirirken hacim sabittir. Bundan görünen;

$$\omega_0 \cdot l_0 \cdot t_0 = \omega \cdot l \cdot t \quad (2.4)$$

Sac ölçüleri ve değişimlerine göre gerinimler aşağıdaki gibi bulunur;

$$\varepsilon_t = \ln \frac{t}{t_0} \quad , \quad \varepsilon_w = \ln \frac{\omega}{\omega_0} \quad , \quad \varepsilon_l = \ln \frac{l}{l_0}$$

Anizotropluk (r) değeri;

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} = \frac{\ln \frac{\omega}{\omega_0}}{\ln \frac{t}{t_0}} \quad (2.5)$$

r değeri – sac metalde kalınlığa karşı gösterilen direnç ölçülmesinde önemlidir. Bu; sac şekil alırken kalınlık ve kırışmaya karşı gösterilen direnç özelliğini belirtir. Kırışma gerinim yoluyla etki eder.

Sac metallerde hadde yönünde, hadde yönüne dik ve hadde yönüne 45° açı yapacak şekilde üç farklı anizotropi değeri bulunur. Bunlar hadde yönünde (r_0), hadde yönüne 45° açı yerinde (r_{45}) ve hadde yönüne dik doğrultuda (r_{90}) olmaktadır. Anizotropik parametre “ r ” genelde % 15 uzama miktarı olduğunda alınır. Haddelenmiş sacların

yönlere bağlı mekanik özellikleri farklı olduğundan, farklı yönlerde ölçülen r değerlerinin ortalaması, ortalama anizotropik katsayı (ortalama r değeri), “R” olarak tanımlanır ve

$$R = \frac{r_0 + 2 \cdot r_{45} + r_{90}}{4} \quad (2.6)$$

şeklinde bulunur. Burada;

r_0 = Hadde yönündeki anizotropi katsayısı

r_{90} = Haddeye dik yöndeki anizotropi katsayısı

r_{45} = Hadde yönüyle 45° açı yapan anizotropi katsayısıdır.

Ortalama r değeri arttıkça sacların derin çekme kabiliyeti de artar.

2.4. Şekillendirme Benzetim Testleri

Şekillendirme benzetim testleri, temel mekanik davranış testleri ve kubbe çekme testinin sonuçlarından gelen verilerin kullanılması ile daha karmaşık kalıp kullanılarak yapılan testlerdir.

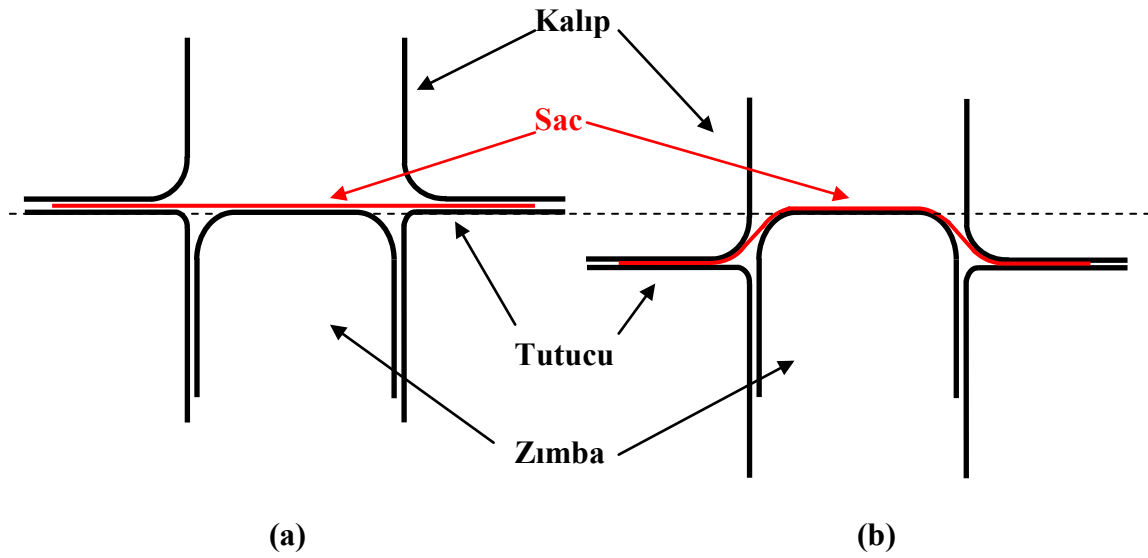
Şekillendirme benzetim testlerinde sonuçları; yağlamaya (sürtünmeye), kalıp geometrisine, kalınlığa, malzeme davranışına ve işlemin yapılma şekline bağlı olarak değişir. Şekillendirme benzetim testleri kare çekme testi, kubbe çekme testi, tava çekme testi, kanal çekme testi vb. testlerdir.

BÖLÜM 3. KARE ÇEKME TESTİ VE TRIP MALZEME İÇİN KARE ÇEKME SONUÇLARI

Malzemelerin şekillendirilebilirliğini etkileyen faktörleri incelemek için, farklı şekillerdeki benzetim testleri uygulanmaktadır. Bu testler; kubbe çekme, u kanal çekme, v bükme ve kare çekme gibi testlerdir. Bu testler, basitleştirilmiş form verme işlemleridir ve şekillendirilebilirlik kabiliyetini ölçer. Bu bölümde Trip malzemesi için kubbe çekme testinden gelen şekillendirme sınır eğrisi (ŞSE) ve çekme testinden elde edilen mekanik özellikler verilecektir. Trip malzemesine kare çekme testi yapılmıştır ve test sonuçları irdelenmiştir.

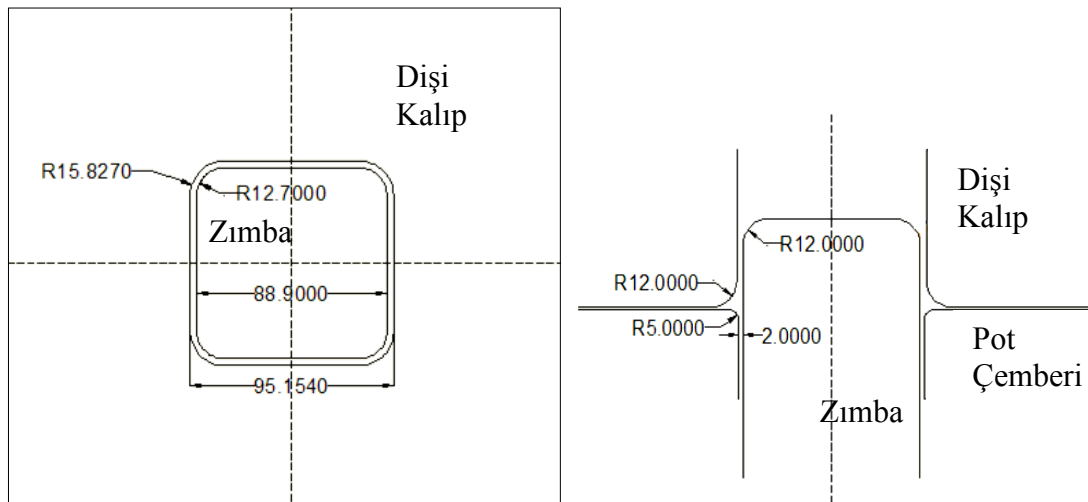
3.1. Kare Çekme Testi

Kare çekme; sac metallerin çekme gerilmesi altında şekillendirilebilme kabiliyetini test eder. Bu testin amacı, farklı sac açınımlı çeliklerin şekillendirilebilirliğini karşılaştırmaktır. Çeliğin mekanik özelliklerinin (tabaka türü, yağlama, tutucu basıncı, kalıp geometrisi ve sac açınım ölçüleri, vb.) şekillendirilebilirliği etkilediği bilinmektedir. Kare çekme testinde kalıp takım geometrisi üç parçadan oluşmaktadır. Bunlar zımba, tutucu ve kalıptır. Başlangıçta üst tarafta zımba, ortada sac açınım; sac açınım altında sacı tutan tutucu ve şekillendirmeyi sağlayan zımba bulunur (Şekil 3.1a). Temel şekillendirme elemanları kalıp ve zımbadır. Kalıp harekete başladığı anda tutucu alttan devreye girer ve sac açınımı belirli kuvvette tutar. Bu işlem kısa sürede gerçekleşir. Kalıp ve tutucu arasındaki sac, zımba yüzeyine temas eder ve çekme işlemi başlar (Şekil 3.1b). Belirli bir çekme miktarından sonra işlem sona erer. Burada çekme miktarı sacın boyun verdiği veya yırtıldığı andaki strok mesafesidir. Test esnasında kalıp belirli hızda hareket eder ve tutucu belirli bir kuvvette sac açınımı tutar. Tutucu kuvveti 94 kN dur.

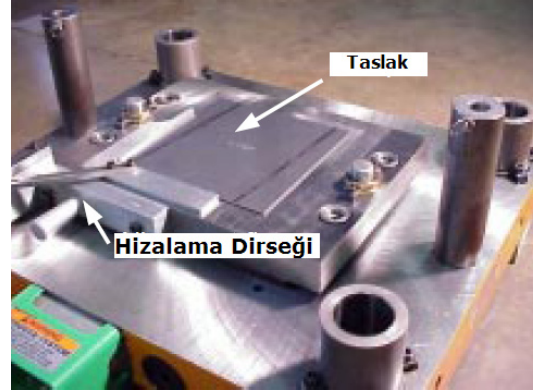


Şekil 3.1. Kare çekme şematik gösterimi (a) Kare çekme referans konumu
(b) Kare çekme işlemindeki konum

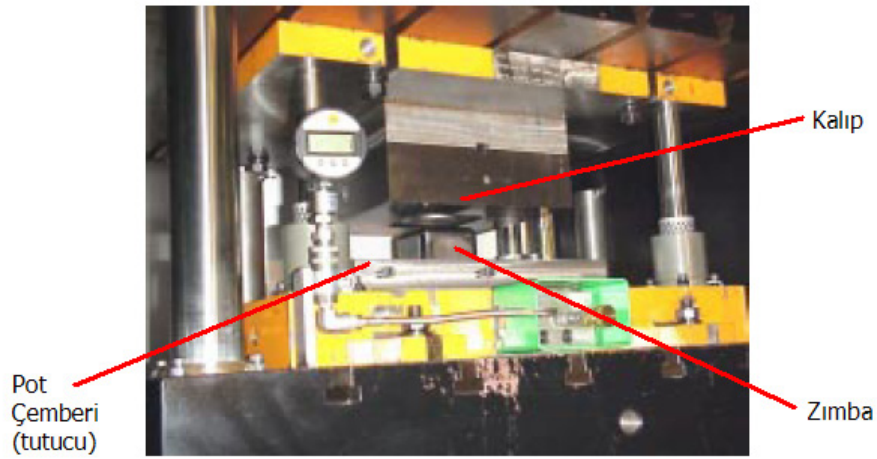
Kare çekme işleminde kullanılan zımba, kalıp ve tutucunun yüzey ölçüleri Şekil 3.2’ de verilmiştir. Kare çekme işlemi öncesinde sac “L” şeklinde dirseğe dayandırılmıştır ve hizalama yapılmıştır (Şekil 3.3). Kare çekme işleminde yağlayıcı olarak “Ferracote® 61 MAL HCL 1” kullanılmıştır [4]. Kalıp takımının geometrisi ve ölçüleri Şekil 3.2 de verilmiştir.



Şekil 3.2. Kare çekme yüzey ölçüleri



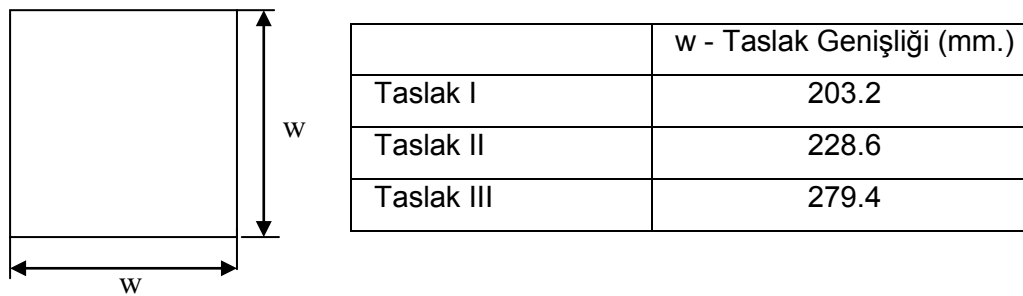
Şekil 3.3. Sacın Hizalanması [4].



Şekil 3.4. Kare çekme işleminde kalıp takımı [4].

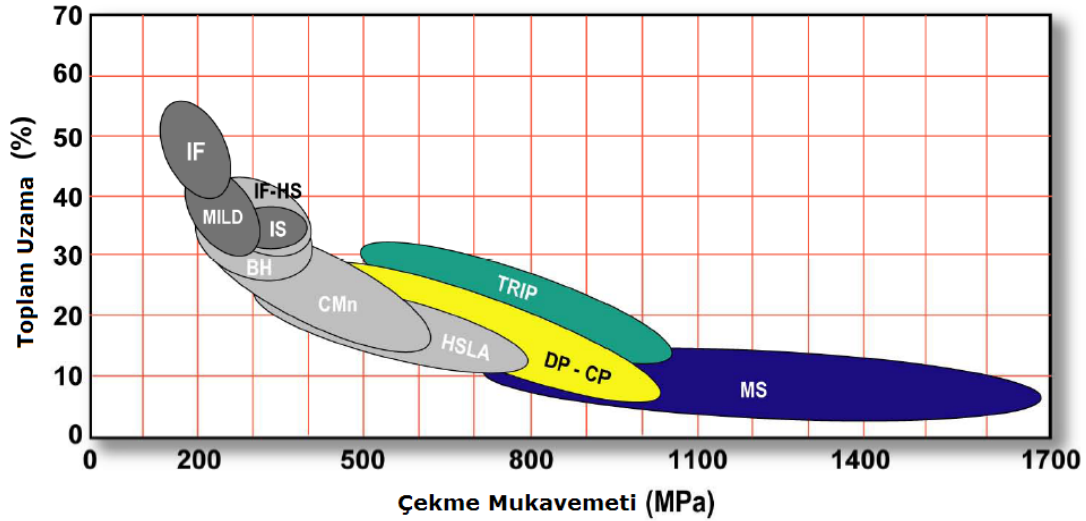
3.2. Sac Açınım Özellikleri

Kare çekme testi için üç farklı sac açınım kullanılmıştır. Bu açınımlar “Taslak” adını almaktadır. Kullanılan taslaklar kare biçimindedir. Kare taslakların kalınlığı 1.4 mm. dir ve ölçüleri şekil 3.5 de gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Kare çekme testi için göre tanımlanan taslakların genişlik ölçüleri

Kare çekme işleminde kullanılan taslak malzemesi Trip'dir. Taslak kalınlığı 1.4 mm.' dir. Trip600 malzemesinin gösterimindeki "600", çekme mukavemetidir. TRIP kelimesi "Transformation Induced Plasticity" kelimesinin baş harflerinden gelmektedir. Trip çeliğinin yapısındaki östenit faz, deformasyon etkisiyle martenzit çeliğe dönüşür. Trip çeliklerinin tipik kimyasal kompozisyonları % ağırlıkça Fe, 0.15-0.4C, 1-2Mn, 1-2Si'dir [5,9,10,11,19]. Pekleşme kabiliyeti yüksektir. Fırında sertleşme yeteneği vardır. Şekillendirilebilirliği ve akma gerilmeleri yüksektir. Bu yüzden karmaşık parçalarda kullanıma uygundur. Trip malzemesi aynı çekme gerilmesinde, çift fazlı çeliklere (DP) göre iki kat fazla uzayabilmektedir (Şekil 3.6).

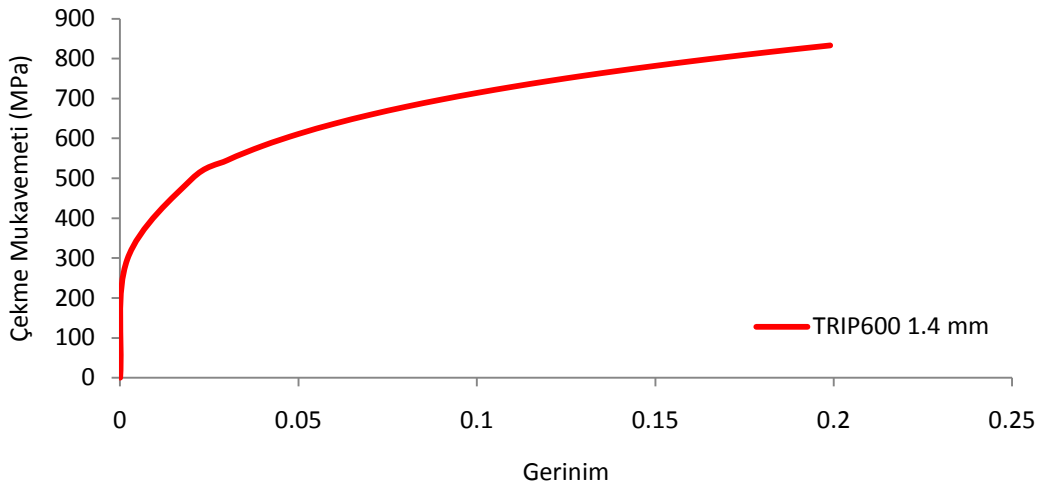


Şekil 3.6. Çeliklerin çekme mukavemeti – uzama grafiği [20].

Trip600 malzemesinin akma mukavemeti, çekme mukavemeti, homojen uzama, toplam uzama, gerinim pekleşme üssü ve mukavemet katsayısı çekme testinden bulunmuştur (Tablo 3.1) ve çekme eğrisi hazırlanmıştır (Şekil 3.7).

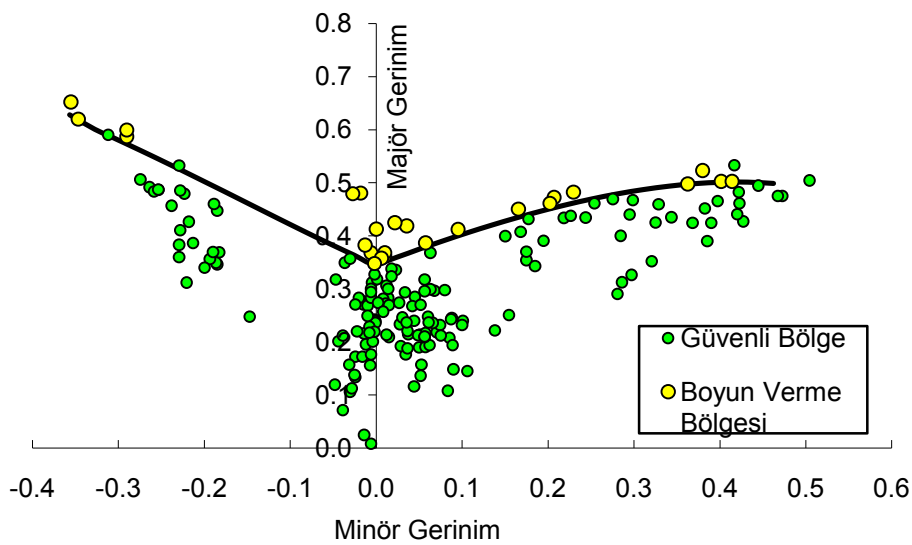
Tablo 3.1. Trip600 1.4 mm. malzemesinin mekanik özellikleri [4]

Akma Mukavemeti (MPa)	Mukavemet Katsayısı K (MPa)	Pekleşme Üssü n	Ortalama Anizotropik katsayı r-bar	Homojen Uzama (%)	Toplam Uzama (%)
439	1196.18	0.2242	0.930	19.90	28.60



Şekil 3.7. Trip600 malzemesi için Hollomon denklemine göre çekme eğrisi

Trip600 malzemesinin şekillendirme sınır eğrisi kubbe çekme testiyle bulunmuştur. Kubbe zımbasının çapı 101.6 mm. dir. Genişlikleri 25.4 mm. den 177.8 mm. ye kadar olan 177.8 mm. uzunluğunda 6 farklı taslak kullanılarak şekillendirme sınır eğrileri bulunmuştur. Yüzeyle zımba arasında temas eden yüzeyde gemi yağı kullanılmıştır. Boyun verme bölgeleri tanımlanmış ve markalama sonucu bilgisayar yardımıyla ölçülerek asal gerinimler bulunmuştur. Bu gerinimlere göre ŞSE hazırlanmıştır. Şekil 3.8’ de kubbe çekme testleri sonucunda ortaya çıkan şekillendirme sınır eğrisi ve şekillendirme sınır grafiği gösterilmiştir.

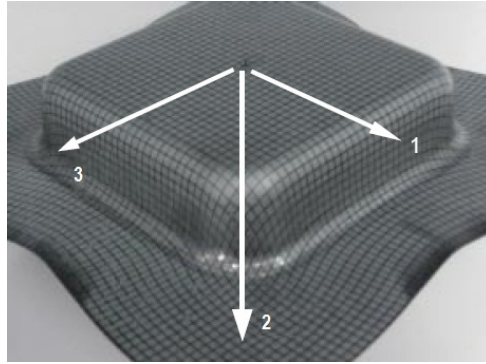


Şekil 3.8. Trip600 için kubbe çekme testi sonucu oluşan ŞSE ve ŞSG [4]

3.3. Kare Çekme Testi Sonuçları

Gerinim dağılımları ve kalınlıklar Taslak I de 25.4 mm. strok mesafesinde ölçülmüştür. 25.4 mm. yer değiştirmeden sonra çekme işlemine devam edilerek yırtılmanın görüldüğü anda strok mesafeleri belirlenmiştir.

Gerinim ölçümleri kare markalama yöntemi kullanılarak, bilgisayar yardımıyla ölçülmüştür. Gerinim dağılımları üç kesitte ölçülmüştür. 1. Çizgi haddeleme yönünde, 2. Çizgi diagonal yönde (haddeleme doğrultusuna 45° lik açı yapacak şekilde) ve 3. Çizgi haddeleme doğrultusuna dik yönde alınmıştır (Şekil 3.9).

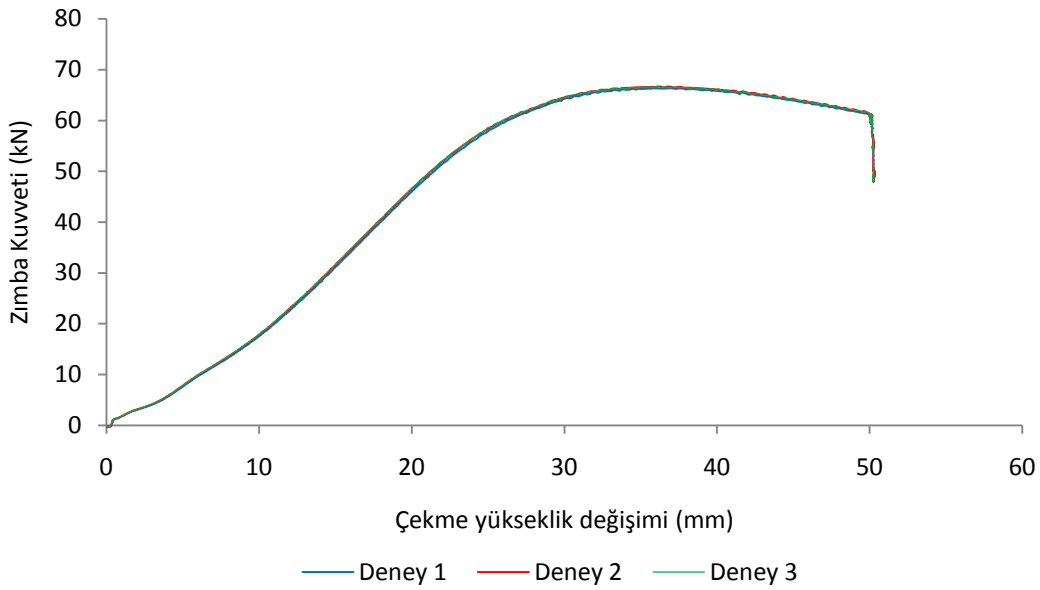


Şekil 3.9. Gerinimlerin ölçümlerinin yapıldığı yönler ve kare markalama yapılmış taslak fotoğrafı [4]

DeneySEL verilerde zımba kuvveti ve yırtılma yükseklikleri üç taslakta ölçülmüştür ve tekrarlanabilirliğin yüksek olduğu görülmüştür. Bu deneyin güvenilirliğini arttırmaktadır. Buna göre asal gerinimler, kalınlık gerinimi ve sac kalınlıkları sadece Taslak I de ölçülmüştür. DeneySEL veriler toplanırken, taslak merkezi orjin kabul edilmiştir ve kesit sonuçları buna göre değerlendirilmiştir.

3.3.1. Zımba kuvvet sonuçları

Taslak I için; 3 kere yapılan deney sonucu oluşan kuvvet – çekme yükseklik değişimi Şekil 3.10’ de gösterilmiştir. Burada yapılan 3 ayrı deneyde de kuvvet – çekme yükseklik değişimi üstüste oturmuştur. Bu gerinim, kalınlık ve yırtılma yüksekliklerini doğrulamaktadır.

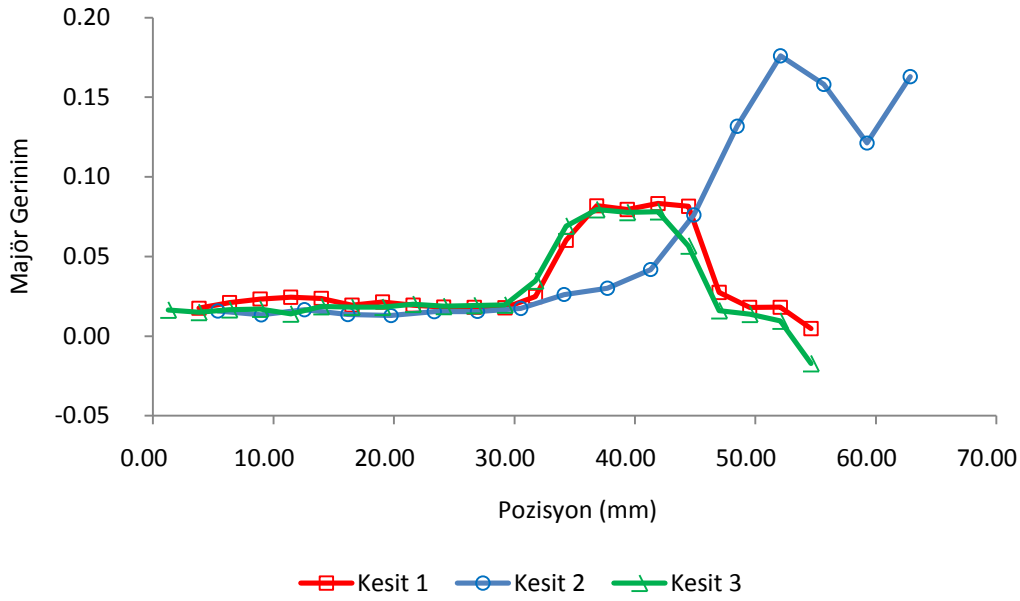


Şekil 3.10. Taslak I, zımba kuvveti – çekme yükseklik değişim grafiği [4]

Kuvvet – çekme yükseklik değişim grafiği incelendiğinde 3 bölgeden oluştuğu görülmektedir. 15 mm. strok mesafesine kadar yükselen eğimle kuvvet artışı, 15 mm. ile 35 mm. arasında azalan eğimli kuvvet artışı görülmektedir. Son bölüm ise 35 mm. den sonra kuvvette azalma görülmektedir.

3.3.2. Majör gerinim sonuçları

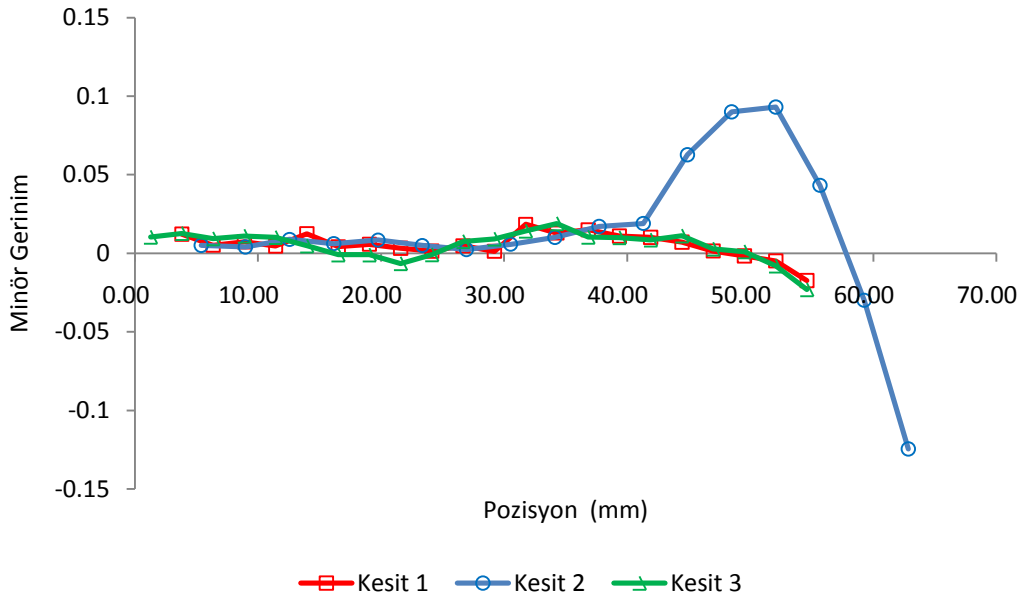
Majör gerinimler, sac üzerine markalanan daireler yüklemeye elips halini alırken boyları uzamaktadır. Bu uzamayla majör gerinimler ortaya çıkar. Uzama pozitif olduğundan sonuçlar her zaman pozitif çıkmaktadır. Kare çekmede taslak 25.4 mm. çekildikten sonra alınan majör gerinimler, kesit 1 ve kesit 3 için zımbanın çap oluşturan bölgesinde (44.51 mm.) görülmektedir (Şekil 3.11). Kesit 2' de ise majör gerinimlerin zımbanın omuz bölgesinde (62 mm.) majör gerinim artışı gözlenmiştir. Zımbanın uç kısımlarına gelen bölgelerde majör gerinimlerin artması beklenen bir durumdur. Buralarda daireler uzamıştır.



Şekil 3.11. Üç kesitte bulunan majör gerinim / pozisyon grafiği [4]

3.3.3. Minör gerinim sonuçları

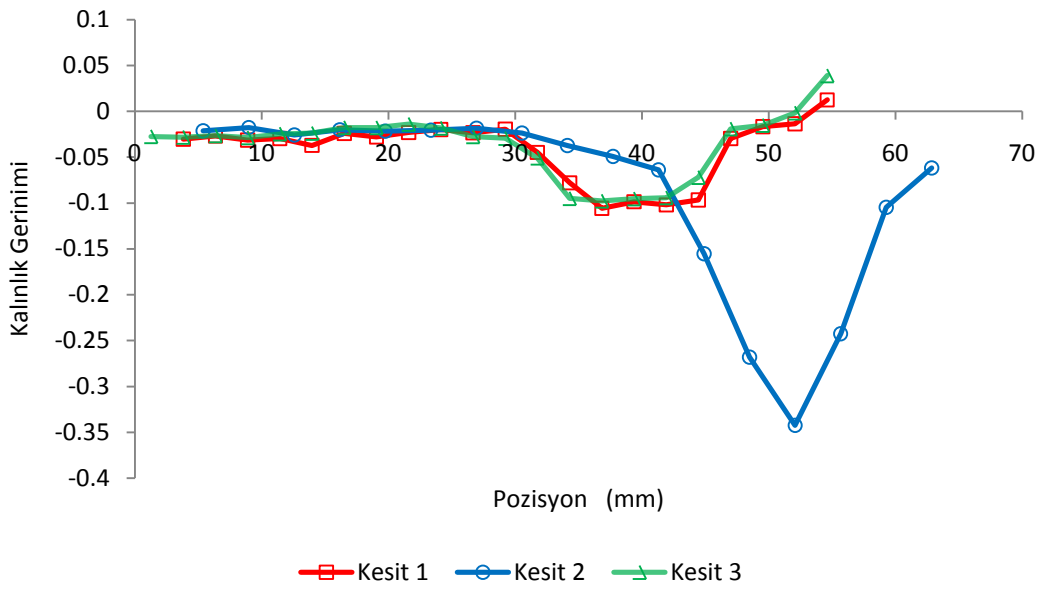
Minör gerinimler, sac üzerinde markalanan dairelerin elips halini aldıktan sonra çaplarının daralmasıyla ortaya çıkabileceği gibi, iki eksenli orantısız gerinim durumunda çapta genişleme olabildiğinde de ortaya çıkabilir. Burada dairelerin çapındaki daralma belli bir noktadan sonra kırışmalara sebep olmaktadır. Kesit 1 ve kesit 3' de majör gerinimlerdeki değişimin az olmasından dolayı, minör gerinimlerde değişim fazla gözlenmemiştir. Kesit 2 de ise, minör gerinim zımba omuz bölgesinde (orjinden 62 mm. uzaklıkta) artmıştır. Bu bölgede majör gerinimde de artma meydana gelir ve çift eksenli orantısız gerinim oluşmuştur. Omuz bölgesinin altında minör gerinimler markalama dairelerinde daralma meydana getirecek şekilde değişmiştir. Omuz bölgesi altında minör gerinimler negatif olmuştur (Şekil 3.12).



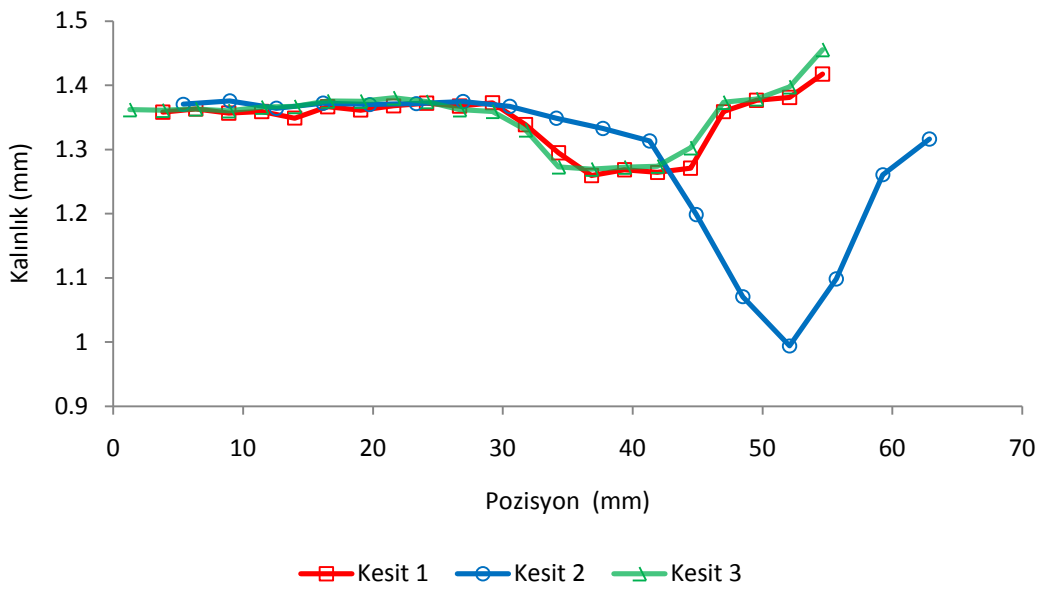
Şekil 3.12. Üç kesitte minör gerinim / pozisyon grafiği [4]

3.3.4. Kalınlık gerinim ve kalınlık dağılım sonuçları

Şekil değişikliği taslağın kalınlığında değişmek olmaktadır. Burada kalınlığı değişmiş taslağın son kalınlığından ilk kalınlığını çıkartıp, ilk kalınlığa bölerek kalınlık gerinimi bulunur. Burada sacın omuz verdiği bölgede kalınlığın düşmesi beklenir. Bunun sonucunda kalınlık gerinimi de düşecektir. Kesit 1 ve kesit 3 de 40 mm. pozisyon civarında majör gerinimde artma, aynı kesitlerdeki aynı bölgelerde sac kalınlığını azaltmakta ve kalınlık gerinimini düşürmektedir. Kesit 2 de, 50 mm. pozisyonda çift eksenli orantısal gerinim olması, bu bölgedeki kalınlığın en düşük olacağı yeri göstermektedir. Kalınlığın azalması da kalınlık geriniminin düşeceğini göstermektedir (Şekil 3.13, Şekil 3.14).



Şekil 3.13. Üç kesitte kalınlık gerinimi / pozisyon grafiği [4]



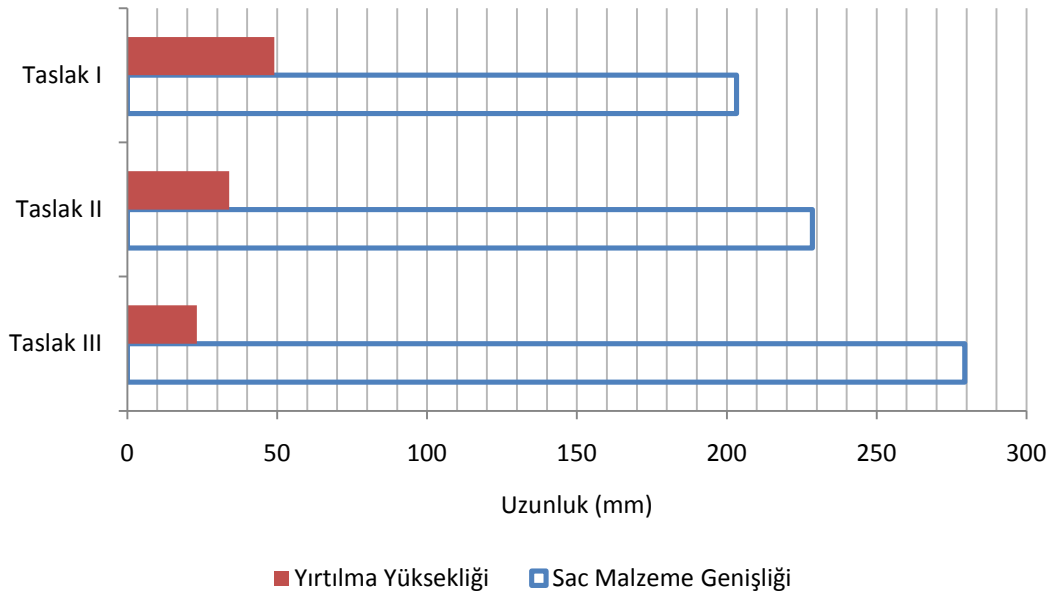
Şekil 3.14. Üç kesitte kalınlık / pozisyon grafiği [4]

3.3.5. Yırtılma yüksekliği sonuçları

Taslak I de Trip600 malzemesinin kare çekme işleminde sac açınım genişliği 203.2 mm. dir. Aynı malzeme, Taslak II ve Taslak III de sac genişliği arttırılmıştır. Taslak II; 228.6 mm. ve Taslak III; 279.4 mm. sac genişliğine sahiptir. Sac malzemelerinin kalınlıkları 1.4 mm dir.

Kare çekme sonucunda taslaklara göre yırtılma yükseklikleri Tablo 3.2 de verilmiştir. Bu tabloya göre taslak genişliği arttıkça yırtılma yüksekliğinin azaldığı görülmüştür. Taslak I de yapılan 3 test sonucunda herhangi bir sapma olmamıştır. Taslak II de 0.01 mm. kadar yırtılmada sapma görülmüş, Taslak III ise yırtılmadaki sapma 0.02 mm. olarak bulunmuştur.

Tablo 3.2. Sac ölçülerine göre yırtılmanın görüldüğü yükseklikler [4]

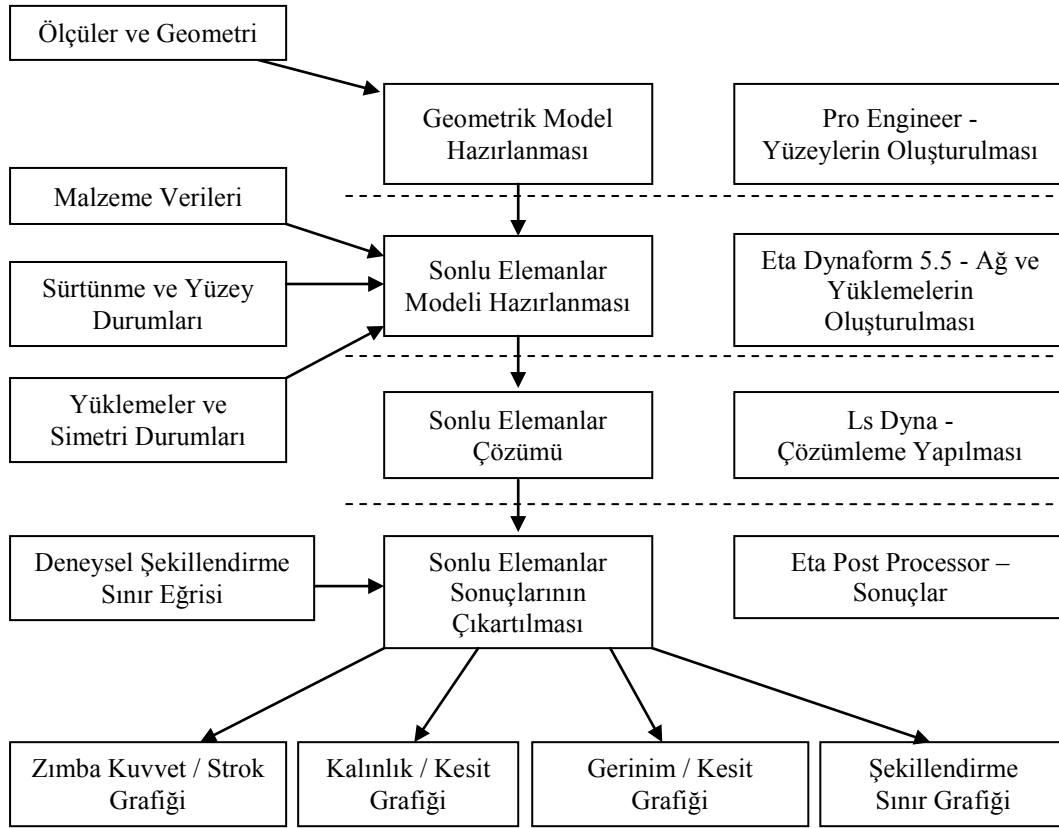


BÖLÜM 4. KARE ÇEKME TESTİNİN SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Bu bölümde; Bölüm 3’ de açıklanan kare çekme işleminin sonlu elemanlar modelleri ve çözüm sonuçları verilecektir. Öncelikle deneyin benzetimi için Pro Engineer yazılımı kullanılarak geometrik model hazırlanmıştır. Model üzerinde simetri şartları bulunduğundan, gerçek kalıbın $\frac{1}{4}$ ’ i modellenmiştir. Hazırlanan model üzerinde Eta Dynaform 5.5 yazılımı ile sonlu elemanlar ağı oluşturulmuştur ve gerekli yüklemeler yapılmıştır. Hazırlanan sonlu elemanlar modeli Ls – Dyna yazılımı ile çözülmüştür. Analiz sonuçlarını etkileyen model değişkenleri; ağ yapısı hassasiyeti, çekme hızı ve sac açınım boyutları olarak ele alınmıştır. Sonlu elemanlar uygulamalarında genel bir prosedür söz konusudur (Şekil 4.1). Buna uygun olarak adım adım ilerlenmiştir. Deney verileri, taslak I’ de; zimba kuvveti, asal gerinimler, kalınlık ve yırtılma yüksekliğidir. Sonlu elemanlar modeli ile deney verileri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonucu deneysel verilere en yakın sonuç veren model belirlenmiştir. Belirlenen modele göre şekillendirme sınır grafiği incelenmiştir ve sonuçları irdelenmiştir.

4.1. Modelleme

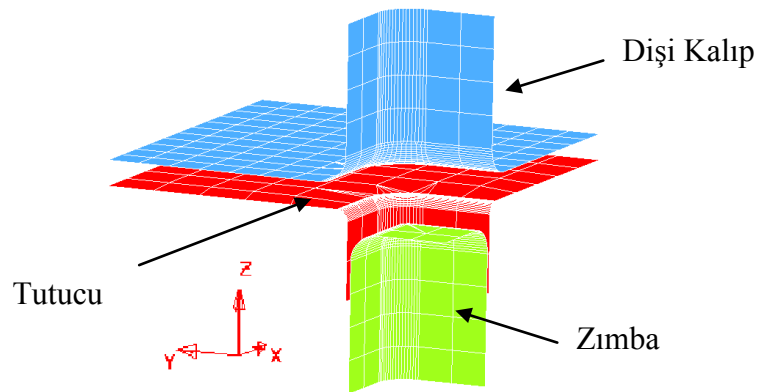
Kalıp modeli; Bölüm 3’ de verilen değerler ile Pro/Engineer yazılımıyla hazırlandı. Model hazırlanırken kabuk (yüzey) modelleme kullanıldı ve “Iges” formatında kaydedildi.



Şekil 4.1. Şekillendirmenin sonlu elemanlar yöntemi ile yapılması

4.1.1. Ağ yapısı

Sonlu elemanlar yönteminde model, ağ yapısından oluşmaktadır. Ağ yapısı hazırlamak için “Iges” formatında kaydedilen yüzey modeli; Eta Dynaform programına aktarıldı. Aktarılan model üzerinden ağ yapısı hazırlandı [21] (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. Ağ yapısı oluşturulmuş kalıp takımı

4.2. Modellerin Tanımlanması

Şekillendirme işlemine etki eden çok sayıda parametre bulunmaktadır. Bunlar tutucu kuvveti, çekme (şekillendirme) hızı, yağlama (sürtünme katsayısı), vb. değişkenlerdir. Bilgisayar ortamında bu değişkenlerin yanında ağ modelide değişkenlere eklenmelidir. Ağ modelinde eleman sayısının artması, hassasiyeti arttırmaktadır. Tez içerisinde kullanılan taslak I için farklı modeller hazırlandı. Bu modellerde değişkenler ağ yapısı ve çekme hızıdır.

Taslak I kullanılarak, iki farklı değişkenle, üç farklı model elde edilmiştir (Tablo 4.1). Burada farklı sayısal analiz durumları “Model” ön adlandırılması ile numaralandırıldı.

Tablo 4.1. Taslak I için hazırlanan modeller ve değişkenleri

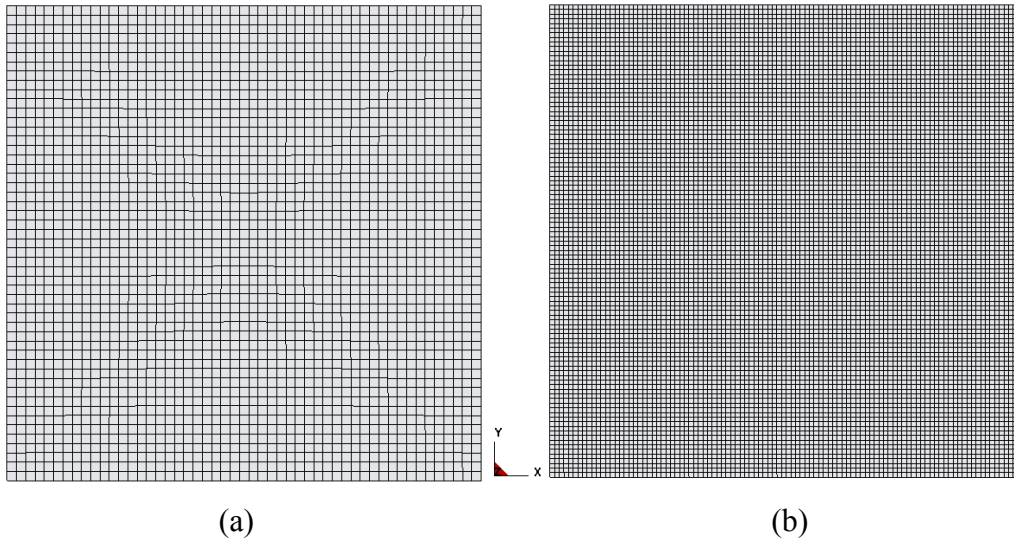
Model	Eleman Büyüklüğü (mm)	Kalıp Hızı (mm/sn)
Model 1	2 mm	2000 mm/sn
Model 2	2 mm	100 mm/sn
Model 3	1 mm	100 mm/sn

Model 1’ de; Sac açınım eleman büyüklüğü 2 mm. genişliğinde ve kalıp hızı 2000 mm/sn alınarak çözümlenme yapılmıştır. Model 2’ de ise; hız değişkeninin etkisini gözlemek için kalıp hızı 100 mm/sn ‘ ye düşürülmüştür. Model 3’ de ise; kalıp hızı 100 mm/sn alınmış fakat sac açınım eleman büyüklüğü 1 mm. genişliğine düşürülmüştür. Böylece hem hız, hem ağ yapısının etkisi görülmüştür.

Taslak I için iyileştirmeler yapılarak hazırlanan modeller, deneysel veriler ile karşılaştırılıp en uygun sonucu veren model belirlendi. Bu model kullanılarak şekillendirme sınır grafikleri çıkartıldı.

4.3. Sac Taslak Özellikleri

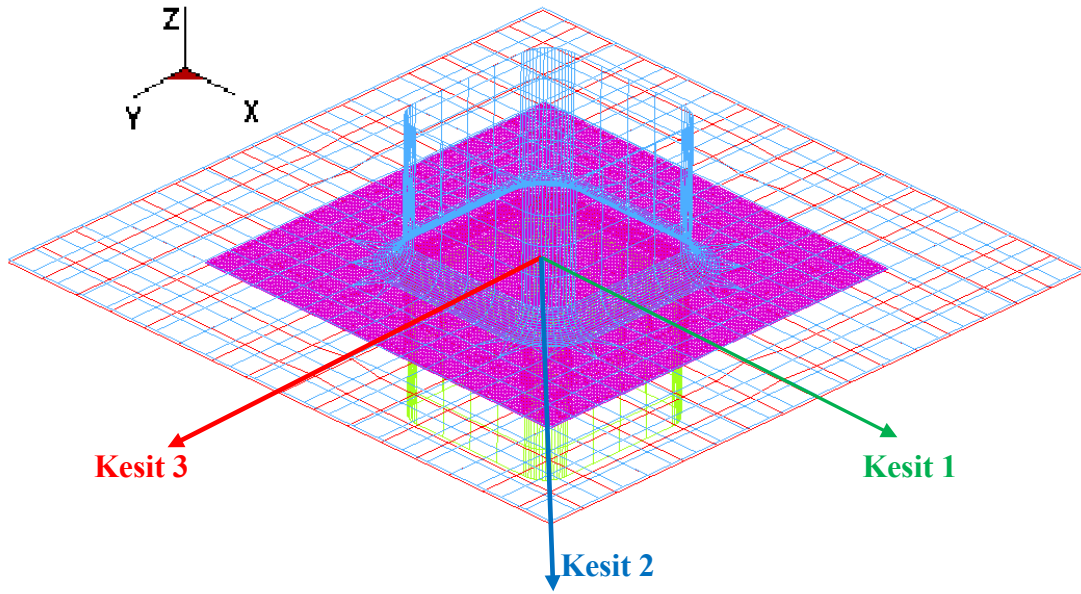
Bilgisayar ortamında taslak I' de 2 farklı sac yüzey modeli hazırlandı. Bu yüzey modellerinin tek farkı ağ yapılarıdır. Model 1 ve model 2 için 2 mm. genişliğinde ağ yapısı kullanılmıştır (Şekil 4.3a) ve eleman sayısı 2601 dir. Model 3 için ise 1 mm. genişliğinde ağ yapısı kullanılmıştır (Şekil 4.3b) ve eleman sayısı 10404 dür. Kullanılan sac açınımlar kare şeklindedir.



Şekil 4.3. (a) Taslak I; model 1 ve model 2 için sac açınım ağ yapısı.
(b) Taslak I; model 3 için sac açınım ağ yapısı

Deney modellerinde simetri şartları vardır. Bu simetri şartlarına uygun olarak çözümlenecek model XZ ve YZ düzlemlerinde ortadan kesilmiştir. Böylece $\frac{1}{4}$ lük bir model ortaya çıkmıştır. Bu işlem ve sonlu elemanlar çözümlene süresini kısaltmaya yönelik yapılmıştır. Bunun yanında simetri şartları olduğu için herhangi bir hata oluşmayacaktır. Buna göre sınır koşulları tanımlanmıştır.

Sonuçlar alınırken belli kesitler öngörülmüştür. Kesit 1, haddeleme yönünde, kesit 2, diagonal yönde (haddeleme doğrultusuna 45° lik açı yapacak şekilde) ve kesit 3, haddeleme doğrultusuna dik yönde alınmıştır (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. Sonuçların alındığı kesitlerin gösterilmesi

4.3.1. Sac malzeme özelliklerinin bilgisayar ortamına aktarılması

Ls – Dyna çözücüsün yapılacak işlemleri ve özellikleri okuduğu dosya, ASCII dosyadır. Bu dosyada malzeme özellikleri, yüzey özellikleri, yüklemeler, parçaların tanıtılması, sonlu elemanlar kontrol özellikleri ve simetri koşulları gibi değişkenler bulunmaktadır. Bu dosya içerisinde malzemenin özelliklerinin bulunduğu satırlar “Malzeme Kartı” olarak adlandırılır. Malzeme kartı, seçilen malzeme modeline göre değişik özellikler istemektedir. Malzeme kartına seçilen malzeme modelinin istediği veriler girilir [22]. Tez içerisinde kullanılan malzeme modeli “Mat Transversely Anisotropic Elastic Plastic” dir. Bu malzeme modeli, sac metal şekillendirme işlemlerindeki anizotropik malzemelerde kullanılır. Sadece çapraz anizotropi dikkate alınır. İsteğe göre gerilme, efektif plastik gerilme - gerinim eğrisi tanımlanabilmektedir. Bu malzeme modelinde pekleşme üssü ve mukavemet katsayısı kullanılabilir. Trip600, 1.4 mm kalınlık için malzeme özellikleri için tablo 3.2 kullanılmıştır.

*MAT_TRANSVERSELY_ANISOTROPIC_ELASTIC_PLASTIC

\$MATERIAL NAME:TRIP600_1.4mm

\$	MID	RO	E	PR	SIGY	ETAN	R	HLCID
	1	7.830E-09	2.070E+05	2.800E-01	4.390E+02	1.196E+03	9.300E-01	1

Yukarıdaki malzeme kartında görülen kısaltmalar açıklanacak olursa;

- Yoğunluğu (RO) = 7850 kg/m³
- Elastisite Modülü (E) = 207 GPa
- Poisson Oranı (PR) = 0.28
- Akma Gerilmesi (SIGY) – Tablo 3.2 = 439 MPa
- Mukavemet Katsayısı, K (ETAN – Tablo 3.3) = 1196.18
- Ortalama r değeri, (R – Tablo 3.2) = 0.930
- Ludvik Hollomon Eğri Değerleri (HLCID – Şekil 3.6) = Eğri No:1

Malzeme modeli üç eksenli gerilme ortamında

$$F(\sigma) \equiv \left[\begin{aligned} &\sigma_{11}^2 + \sigma_{22}^2 + K^2 \sigma_{33}^2 - K^2 \sigma_{33} (\sigma_{11} + \sigma_{22}) - (2 - K^2) \sigma_{11} \sigma_{22} \\ &+ 2L \sigma_y^2 (\sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2) + 2 \left(2 - \frac{1}{2} K^2 \right) \sigma_{12}^2 \end{aligned} \right]^{\frac{1}{2}}$$

şeklinde fonksiyona bağlıdır. Burada;

$$K = \frac{\sigma_y}{\sigma_{y3}} \quad \text{ve} \quad L = \frac{3}{2\sigma_y^2} \quad \text{dir [23].}$$

Malzeme özellikleri tanımlandıktan sonra, Taslak I' in ağ yapısının formülasyonu gerekmektedir. Bunun için model eleman formülasyonu olarak kullanılan kart "Section Shell" dir [23]. Kabuk kesit (Section Shell) kartında elemanların formülasyonu ve kesit yönünde kullanılacak enterpolasyon noktalarını tanımlar.

Ağ formülasyonu için kart aşağıdaki gibidir;

*SECTION_SHELL

\$PROPERTY NAME:blankpro

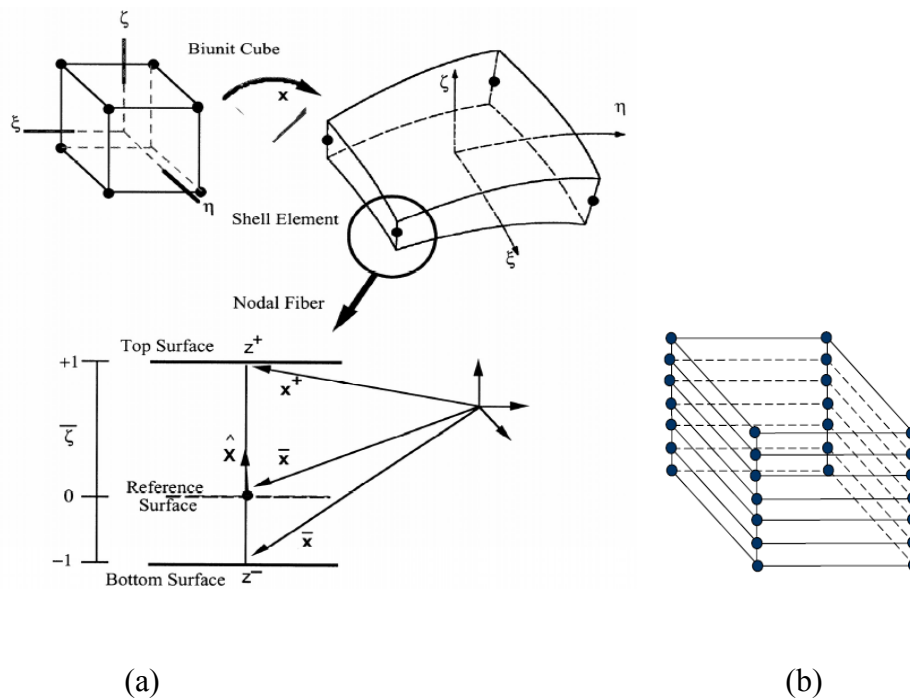
\$	SID	ELFORM	SHRF	NIP	PROPT	QR/IRID	ICOMP
	2	1	0.833E+00	5.0	1.0	0.0	

- Eleman formülasyon seçeneği (ELFORM) = 1 (Hughes-Liu)
- Kayma düzeltme faktörü (SHRF) = İzotropik malzeme için 0.833

- Kesit Bölme Sayısı, NIP = 5

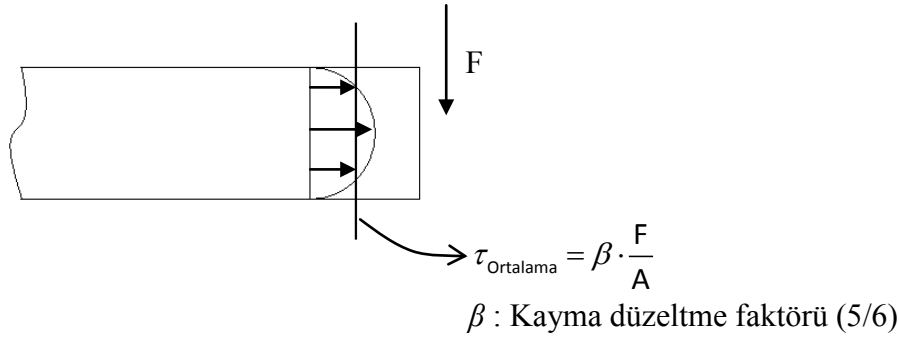
SE elastik – plastik kabuk elemanı formülasyonu olarak kullanılan Hughes-Liu kullanılmıştır. Bu kabuk elemanın özellikleri[2,23];

- 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.



Şekil 4.5. (a) Hughes-Liu kabuk elemanının birim küpte gösterimi [23].
(b) Hughes-Liu kabuk elemanı için yedi katmanlı tam çözüm için hesaplama noktaları [2].

Burada kayma düzeltme faktörü; kesite dik kuvvetin etkisiyle oluşan gerilmenin ortalamasının bulunmasında kullanılır (Şekil 4.6).



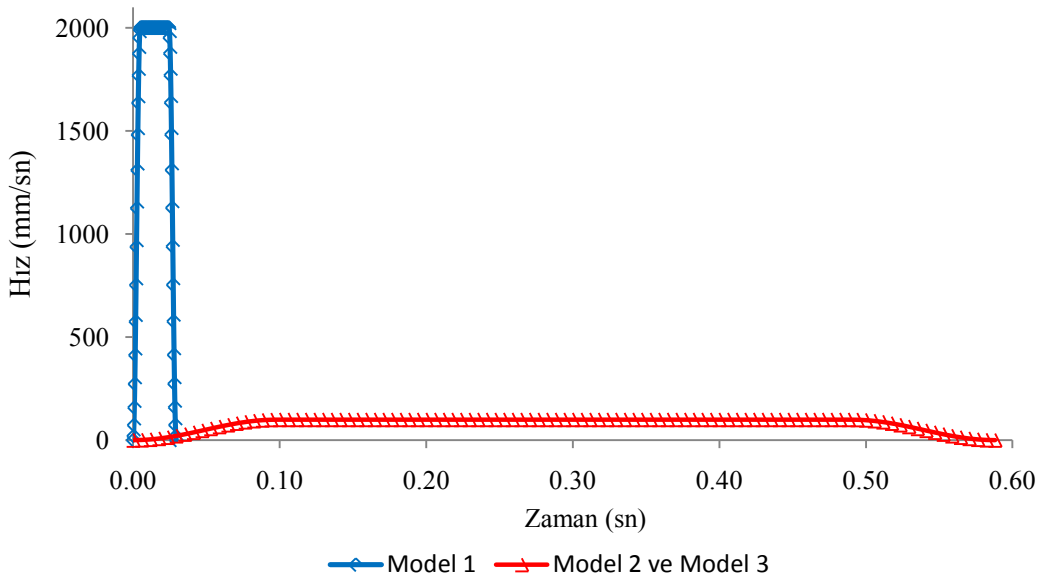
Şekil 4.6. Kayma düzeltme faktörünün şematik gösterimi

4.4. Yüklemelerinin Tanımlanması

Genel tasarıma bakıldığında modelde zımba, tutucu ve kalıp bulunmaktadır. Burada zımba hareketsizdir ve kalıp tarafından üzerine etkiyen kuvvet ölçülmüştür. Kalıp, sabit hızla taslağa etki etmektedir. Tutucu ise, kalıbın etkidiği taslağı sabit bir kuvvetle tutmaktadır. Burada amaç kalıp ile şekillendirilen taslağın içeri akmasını engellemektir. Taslağın içeri akmasını engellemek, tutucu kuvvetine bağlıdır. Taslak I için 49.02 mm. kalıp strok mesafesinde sac üzerinde yırtılma deneysel olarak görülmüştür. Bu strok mesafesine kadar taslak 23500 N ile tutucu tarafından tutulmaktadır. Tutucu 23500 N kuvvetle sacı tutarken; Model 1 2000 mm/sn, Model 2 ve Model 3 ise 100 mm/sn hızla hareket edecektir.

4.4.1. Kalıp hızları

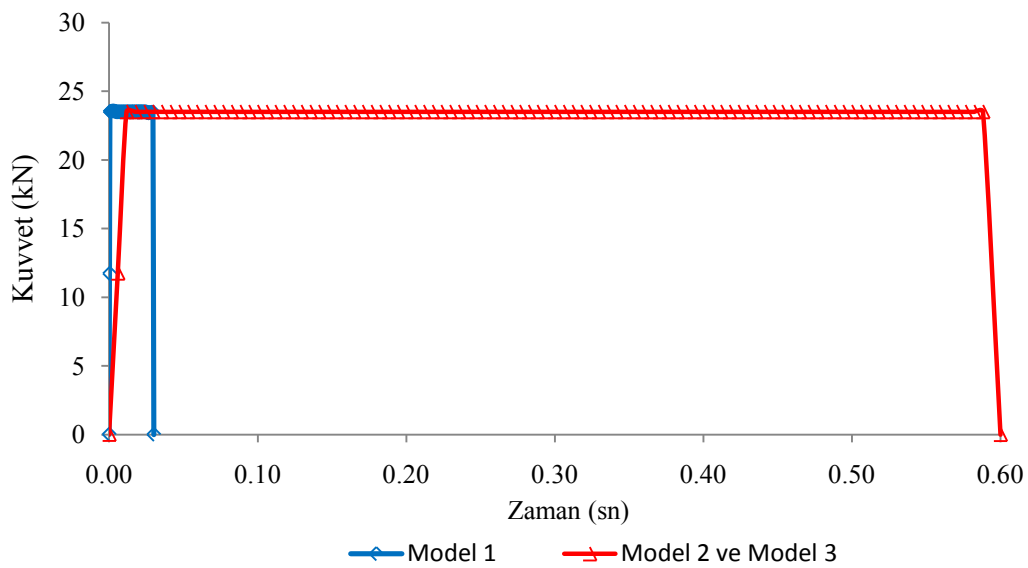
Taslak I, Trip600 malzemesi için 2 farklı kalıp hızı öngörüldü. Bu hız yüklemelerinin hassasiyeti arttırıp arttırmadığı sonuçlara göre bakılacaktır. Model 1 için kalıp hızı 2000 mm/sn olarak çözümlene yapılmıştır. Model 2 ve model 3' de ise kalıp hızı 100 mm/sn olarak çözümlene yapılmıştır (Şekil 4.7).



Şekil 4.7. Çekme işlemi hız – zaman grafikleri

4.4.2. Tutucu kuvvetleri

Tüm sac açınımlarında kuvvet yüklemeleri tutucu üzerindedir. Taslak I' de tutma süresi model 1 için yaklaşık 0.03 sn iken, model 2 ve model 3' de bu süre yaklaşık 0.6 sn olmaktadır. Tam kare çekme işleminde tutucu kuvveti 94 kN. dur. Sonlu elemanlar yönteminde ise $\frac{1}{4}$ model kullanıldığından dolayı kuvvetin de $\frac{1}{4}$ oranının da olması gerekmektedir. Bu sebeple tüm modellerde tutucu kuvveti 23.5 kN. dur (Şekil 4.8).



Şekil 4.8. Çekme işlemi tutucu kuvvet – zaman grafikleri

4.5. Sonlu Eleman Modelleri

Trip600 malzemesi Taslak I için 3 farklı modelin, 2 değişkene göre çözümlenmeleri yapılmıştır. Deney verileri taslağın üst noktasından alındığından, sonlu elemanlar sonuçlarında da veriler taslağın üst noktasından alınmıştır. Bu modellerin sonuçları 25.4 mm. çekme yüksekliği için aşağıdaki durumlarda ölçülmüştür;

- Zimba – Strok grafikleri
- Majör Gerinimler
- Minör Gerinimler
- Kalınlık Gerinimleri
- Kalınlık Değişimi
- Deneysel olarak 49.02 mm. strok mesafesinde görülen ilk yırtılma çözümlenme sonuçları için hazırlandı ve bu mesafede şekillendirme sınır grafiği çıkartıldı.

Çözümleyici olarak Ls-Dyna yazılımı kullanılmıştır. Bilgisayar özellikleri ise; işlemci olarak Intel Centrino Duo – T2400 @ 1.83 GHz, 1 GB Ram ve 110 GB Harddiski olan HP Pavilion dv5000' dir. Buna göre;

Tablo 4.2. Farklı modellerde bilgisayar analiz süreleri

Adlandırma	Çekme Hızı (mm/sn)	Eleman Büyüklüğü (mm)	Tutma Kuvveti (kN)	Bilgisayar Analiz Süresi
Model 1	2000	2	23.5	5 dk. 17 sn.
Model 2	100	2	23.5	1 sa. 30 dk. 42 sn.
Model 3	100	1	23.5	6 sa. 8 dk. 51 sn.

4.6. Deney Sonuçları İle Sonlu Elemanlar Model Sonuçlarının Karşılaştırılması

Taslak I için Trip600 malzemesi kullanılarak yapılan çözümlenmeler sonucunda 3 model ve deneysel verilerin karşılaştırılması yapıldı. Karşılaştırmalar;

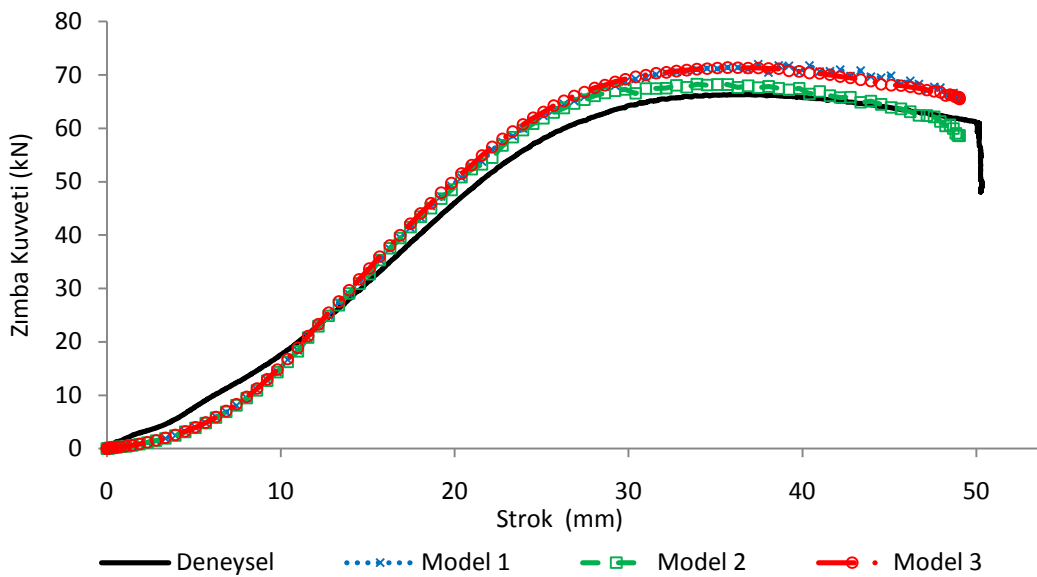
- Majör Gerinimler
- Minör Gerinimler

- Kalınlık Gerinimleri
- Kalınlıklar Değişimleri

iki farklı kesit için yapılacaktır [24]. Bunun sebebi simetri şartlarının olması ve sonlu elemanlar çözümlerinde haddelemeye bağlı özelliklerin dikkate alınmamasıdır. Kesit 1 ve Kesit 3 için sonuçlar sonlu elemanlar yönteminde aynıdır. Bu sebeple değerlerin Kesit 1 ve Kesit 2 karşılaştırılması yeterlidir.

4.6.1. Zimba kuvvetinin karşılaştırılması

Deneysel veride zimba kuvveti incelendiğinde 3 bölümden oluşmuştur (Şekil 4.9). İlk bölüm 15 mm. strok mesafesine kadar olan artan eğimli bölge, 2. olarak 15 mm. ile 35 mm. arasındaki azalan eğimli bölge ve 3. olarak 35 mm. ile 49.02 mm. arasında bulunan negatif eğimli bölgedir. Sonlu elemanlar sonuçlarında da zimba kuvveti 3 bölümden oluşmuştur. İlk bölge genel olarak 15 mm. strok mesafesine kadar alınabilir. Sonraki bölge ise 15 mm. den 35 mm. ye kadar gelmiştir. Son bölge de ise negatif eğimlidir. Deneysel zimba kuvvet eğrisi ile sonlu elemanlar zimba kuvvet eğrileri karşılaştırıldığında karakteristik olarak aynı eğriler olmuştur. İlk bölgede deneysel zimba kuvveti fazla iken, ikinci ve üçüncü bölgelerde sonlu elemanlar zimba kuvvetleri fazla olmuştur.



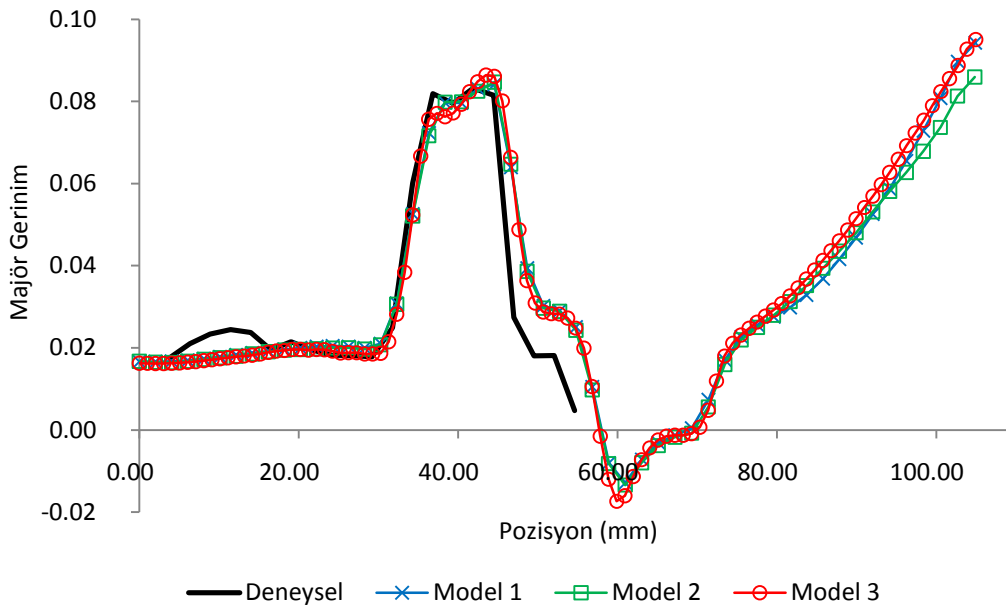
Şekil 4.9. Zimba kuvvet eğrileri

Deneysel veride 3. bölgede kırışmalar, enerjiyi kendi üzerlerine çekmişlerdir ve kuvvet azalmıştır. Deneysel sonuçlarda en yüksek zımba kuvveti 66 kN olurken, model 2 de 68 kN, model 1 ve model 3 de 71 kN olmuştur. Model sonuçlarımız kendi aralarında incelendiğinde ise deneysel zımba kuvvet eğrisine en yakın değeri “Model 2” olmuştur.

Sonlu elemanlar çözümünde simetri olduğundan dolayı, deneysel verilere benzer yönde kesit 1 ve kesit 3 sonuçları aynıdır. Bu sebeple kesit 3 gösterimi yapılmamıştır.

4.6.2. Majör gerininin karşılaştırılması

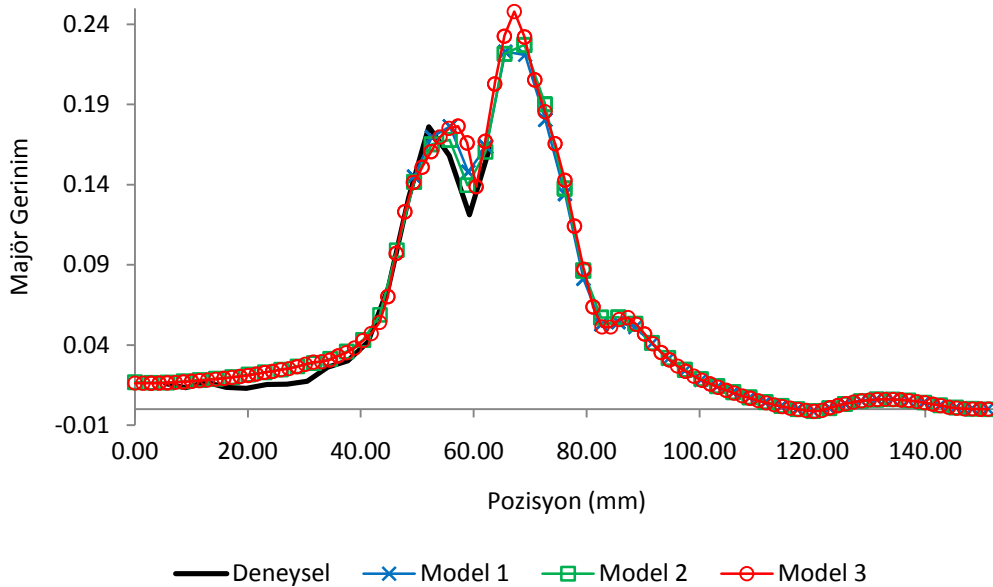
Majör gerinim grafiklerinde (Şekil 4.10, Şekil 4.11) deneysel veri ile sonlu elemanlar modellerinin verileri karşılaştırılmıştır. Kesit 1’ de radüslü bölgede sonlu elemanlar modelinde bulunan majör gerinimlerin, deneysel verilerle paralel olduğu görülmektedir.



Şekil 4.10. Kesit 1 – Majör gerinim eğrileri

Kesit 2' de ise zımba omuz bölgesinde başlayan majör gerinim artışı, tüm omuz boyunca devam etmiş ve deneysel veri ile paralellik göstermiştir. Deneysel veri ile sonlu elemanlar sonuçları karşılaştırıldığında omuz bölgesi % 19 majör gerinim değerini göstermiştir. Sonlu elemanlar model sonuçları incelendiğinde asıl majör gerinim bölgesinin, omuz altında olduğu görülmektedir. Bunun sebebi kalıp ile tutucu arasında belli bir kuvvette tutulan sac, çekilmeye zorlandıkça uzamaya çalışacaktır. Uzamanın majör gerinimi arttırdığı bilinmektedir. Majör gerinim, şekillendirme başladığında omuz bölgesinde başlayacaktır. Fakat zımba ile sac arasında omuz bölgesinde temasın armasıyla birlikte, majör gerinime karşı direnç görülecektir. Bu esnada şekillendirme devam ederken omuz bölgesinden malzeme akışı azalacağı için, kalıp ile zımba arasındaki malzeme şekil değiştirecektir ve majör gerinimi arttıracaktır. Bunun sonucunda yeni bir yerel maksimum majör gerinim oluşacaktır (70 mm. strok).

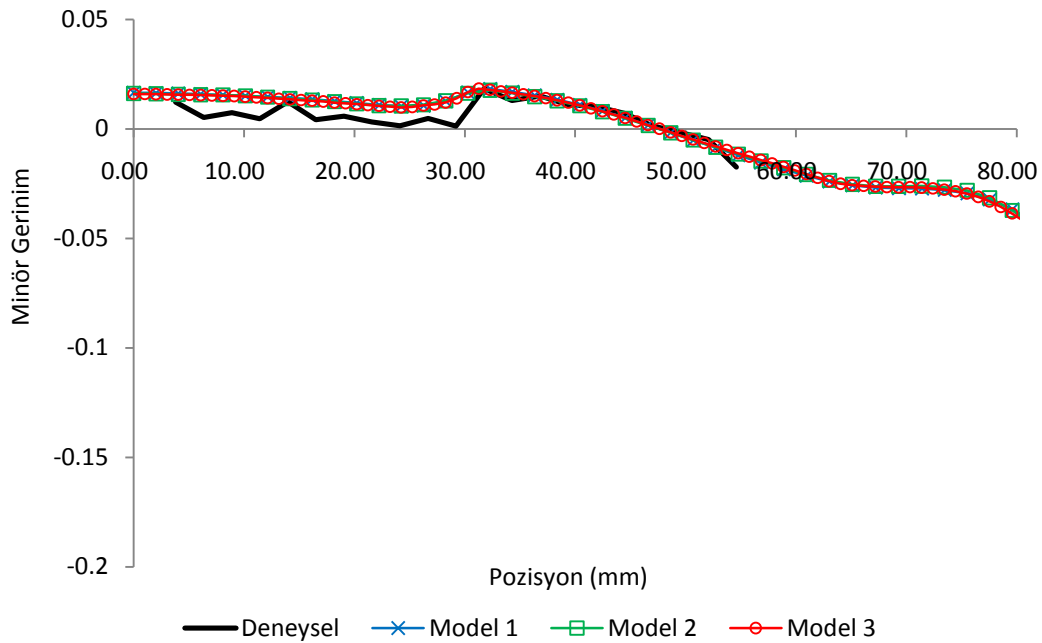
Kesit 1 ve kesit 2 incelendiğinde, deneysel veri ile sonlu elemanlar çözümünün yaklaşık olduğu söylenebilir.



Şekil 4.11. Kesit 2 – Majör gerinim eğrileri

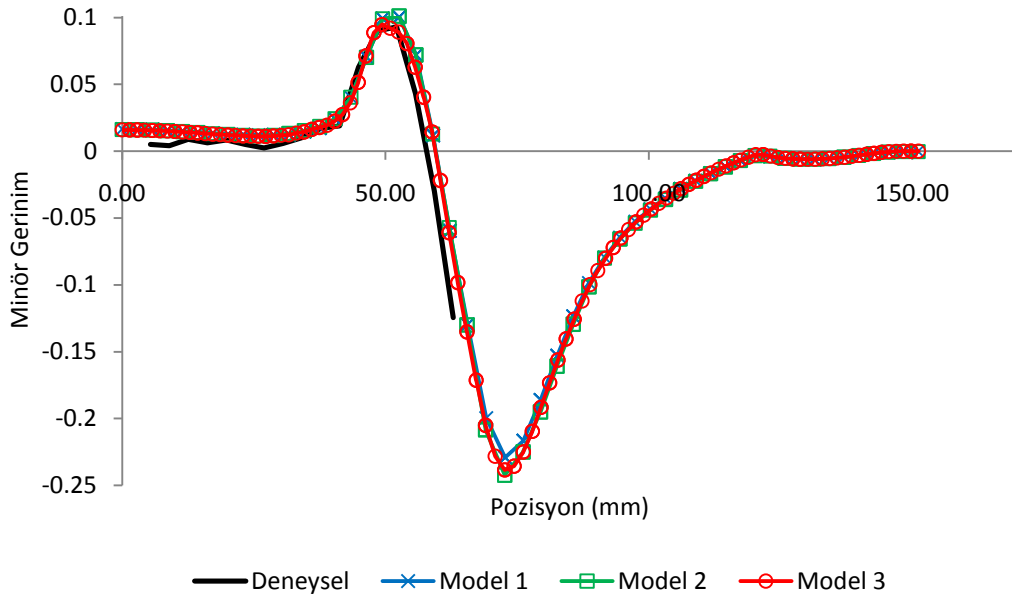
4.6.3. Minör gerininin karşılaştırılması

Minör gerininin grafiklerinde (Şekil 4.12, Şekil 4.13) deneysel veri ile sonlu elemanlar modellerinin sonuçları karşılaştırılmıştır. Sonlu elemanlar sonuçları incelendiğinde kesit 1’ de minör gerininin genel olarak % 2 olmuştur. Deneysel veri incelendiğinde ise radüs bölgesi hariç diğer bölgelerde minör gerininin olmadığı görülmektedir. Radüs bölgesinde deneysel veride ise minör gerininin % 2 olmuştur. Kesit 1’ de majör gerinininler ile birlikte minör gerinininler incelendiğinde, “tek eksenli gerininin” olduğu görülmüştür.



Şekil 4.12. Kesit 1 – Minör gerininin eğrileri

Kesit 2 incelendiğinde zımba omuz bölgesinde minör gerininin deneysel olarakta, sonlu elemanlar model sonuçları olarakta artmıştır. Kesit 2’ de majör ve minör gerinininlerin omuz bölgesinde artması “Çift eksenli orantısal gerininin” olduğunu göstermektedir.

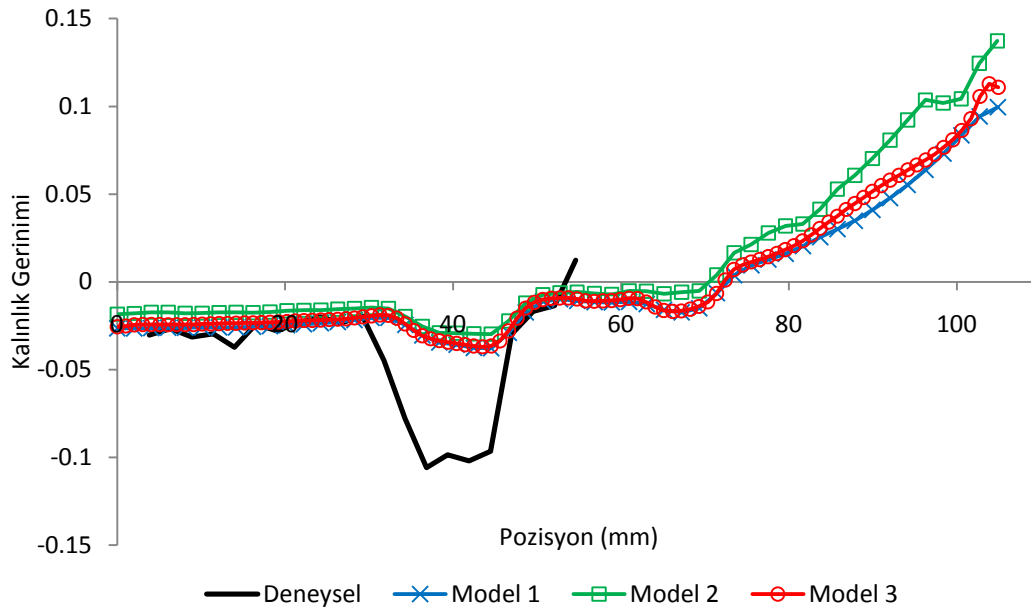


Şekil 4.13. Kesit 2 – Minör gerinim eğrileri

Çift eksenli gerinimin oluşması, kalınlık geriniminin etkisini ortaya çıkartacaktır. Çift eksenli gerinim bölgesinde en fazla incelmenin olması beklenmektedir. En fazla incelme olan bölgenin belirlenmesi, yırtılma olacak bölgenin belirlenmesinde etkindir. Asal gerinimlerde deneysel sonuçlar ile sonlu elemanlar model sonuçları arasında paralellik gözlenmektedir.

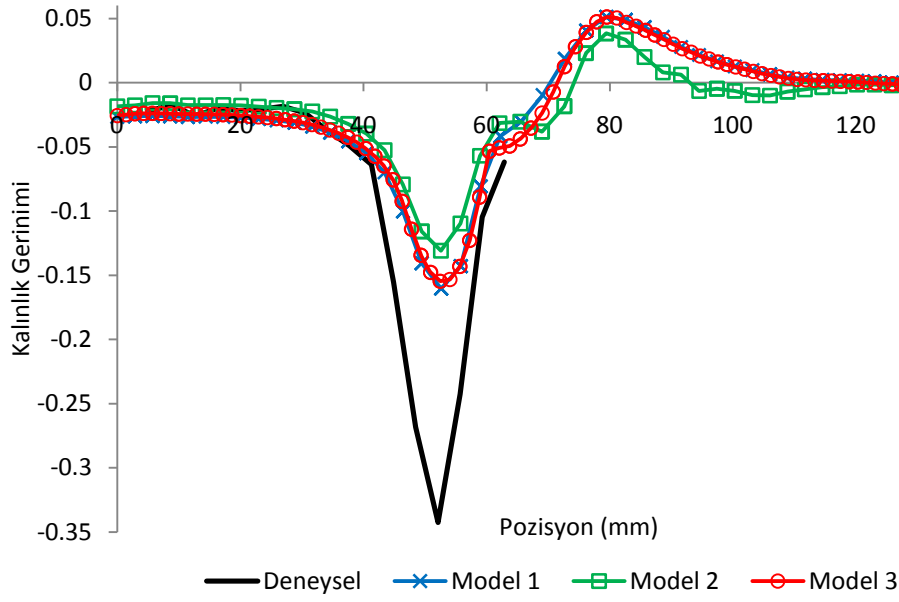
4.6.4. Kalınlık geriniminin ve kalınlık dağılımının karşılaştırılması

Majör ve minör gerinim durumları incelendiğinde çok iyi sonuçlar alınmıştır. Fakat kalınlık yönünden incelendiğinde sonuçlarda farklılık görülmüştür. Kesit 1 deneysel veriden incelendiğinde, radüs bölgesinde majör gerinim % 9, minör gerinim %3 olmuştur (Şekil 4.10, Şekil 4.12). Gerinim toplamları, hacim bütünlüğü göz önüne alındığında sıfır olmalıdır. Buna göre kalınlık gerinimi %12' ye yakın değer olmalıdır. Deneysel veri incelendiğinde kesit 1 – radüslü bölgede, kalınlık gerinimi %10 ile %12 arasında değiştiği görülmektedir (Şekil 4.14). Sonlu elemanlar modelleri, kesit 1 radüslü bölgede incelendiğinde, majör gerinim ve minör gerinimler deneysel veriler ile aynı olmasına rağmen kalınlık gerinimleri %4 olmuştur. Kalınlık gerinimde %8 fark söz konusudur.



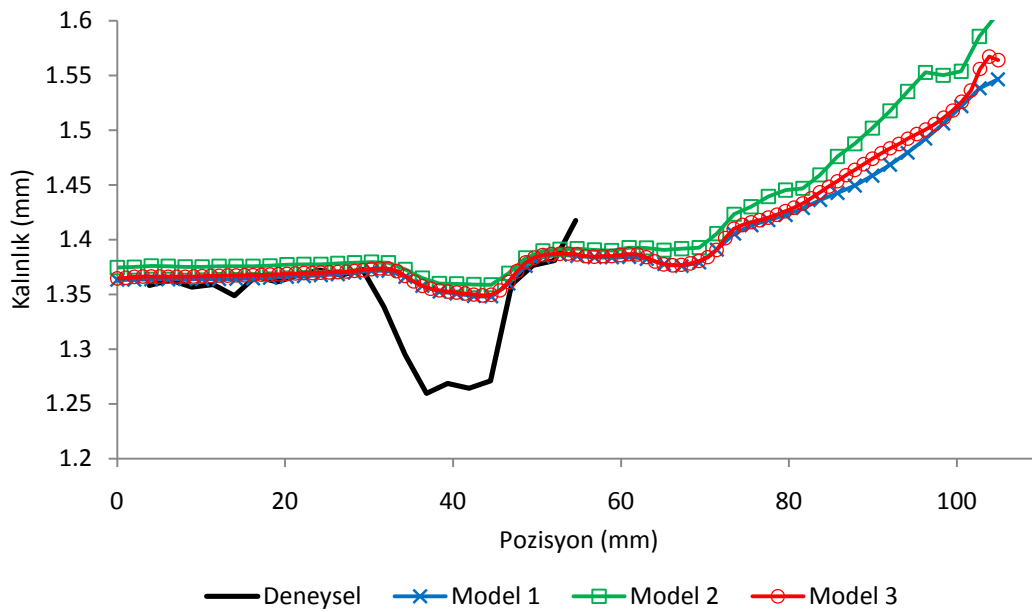
Şekil 4.14. Kesit 1 – Kalınlık gerinim eğrileri

Kesit 2' de omuz bölgesinde deneysel veriden alınan majör gerinim %17.6 ve minör gerinim %10 olmuştur (Şekil 4.11, Şekil 4.13). Buna göre kalınlık gerinimi %27 olması beklenirken %35 olmuştur. Malzeme özelliklerinin kalınlık üzerinde 1. dereceden önemli olduğu görülmektedir. Aynı bölge sonlu elemanlar modellerinde incelendiğinde ise majör gerinim %16, minör gerinim ise %10 olmuştur. Buna göre sonlu elemanlar modelinde kalınlık gerinimi omuz bölgesinde %26 gibi bir değer olması beklenirken, %15 olmuştur (Şekil 4.15). Kalınlık gerinimi deneysel ve sonlu elemanlar modelleri arasında karşılaştırıldığında tamamen farklı sonuçlar göstermiştir. Beklenenlere göre (deneysel veri için %27, sonlu elemanlar için %26) deneysel veri daha fazla kalınlık gerinimi göstermiş, sonlu elemanlar verisi ise daha az kalınlık gerinimi göstermiştir.



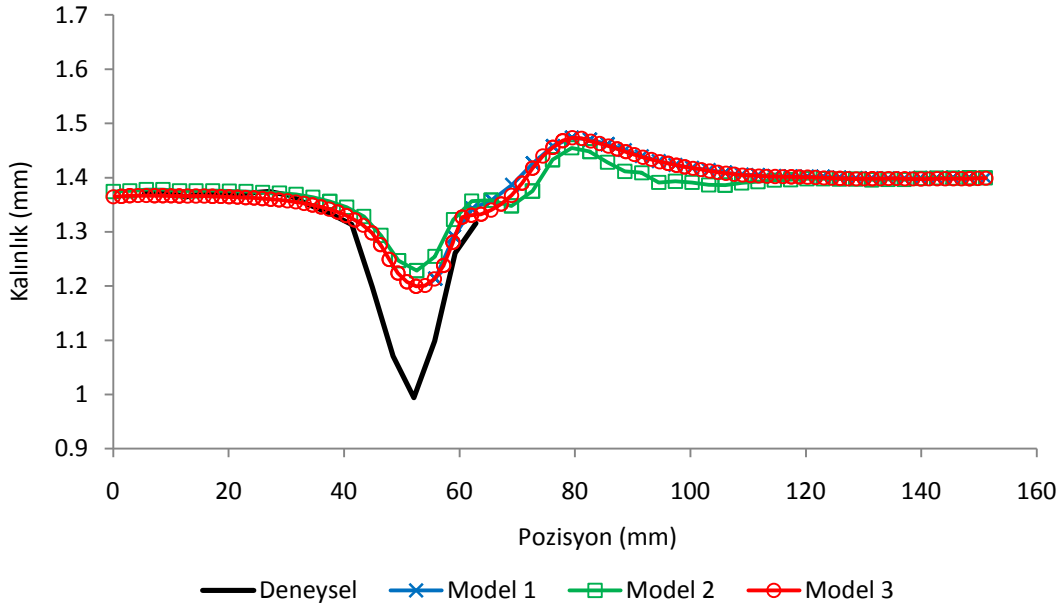
Şekil 4.15. Kesit 2 – Kalınlık gerinim eğrileri

Kalınlık grafikleri incelendiğinde (Şekil 4.16 ve Şekil 4.17), kalınlık gerinimlerinde görünen fark burada daha net ortaya çıkmıştır. Kesit 1, radüs bölgesinde deneysel olarak 0.15 mm. incelme, sonlu elemanlar yöntemi kullanıldığında 0.5 olmuştur. Deneysel veri, sonlu elemanlar yöntemine göre iki kat daha fazla incelmıştır. Deneysel veride 1.25 mm, sonlu elemanlar sonuçlarında 1.35 mm. olan kalınlık, sonuçlarda hata olduğunu belirgin şekilde ortaya koymuştur.



Şekil 4.16. Kesit 1 – Kalınlıkların dağılımının karşılaştırılması

Kesit 2 incelendiğinde (Şekil 4.17) ise omuz bölgesinde bu fark artmıştır. Deneysel veri yaklaşık 1 mm. kalınlıkta iken, sonlu elemanlar çözümü 1.2 mm. kalınlıkta kalmıştır. Omuz bölgesinde çift eksenli orantısız gerinim olduğu majör ve minör gerinimler incelenirken görülmüştür. Bu bölgede yırtılma beklenmektedir. Çift eksenli gerinim bölgesinde deneysel olarak malzemeye bağlı incelme, sonlu elemanlar yöntemine göre daha fazladır.



Şekil 4.17. Kesit 2 – Kalınlık dağılımının karşılaştırılması

Burada sonlu elemanlar kalınlık dağılımları, Trip600 malzemesi için taslak I, 25.4mm. de deneysel sonuçlara yakın sonuçlar verememiştir. Bu durumda malzemede deneysel olarak yırtılma görülen 49.02 mm lik strok mesafesi, sonlu elemanlar modellerinin bu yırtılmayı öngöremeyecektir.

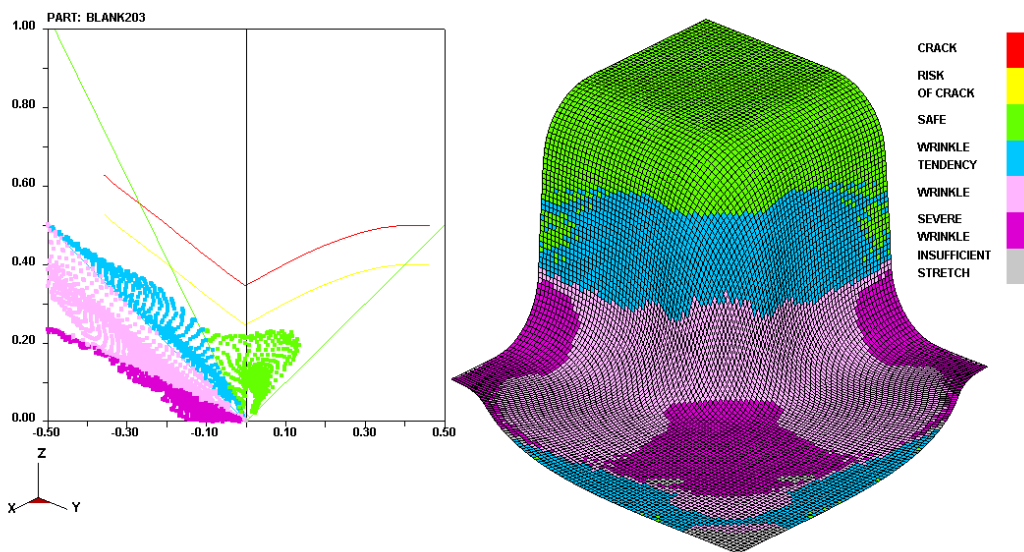
4.6.5. Şekillenirme sınır grafiklerinin (SSG) karşılaştırılması

Şekillendirme sınır grafikleri bize klasik çeliklerde yırtılma olacak bölgeyi öngörürler. Klasik çeliklerde bu yaklaşım büyük başarı kazanmıştır. Fakat günümüzde yüksek mukavemetli çeliklerin kullanılması, şekillendirme sınır grafiklerinin farklı yapıdaki bu çelik sınıflarında sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak ne derecede başarı sağlayacağı bilinmemektedir. Deneysel sonuçlar ile sonlu elemanlar sonuçları karşılaştırıldığında doğru sonuçlar veren majör ve minör

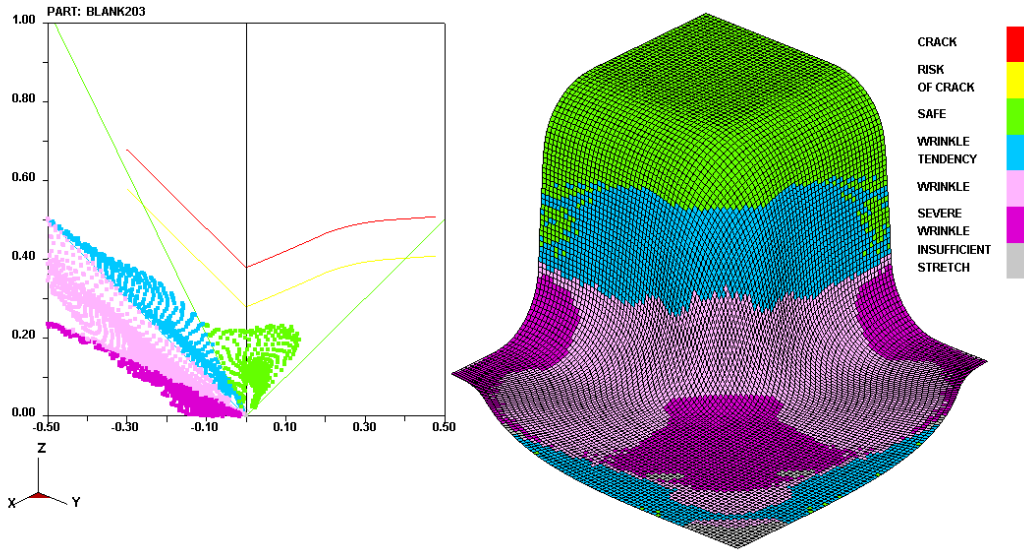
gerinimler, şekillendirme sınır grafiklerindeki verilerdir. Bu gerinimler kullanılarak şekillendirme sınır grafikleri oluşturulur. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak hazırlanan 3 model içerisinde, deneysel sonuçlara en yakın sonuçları veren ve en hassas çözüm yapan (1mm eleman boyu) model; model 3' dür. Şekillendirme sınır grafikleri incelenirken model 3 üzerinden gösterim yapılacaktır. Buna göre deneysel olarak yırtılma taslak I' de 49.02 mm. de görülmüştür. Aynı durumda sonlu elemanlar çözüm yöntemi kullanılarak deneysel olarak bulunan şekillendirme sınır eğrisi ve Keeler denklemine göre bulunan şekillendirme sınır eğrisi kullanılarak ŞSG incelenmiştir. Deneysel yüzeyde markalama işlemi üst yüzeyde yapıldığından, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak hazırlanan modelden sonuçlar üst yüzeyden alınmıştır.

Model 3, deneysel ŞSE üzerinden incelendiğinde yırtılma oluşması düşünülen bölgede (omuzda) , yırtılma riski dahi görülmemiştir (Şekil 4.18). Majör ve minör gerinimler, deneysel ve sonlu elemanlar yönteminde yakın sonuçlar vermesine rağmen ŞSG üzerinde yırtılma görülmemesi, şekillendirme sınır grafiklerinin yüksek mukavemetli çeliklerde uygulanamadığını gösterir.

Aynı durumda, Keeler formülü sonucu oluşan şekillendirme sınır eğrisi kullanıldığında da durum değişmemiştir (Şekil 4.19).



Şekil 4.18. 49.02 mm yükseklik için deneysel ŞSE göre Model 3



Şekil 4.19. 49.02 mm yükseklik için Keeler ŞSE göre Model 3

Deneysel olarak bakıldığında 49.02 mm. strok mesafesinde yırtılma görülmesine rağmen, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak çıkartılan şekillendirme sınır grafikleri başarısız olmuştur. Şekillendirme sınır grafikleri üzerinden yırtılma bölgesi tespitinde majör ve minör gerinimlere bakılmaktadır. Sonlu elemanlar modelleri ile deneysel veriler, majör ve minör gerinimlerinde yakın sonuçlar vermiştir. Bu durumda şekillendirme sınır grafiklerinde yırtılmanın görülmesi gerekmektedir. Fakat kalınlık dağılımları incelendiğinde (Şekil 4.16, Şekil 4.17), buradaki farkın, yırtılma üzerinde etkisi açıkça görülmektedir. Yüksek mukavemetli çeliklerde, majör ve minör sonuçları deneysel verilerle ne kadar örtüşürse örtüşsün, kalınlık bu grafikleri doğrulamada birincil etmenddir.

BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tezin amacı kare çekme işlemini sonlu elemanlar hesaplamaları yardımı ile ileri yüksek mukavemetli çeliklerde yırtılma tahmininin şekillendirme sınır grafiği üzerinden yapılmasıdır. Bu tahmin bulunurken aynı kalıp geometrisi, aynı malzeme ve yağlama koşullarının kullanıldığı üç farklı sonlu elemanlar modeli üzerinden hesaplama yapılmıştır. Sonlu elemanlar hesaplaması sonucu elde edilen değerler, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır ve sonuçlar şekillendirme sınır grafikleri üzerinden değerlendirilmiştir.

Trip600 malzemesi için yapılan test sonucu oluşan zımba kuvveti ile sonlu elemanlar sonucu oluşan zımba kuvveti arasında 5 kN fark görülmüştür. Kuvvet eğrisinde 3. bölgedeki negatif eğimin sebebi kırışıklıkların başlamasıdır. Burada negatif eğim nedeniyle kullanılamayan enerjiyi kırışıklık kendi üzerine almıştır.

Testlerde, şekillendirme sırasında, 25.4 mm. strokta taslak üzerinden majör, minör gerinimler ve kalınlık dağılımları belirli kesitlerde alınmıştır. Sonlu elemanlar modellerini kullanarak, aynı strok mesafesinde taslak üzerinden majör, minör gerinim ve kalınlık dağılımları, istenen kesitlerde alınıp, deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucu, şekillendirme esnasındaki majör ve minör gerinimlerin hesaplanmasında sonlu elemanlar modeli başarılı olmasına rağmen kalınlık dağılımı incelendiğinde başarılı olamamıştır. Şekillendirme sınır grafiklerinde (SSG) majör ve minör gerinimler kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar sonuçlarının verdiği majör ve minör gerinimler yırtılma yüksekliğini doğru tahmin edeceği varsayılmaktadır.

Çekme testi, yırtılma yüksekliğine kadar devam ettiğinde ilk yırtılma 49.02 mm. de görülmüştür. Aynı çekme yüksekliği sonlu elemanlar modelinde uygulandığında ise yırtılmayı göstermesi beklenmesine rağmen, başarılı olamamıştır. Bunun temel

sebebi, şekillendirme sınır grafiklerinin majör ve minör gerinimleri temel almasıdır. Majör ve minör gerinimler ne kadar doğru sonucu verirse versin, yüksek mukavemetli çeliklerde yırtılma tahmini, ŞSG üzerinden yapıldığında hatalı sonuç verecektir. Kalınlık dağılımları ele alındığında, deneysel veri ile sonlu elemanlar sonuçları arasındaki hata, yırtılma yüksekliğinin belirlenmesinde birincil dereceden önemli olmuştur. Sonlu elemanlar modeli kalınlığı doğru tahmin edemediği için yırtılma görülmemiştir.

Kalınlık dağılım sonuçlarındaki farkın etkisiyle, majör ve minör gerinimler ne kadar doğru olursa olsun, şekillendirme sınır grafiği hatalı hatalı sonuç verecektir. Burada ŞSG, kalınlığa bağlı grafik olacak şekilde uyarlanabilir. Sonlu elemanlar modelinde kalınlığı da dikkate alan model formülasyonu kullanarak yapılan çözümlemenin, daha doğru sonuç verilmesi sağlayabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Schuler GmbH, Metal Forming Handbook, Taylan ALTAN (Consulting Editor), Springer, 1998.
- [2] METE, O.H., Sac Levhaların Şekillendirilebilirliğine Etki Eden Değişkenlerin İncelenmesi, 2007.
- [3] FIRAT, M., Sac Metal Kalıpcılığı Eğitim Notları, SAÜ, 2004.
- [4] AISI, DOE, Formability Characterization of a New Generation of High Strength Steels, March 2003.
- [5] SHAN, T.K., LI, S.H., ZHANG W.G., XU Z.G., Prediction of martensitic transformation and deformation behavior in the TRIP steel sheet forming, *Materials and Design* 29, 1810–1816, 2008.
- [6] ROLL, K., FAUST A., Forming simulation of high-strength steels with direction-specific hardening modelling, *Archives of Civil And Mechanical Engineering*, 8-3, 2008.
- [7] PADMANABHAN, R., BAPTISTA, A.J., OLIVEIRA, M.C., MENEZES, L.F., Effect of anisotropy on the deep-drawing of mild steel and dual-phase steel tailor-welded blanks, *Journal of Materials Processing Technology*, 184, 288–293, 2007.
- [8] JACQUES, P.J., Transformation-induced plasticity for high strength formable steels, *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 8, 259–265, 2004.
- [9] WASILKOWSKA, A., TSIPOURIDISA, P., WERNER, E.A., PICHLER, A., TRAIANT, S., Microstructure and tensile behaviour of cold-rolled TRIP-aided steels, *Journal of Materials Processing Technology*, 157–158, 633–636, 2004.
- [10] HAI-YAN YU, SHU-HUI LI, YUN-KAI GAO, Deformation behavior of the constituent phases for cold-rolled TRIP-assisted steels during uniaxial tension, *Materials Characterization*, 57, 160–165, 2006.
- [11] QIANG LIU, DI TANG, HAI-TAO JIANG, REN-DONG LIU, and XIAO-YONG TANG, Research and development of 780 MPa cold rolling TRIP-

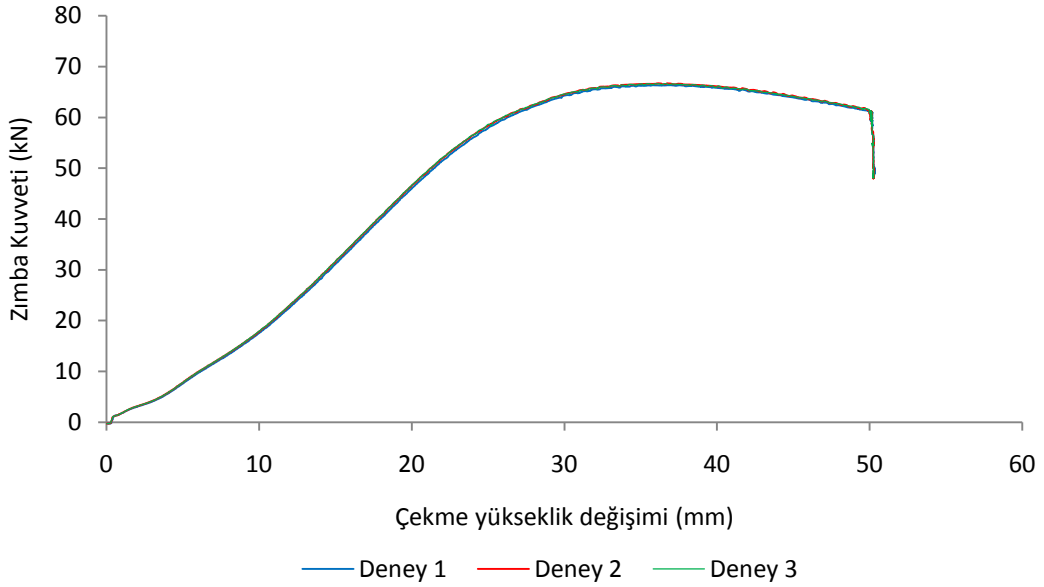
- aided steel, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 16-4, 399, 2009.
- [12] HOON HUH, SEOK-BONG KIM, JUNG-HAN SONG, JI-HO LIM, Dynamic tensile characteristics of TRIP-type and DP-type steel sheets for an auto-body, *International Journal of Mechanical Sciences*, 50, 918–931, 2008.
- [13] FIRAT, M., A Numerical Analysis Of Sheet Metal Formability For Automotive Stamping Applications, *Computational Materials Science*, 43, 802 – 811, 2008.
- [14] AISI, *Stamping And Formability: Automotive Sheet Metal Stamping And Formability*, 1989.
- [15] ÖZTÜRK, F., *Analysis Of Forming Limits Using Ductile Fracture Criteria*, Doctor Of Philosophy, Faculty of Rensselaer Polytechnic Institute, New York, 9, 2002.
- [16] SVENSSON, C., *The Influence of Sheet Thickness on the Forming Limit Curve For Austenitic Stainless Steel*, Örebro Universitet Institutionen För Teknik, 12, 15,16, 2004.
- [17] ÖZTÜRK, F., LEE, D., Experimental and numerical analysis of out-of-plane formability test, *Journal of Materials Processing Technology*, 170, 247 – 253, 2005.
- [18] MARCINIAK, Z., DUNCAN, J.L., HU, S.J., *Mechanics of Sheet Metal Forming*, Butterworth-Heinemann, xiii,7, 2002.
- [19] JOSEF ZRN'IK, ONDREJ STEJSKAL, ZBYŠEK NOV'Y, PETER HORNAK, MARTIN FUJD, Structure dependence of the TRIP phenomenon in Si–Mn bulk steel, *Materials Science and Engineering A* 462, 253–258, 2007.
- [20] A/SP, *Advanced High – Strength Steel Product and Process Applications Guidelines “A Special Edition of in-depth AHSS Case Studies”*, Michigan, 2008.
- [21] Eta / DYNIFORM User's Manual, Version 5.6, 2007.
- [22] LS – DYNA 971 Keyword User's Manual – Volume I, May 2007.
- [23] LS – DYNA Theory Manual, March 2006.
- [24] Eta / Post-processor User's Manual, Version 1.7.4, 2008 .

EKLER

EK A – DENEYSEL SONUÇLAR

Kuvvet Grafikleri

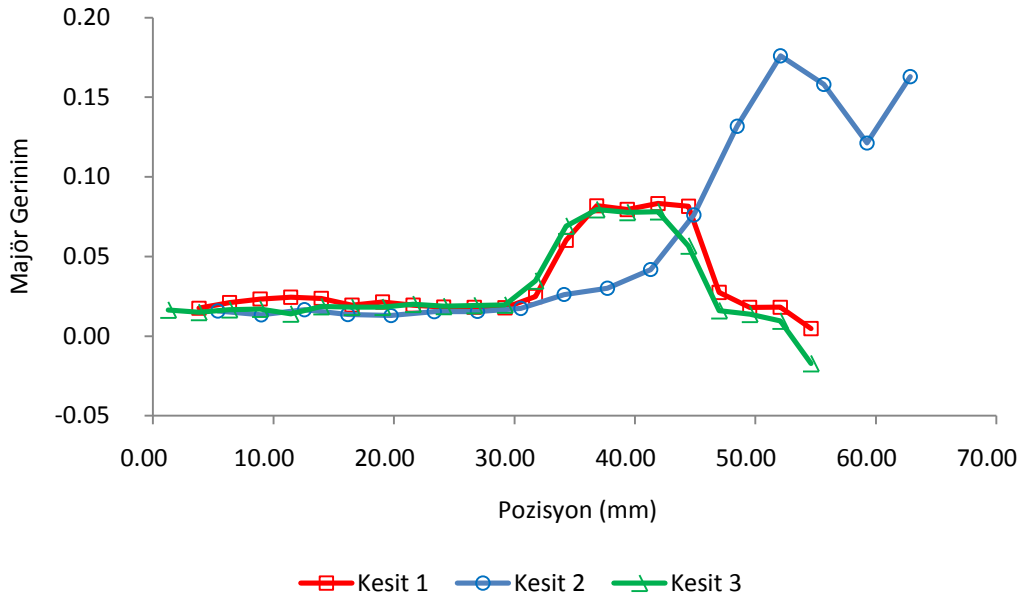
Aşağıda Şekil A.1 de Kuvvet / Yer değiştirme (Strok) üç deney içinde hazırlanmıştır. Bu grafik üç deneyde de kuvvetlerin, strok ile aynı davranışta olduğunu göstermektedir.



Şekil A.1 – Kuvvet/Strok Deneysel Sonuçları

Majör Gerinim Grafikleri

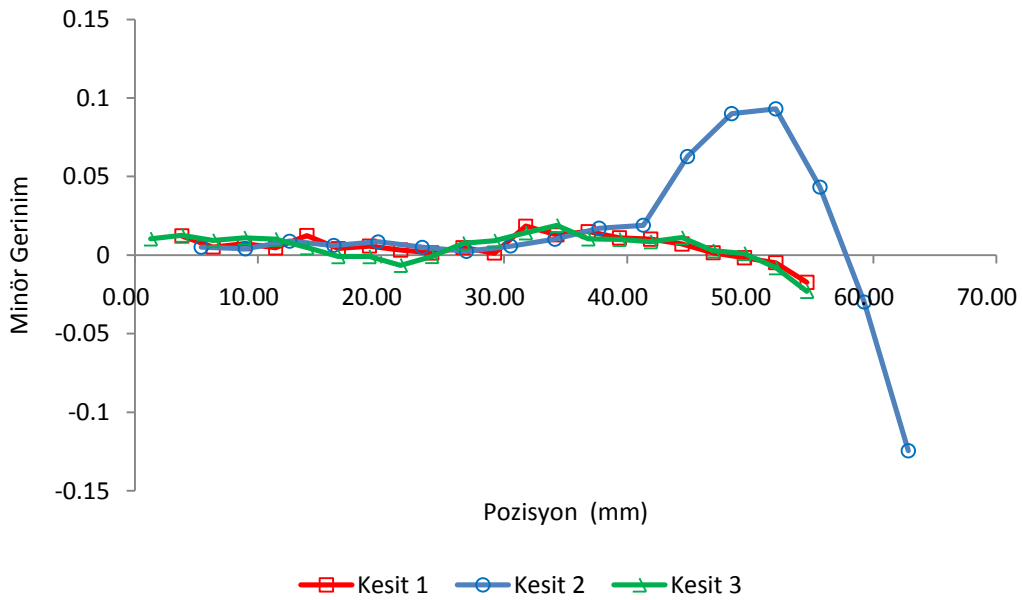
Aşağıdaki Şekil A.2' de Majör Gerinim / Pozisyon deney sonuçları 25.4 mm için gösterilmiştir. Bu şekilde Bölüm 3 de tanımlanmış üç farklı kesit için ölçülmüştür.



Şekil A.2 – Üç Kesit İçin Büyük Gerilim Dağılımları

Minör Gerinim Grafikleri

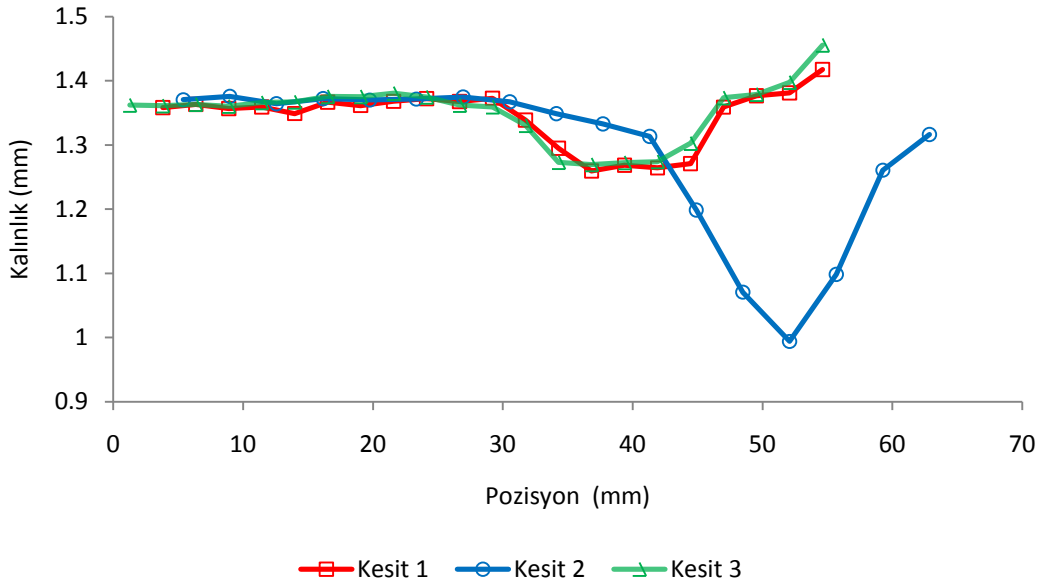
Aşağıdaki Şekil A.3 de Minör Gerinim / Pozisyon deney sonuçları 25.4 mm. için gösterilmiştir. Bu şekilde Bölüm 3 de tanımlanmış üç farklı kesit için ölçülmüştür.



Şekil A.3 – Üç Kesit İçin Küçük Gerilim Dağılımları

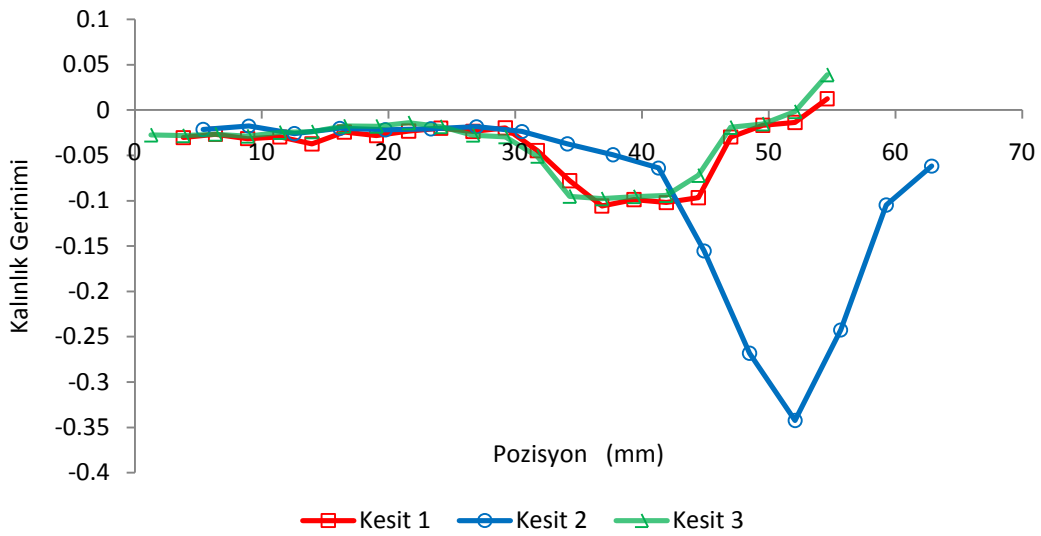
Kalınlık / Kalınlık Gerinim Dağılım Grafikleri

Aşağıdaki Şekil A.4 de Kalınlık / Pozisyon deney sonuçları 25.4 mm için gösterilmiştir. Bu şekilde Bölüm 3 de tanımlanmış üç farklı kesit için ölçülmüştür.



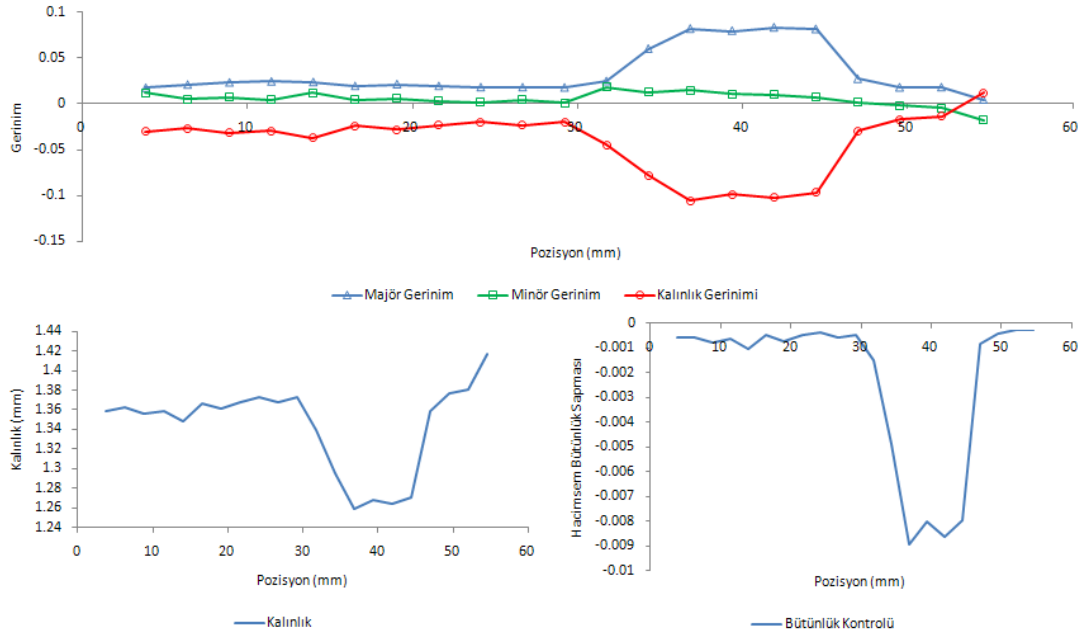
Şekil A.4 – Üç Kesit İçin Kalınlık Dağılımları

Şekil A.5 de ise Kalınlık Gerinimleri / Pozisyon üç farklı kesit için 25.4 mm strokta deneysel olarak gösterilmiştir.

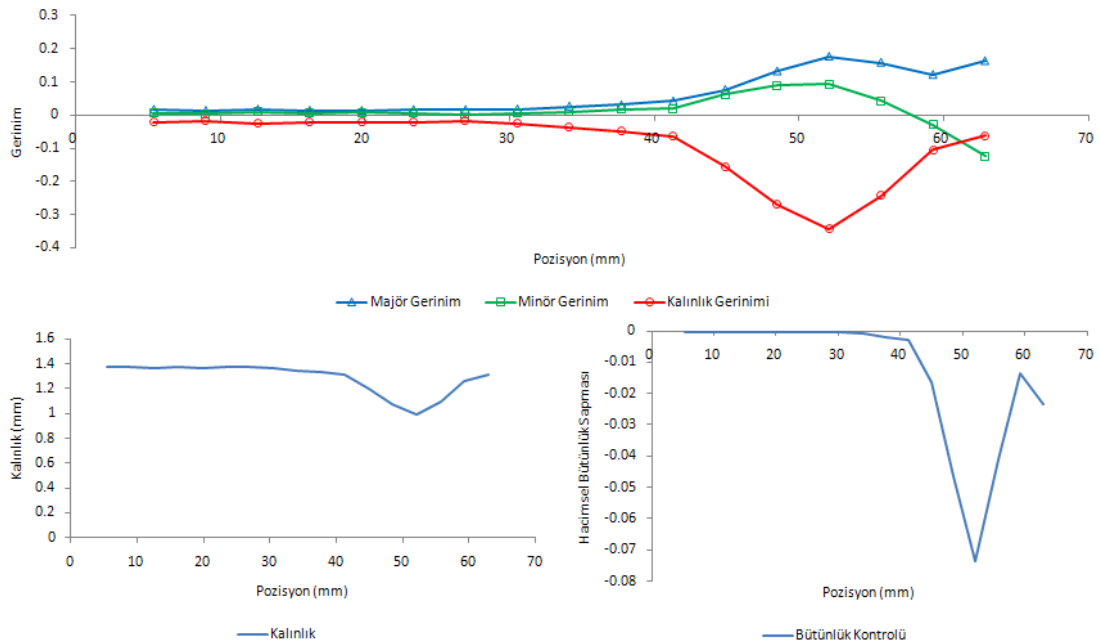


Şekil A.5 – Üç Kesit İçin Kalınlık Gerinim Dağılımları

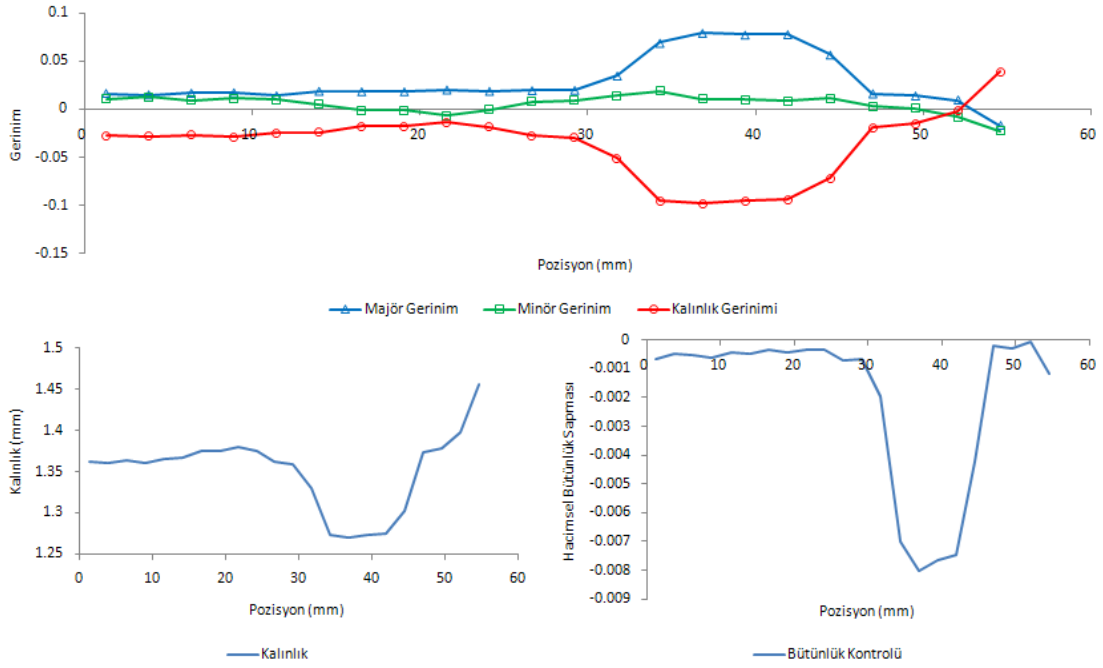
Kesitlerin pozisyonlara bağı gerinimleri, kalınlıkları ve hacim bütünlüğü Şekil A.6’ da Kesit 1 için, Şekil A.7’ de Kesit 2 için ve Şekil A.8’ de ise Kesit 3 için gösterilmiştir.



Şekil A.6 – Kesit 1 için Gerçek Gerinimler, Kalınlıklar ve Bütünlük Kontrolü



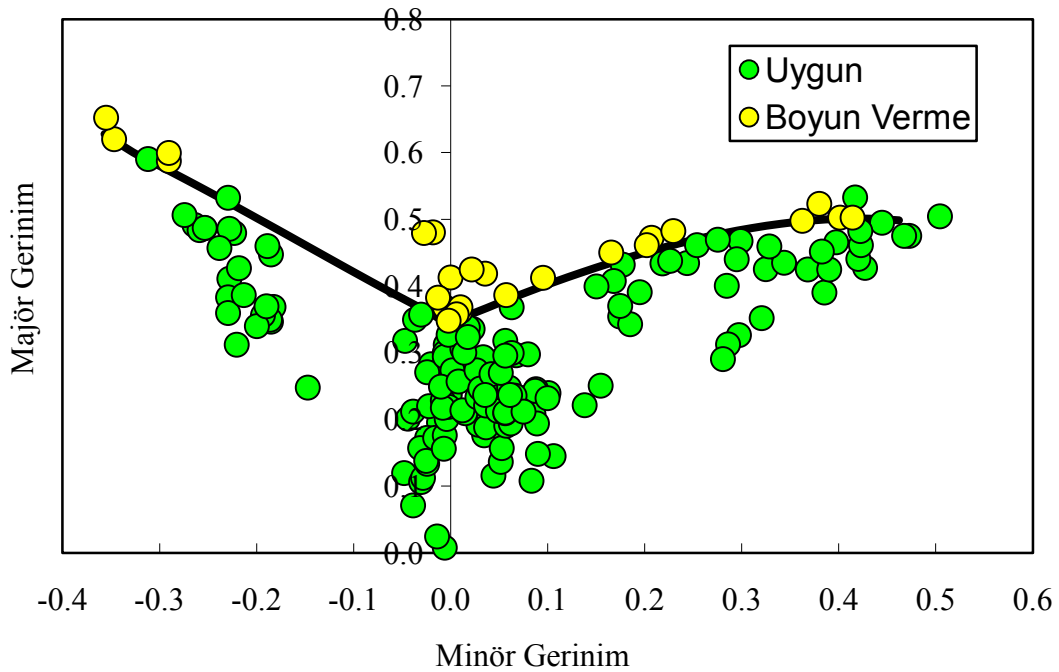
Şekil A.7 – Kesit 2 için Gerçek Gerinimler, Kalınlıklar ve Bütünlük Kontrolü



Şekil A.8 – Kesit 3 için Gerçek Gerinimler, Kalınlıklar ve Bütünlük Kontrolü

Şekillendirme Sınır Eğrisi (ŞSE) ve Şekillendirme Sınır Diyagramı (ŞSG)

Aşağıdaki Şekil A.9’ da deneysel şekillendirme sınır eğrisi görülmektedir. Bununla birlikte gerilim ölçümlerinin yapıldığı yerlerdeki davranışlar ŞSG de verilmiştir.

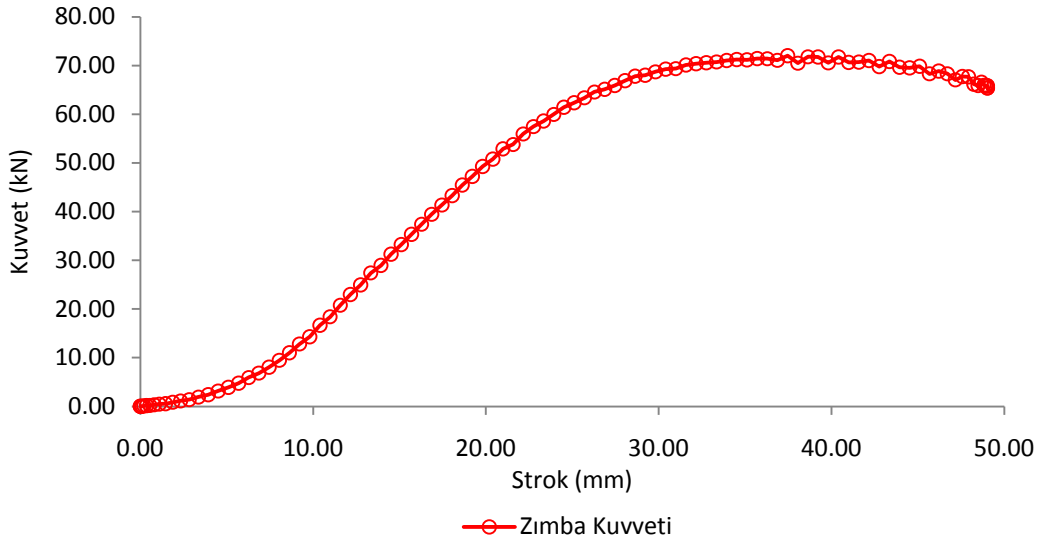


Şekil A.9 – 1.4 mm Kalınlıkta Trip600 için ŞSE ve ŞSG Değerleri

EK B – BENZETİM ÇÖZÜMLEME SONUÇLARI

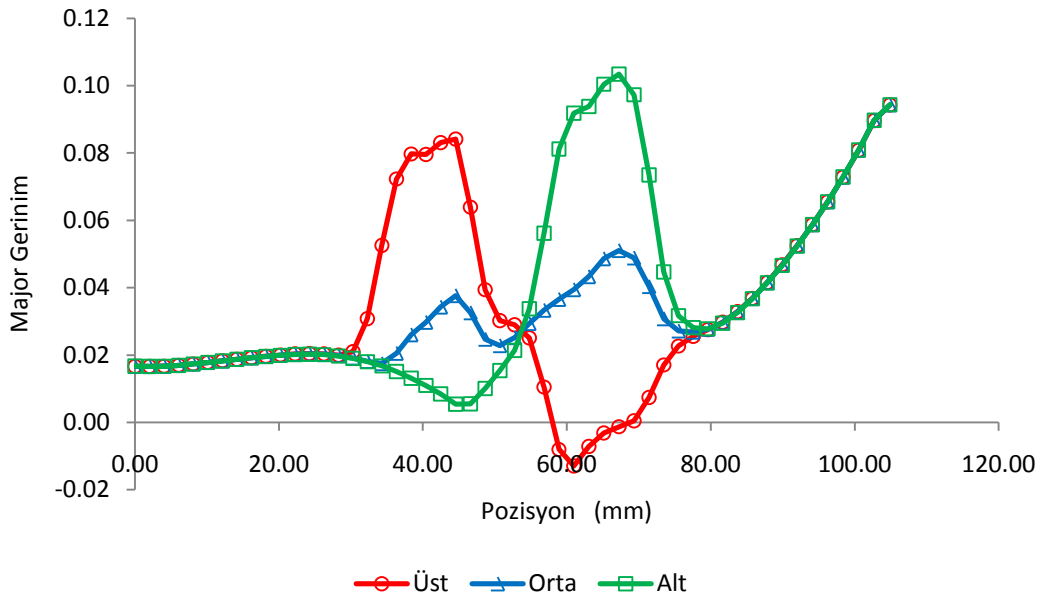
Model 1

Erkek Kalıp Kuvvet / Strok Grafiği

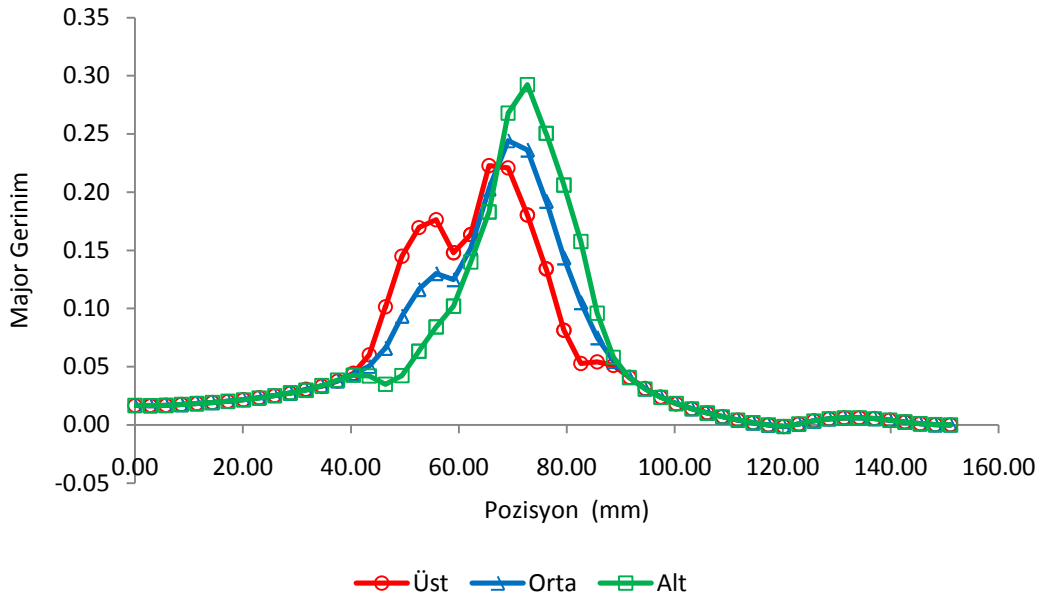


Şekil B.1 – Erkek Kalıp Kuvvet / Strok Grafiği

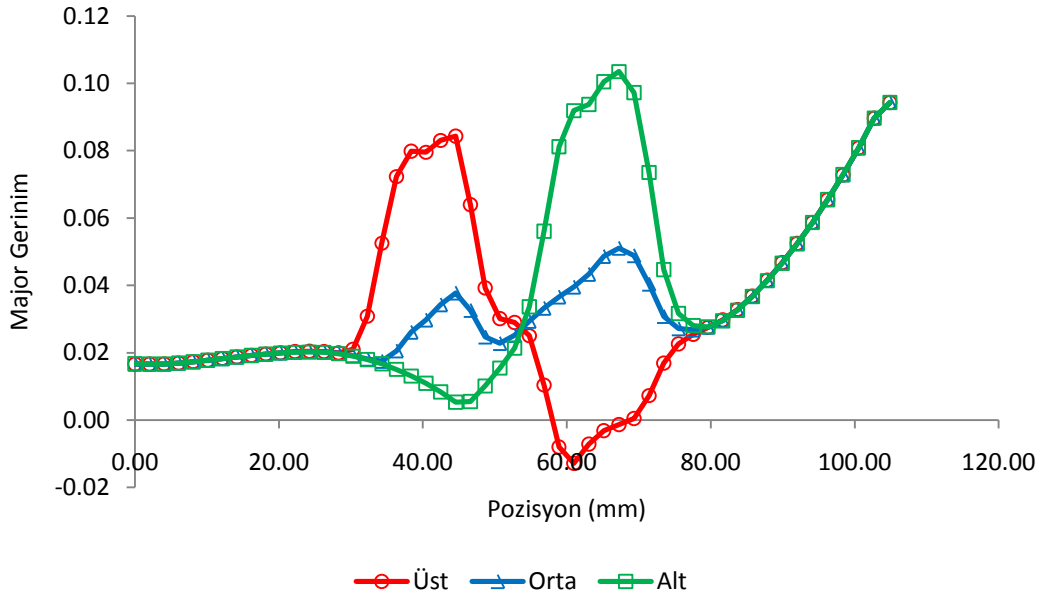
Majör Gerinim / Pozisyon Grafiği



Şekil B.2 – Kesit 1 – Majör Gerinim / Pozisyon Grafiği

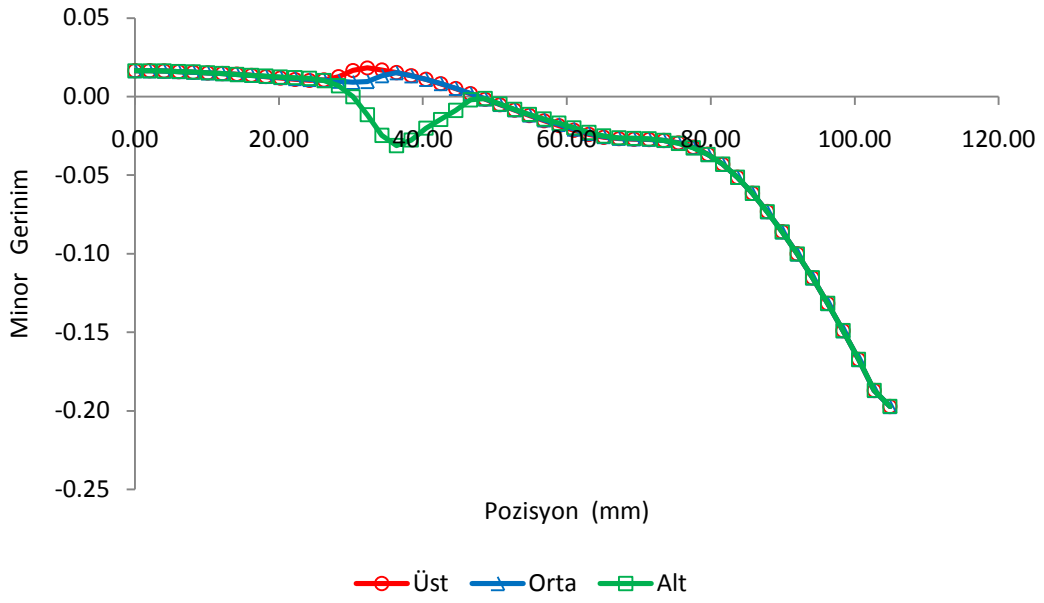


Şekil B.3 – Kesit 2 – Majör Gerinim / Pozisyon Grafığı

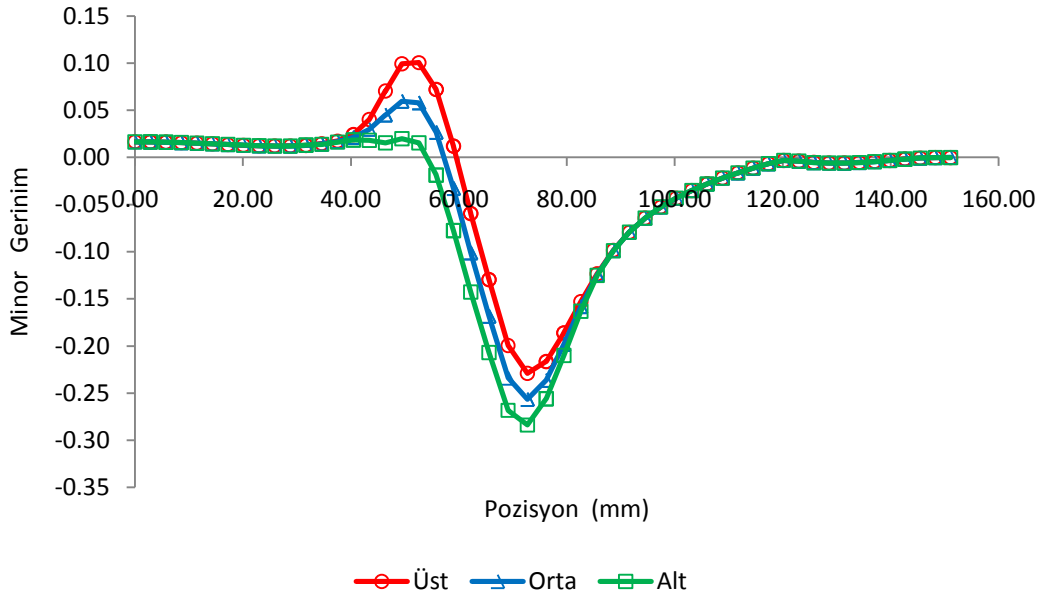


Şekil B.4 – Kesit 3 – Majör Gerinim / Pozisyon Grafığı

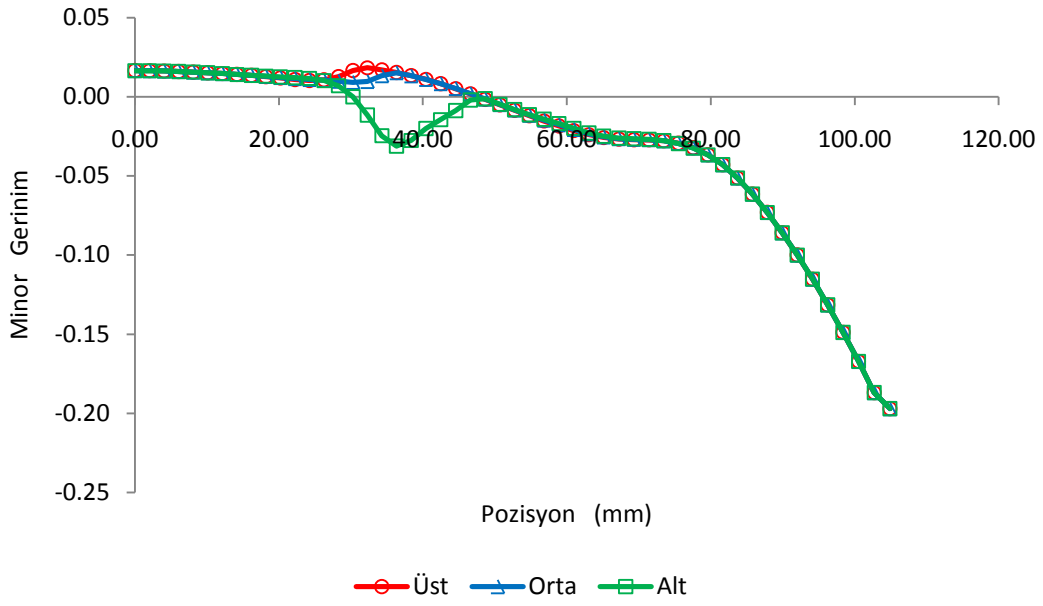
Minör Gerinim / Pozisyon Grafiği



Şekil B.5 – Kesit 1 – Minör Gerinim / Pozisyon Grafiği

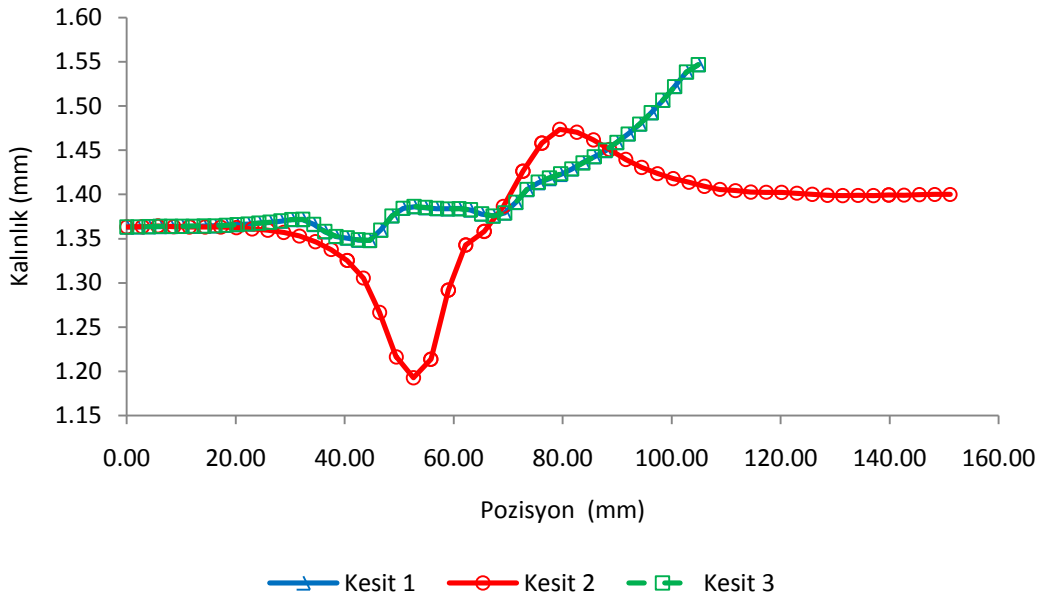


Şekil B.6 – Kesit 2 – Minör Gerinim / Pozisyon Grafiği

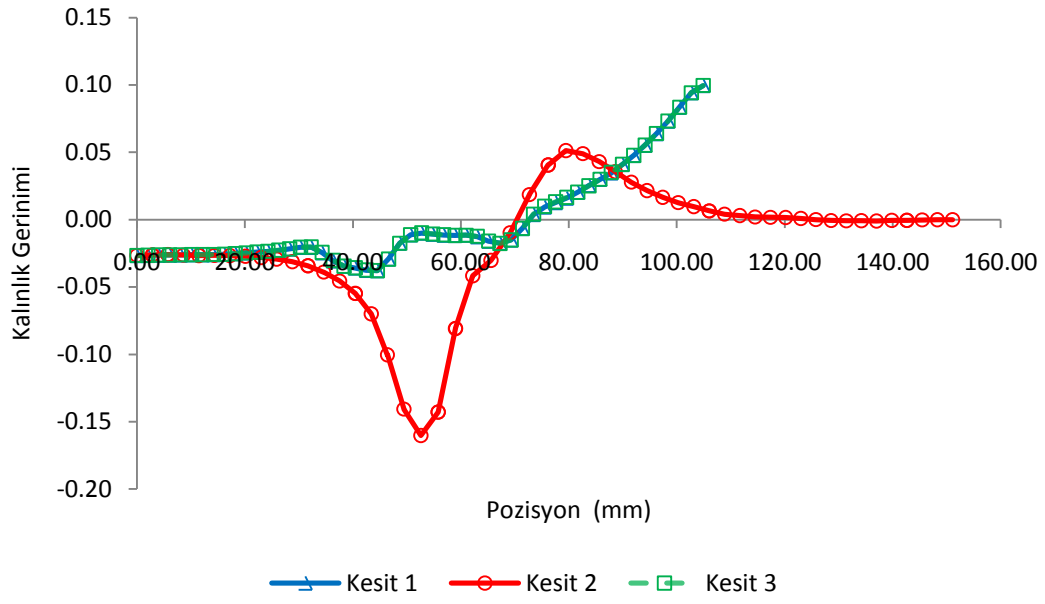


Şekil B.7 – Kesit 3 – Minör Gerinim / Pozisyon Grafiği

Kalınlık / Pozisyon, Kalınlık Gerinimi / Pozisyon Grafikleri

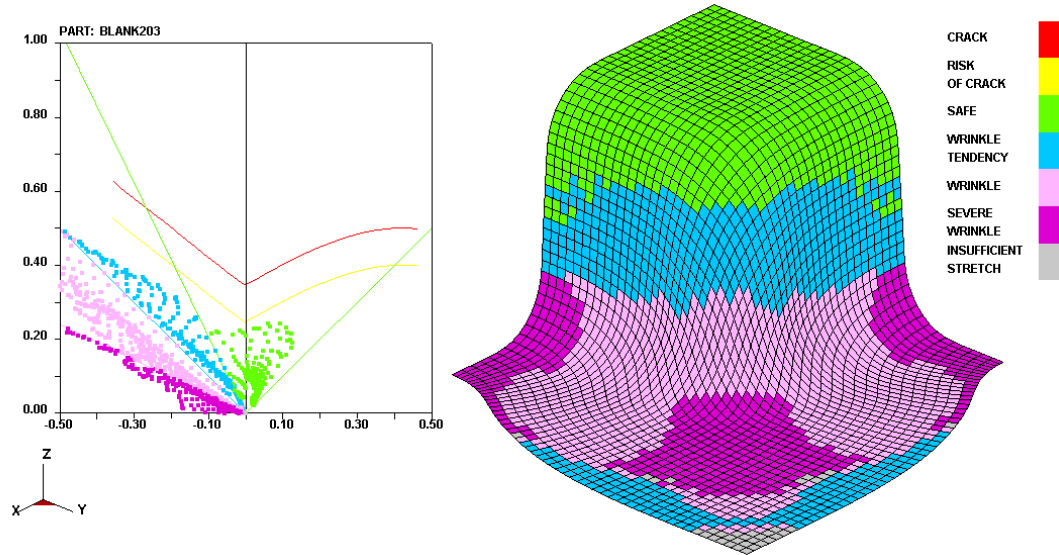


Şekil B.8 – Kalınlık / Pozisyon Grafiği



Şekil B.9 – Kalınlık Gerinimi / Pozisyon Grafiği

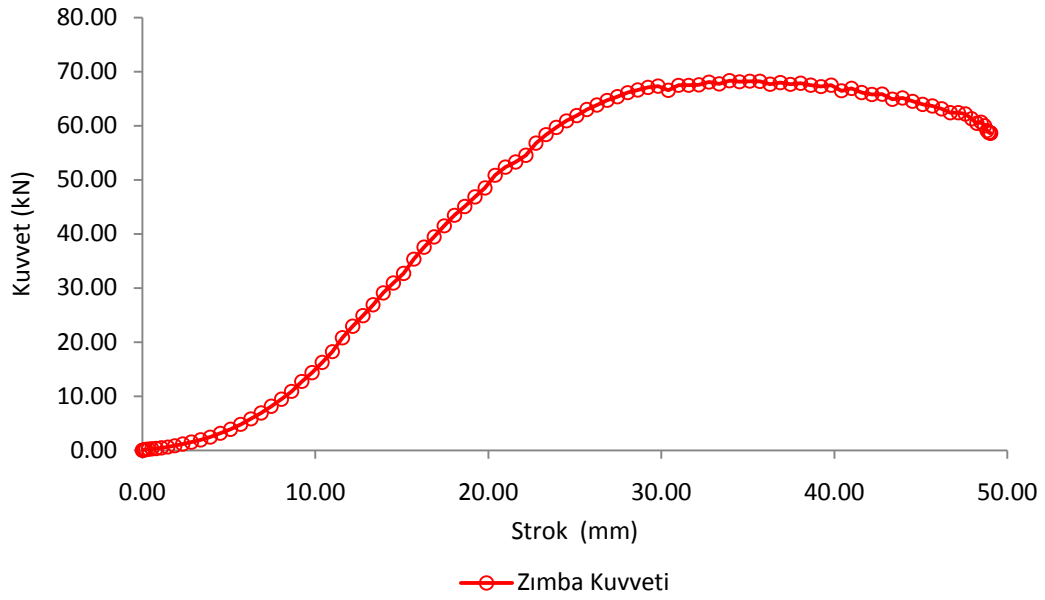
Şekillendirme Sınır Grafiği (ŞSG)



Şekil B.10 – Deneysel ŞSE Göre Şekillendirme Sınır Grafiği

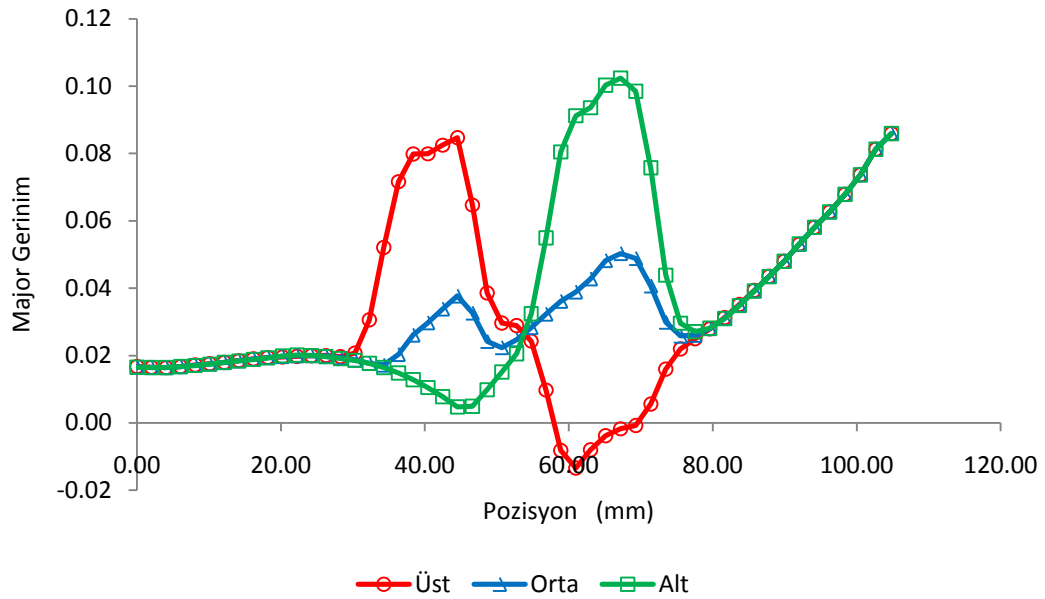
Model 2

Erkek Kalıp Kuvvet / Strok Grafiği

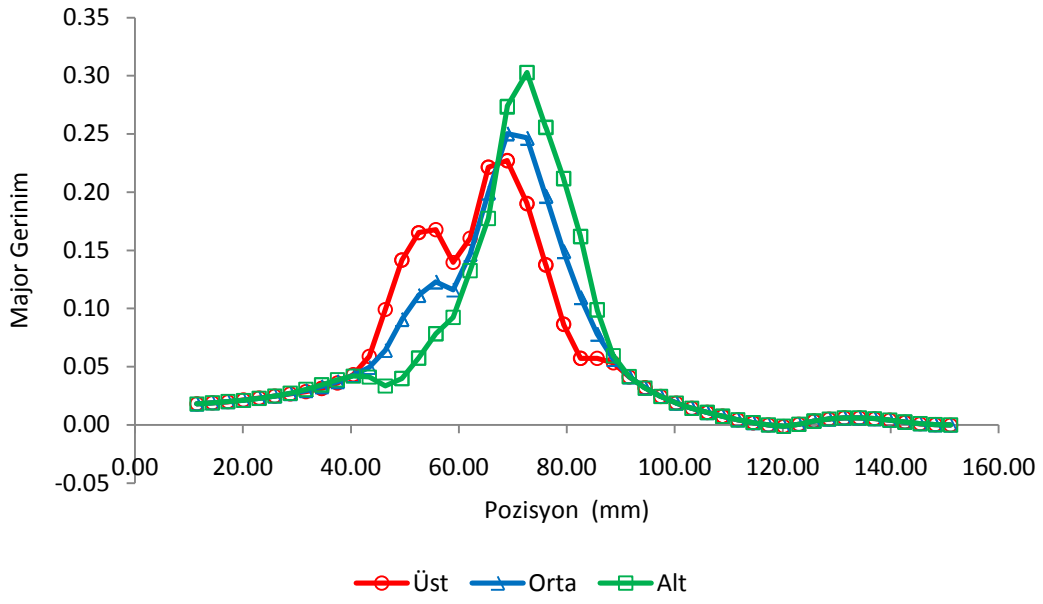


Şekil B.11 – Erkek Kalıp Kuvvet / Strok Grafiği

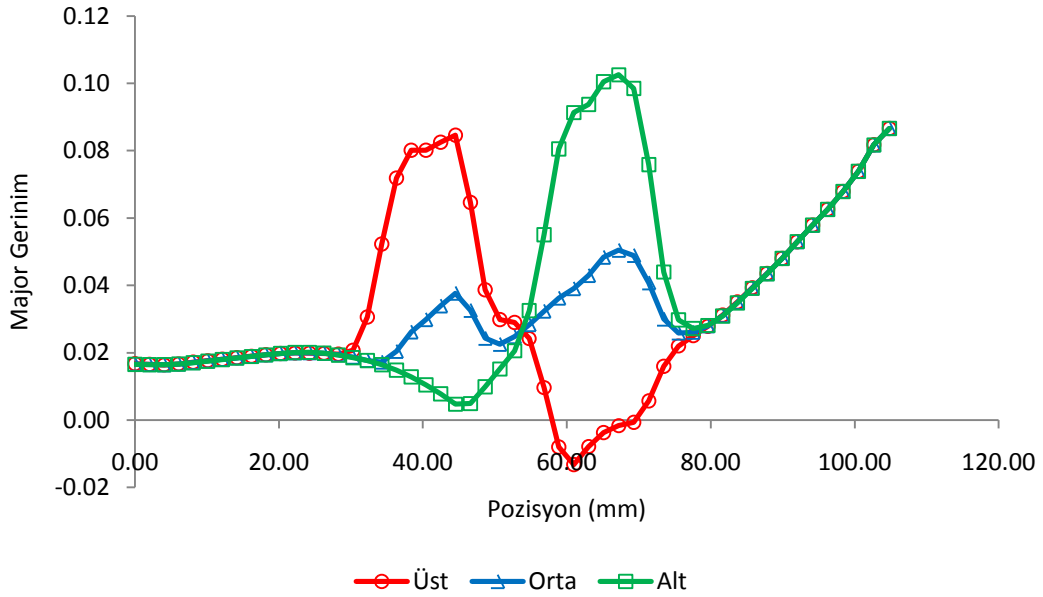
Majör Gerinim / Pozisyon Grafiği



Şekil B.12 – Kesit 1 – Majör Gerinim / Pozisyon Grafiği

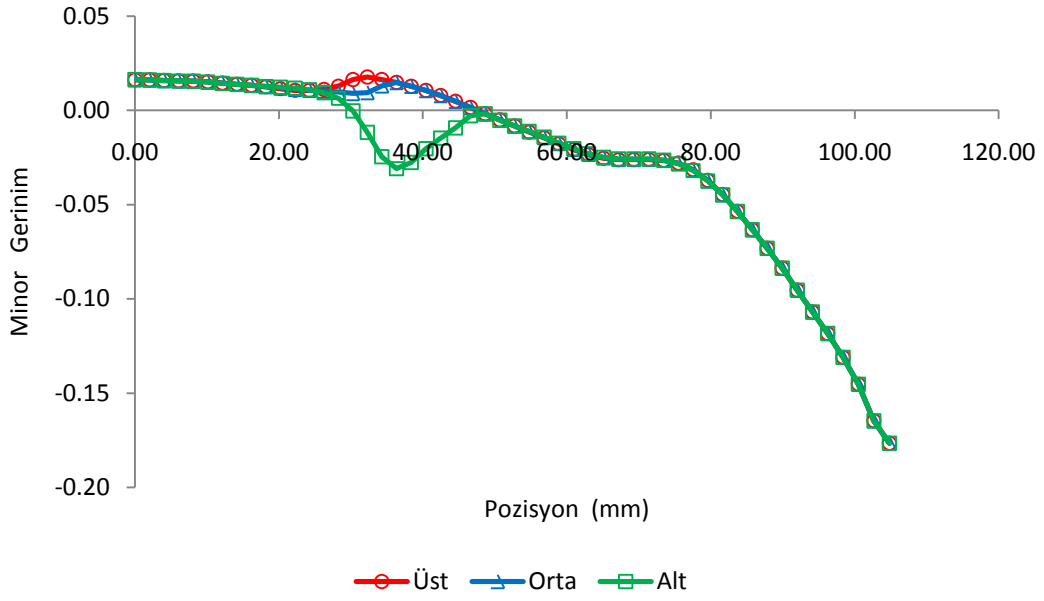


Şekil B.13 – Kesit 2 – Majör Gerinim / Pozisyon Grafiği

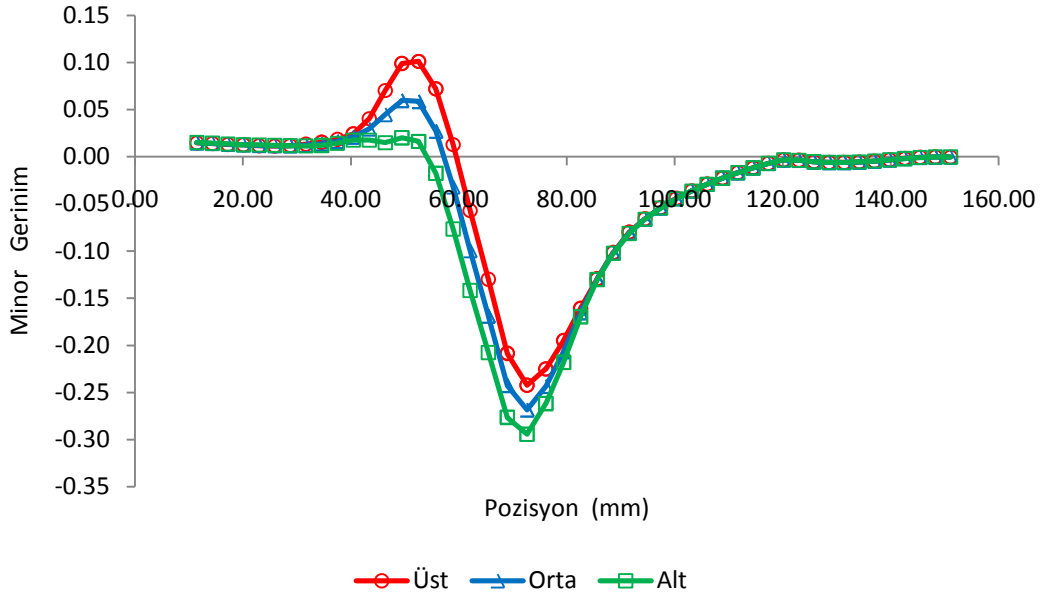


Şekil B.14 – Kesit 3 – Majör Gerinim / Pozisyon Grafiği

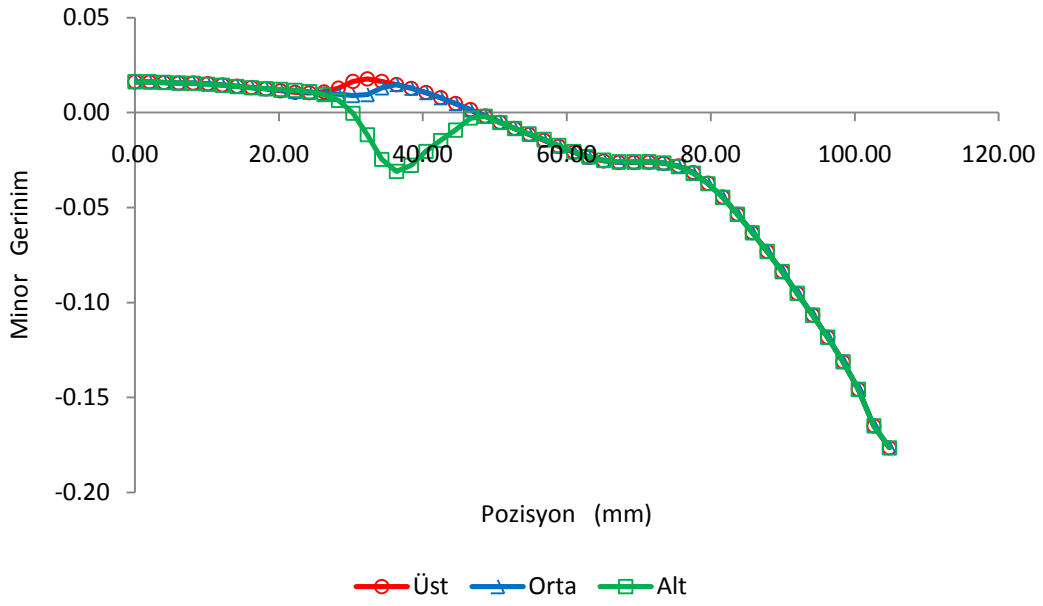
Minör Gerinim / Pozisyon Grafiği



Şekil B.15 – Kesit 1 – Minör Gerinim / Pozisyon Grafiği

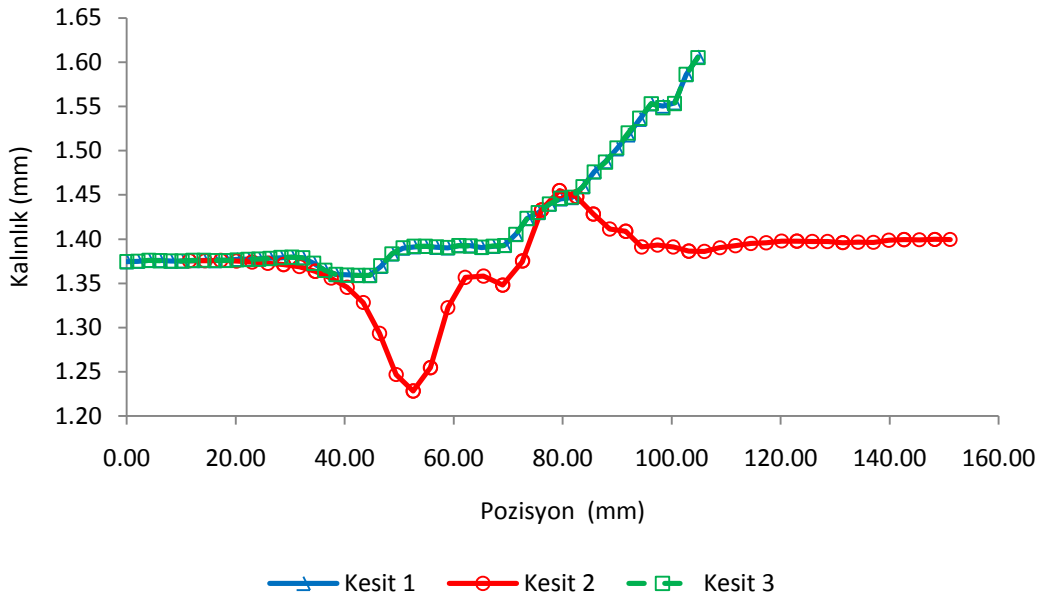


Şekil B.16 – Kesit 2 – Minör Gerinim / Pozisyon Grafiği

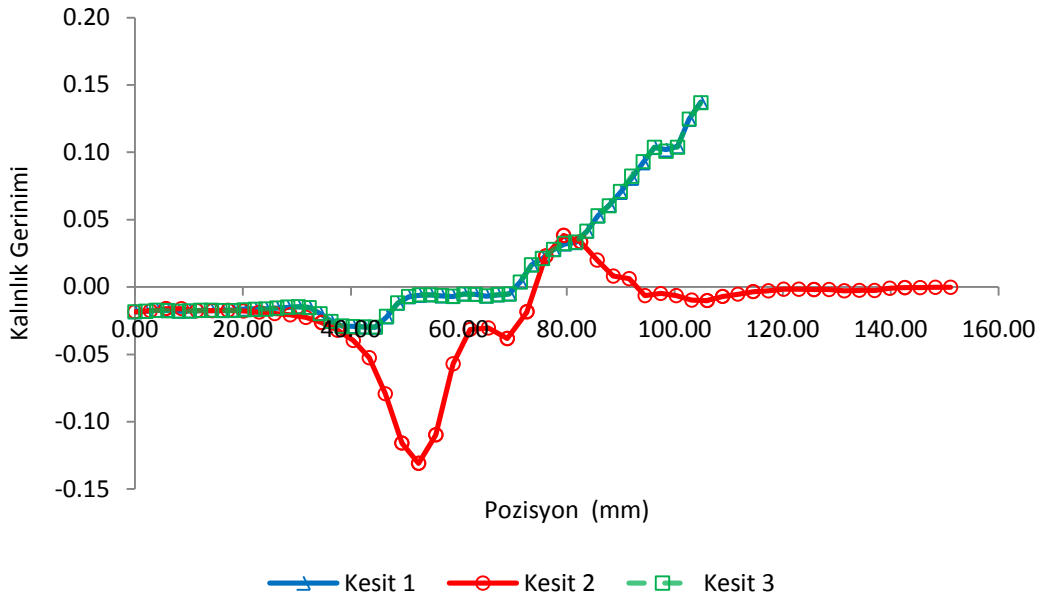


Şekil B.17 – Kesit 3 – Minör Gerinim / Pozisyon Grafiği

Kalınlık / Pozisyon, Kalınlık Gerinimi / Pozisyon Grafikleri

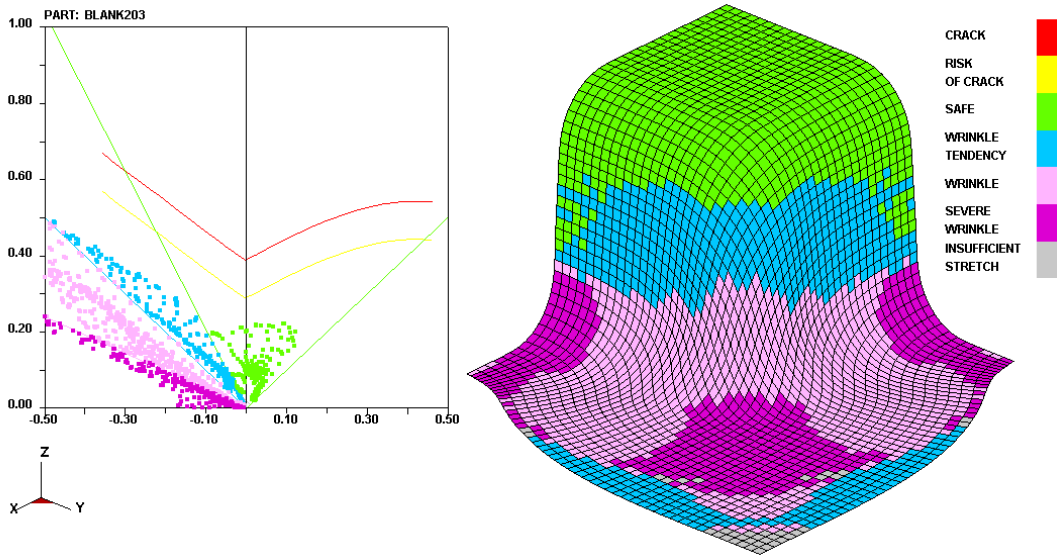


Şekil B.18 – Kalınlık / Pozisyon Grafiği



Şekil B.19 – Kalınlık Gerinimi / Pozisyon Grafiği

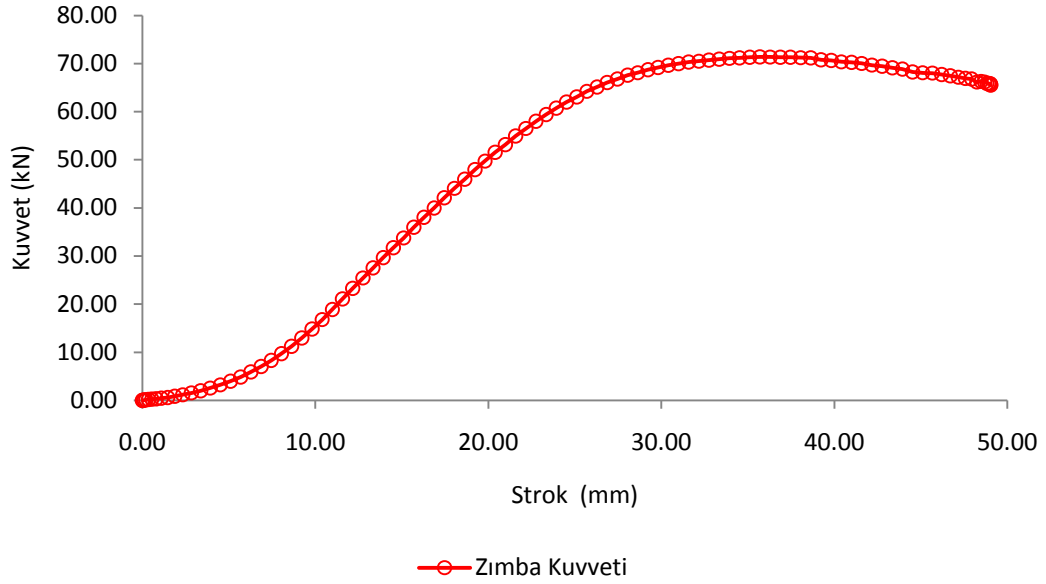
Şekillendirme Sınır Grafiği (ŞSG)



Şekil B.20 – Deneysel ŞSE Göre Şekillendirme Sınır Grafiği

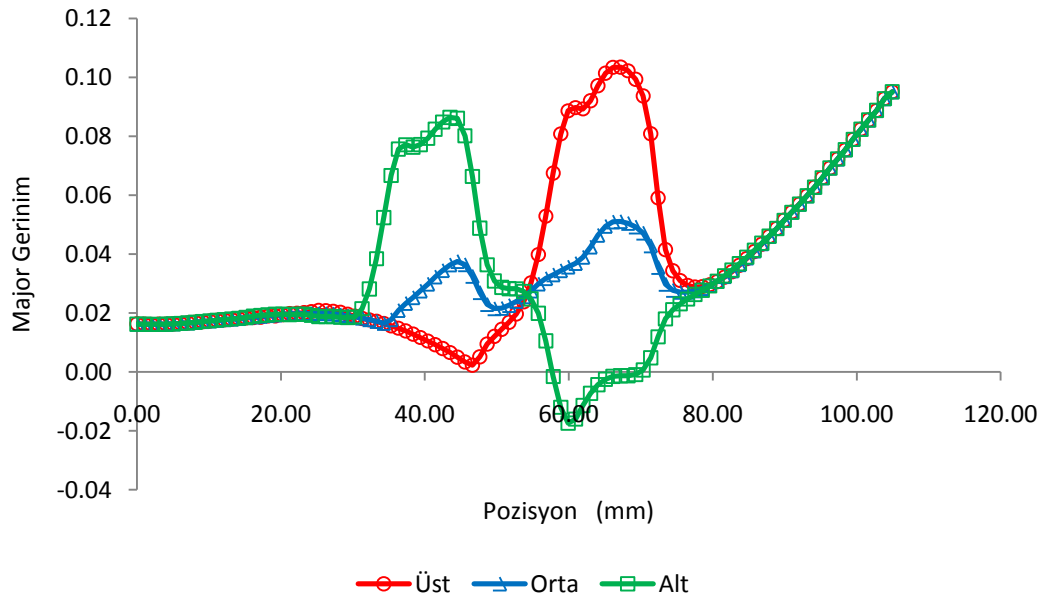
Model 3

Erkek Kalıp Kuvvet / Strok Grafiği

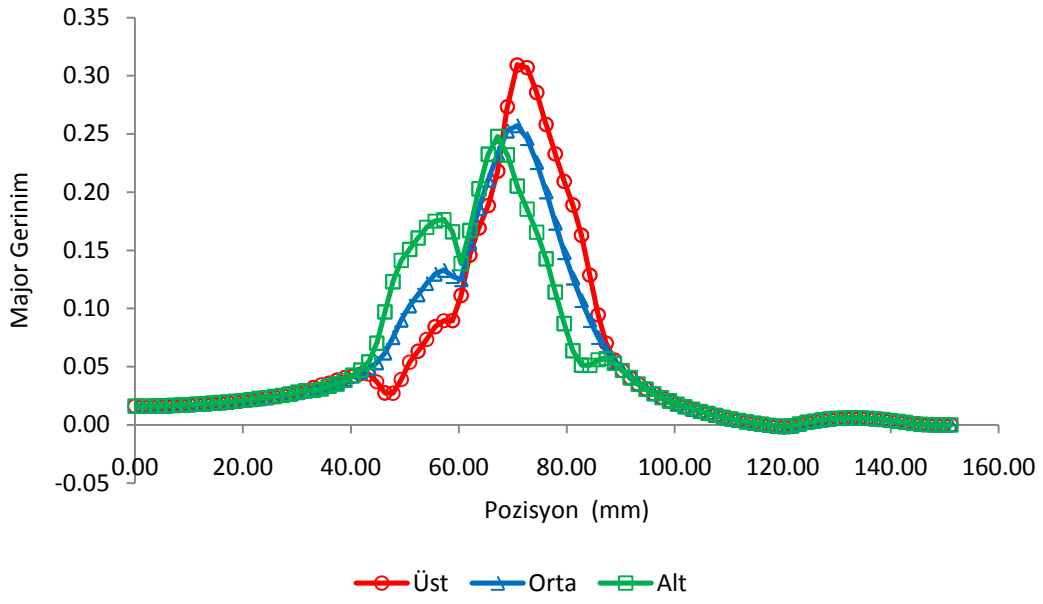


Şekil B.31 – Erkek Kalıp Kuvvet / Strok Grafiği

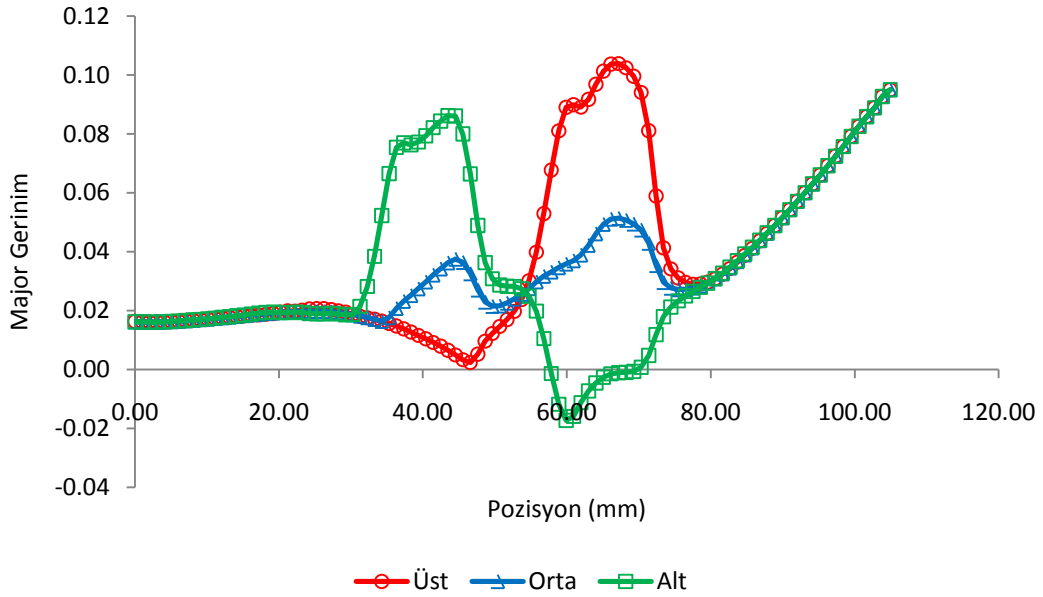
Majör Gerilim / Pozisyon Grafiği



Şekil B.32 – Kesit 1 – Majör Gerilim / Pozisyon Grafiği

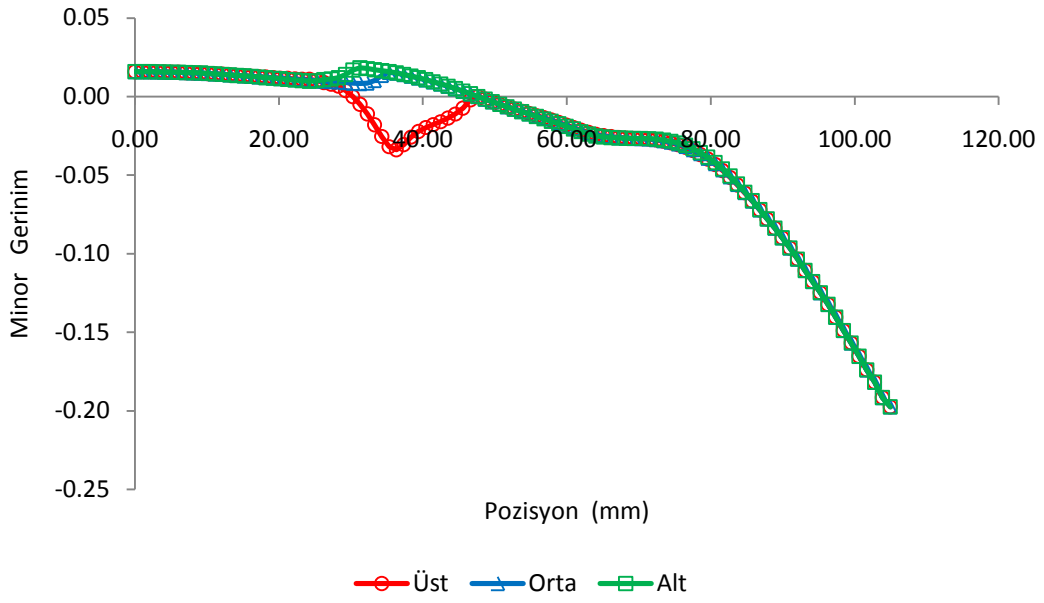


Şekil B.33 – Kesit 2 – Majör Gerinim / Pozisyon Grafiği

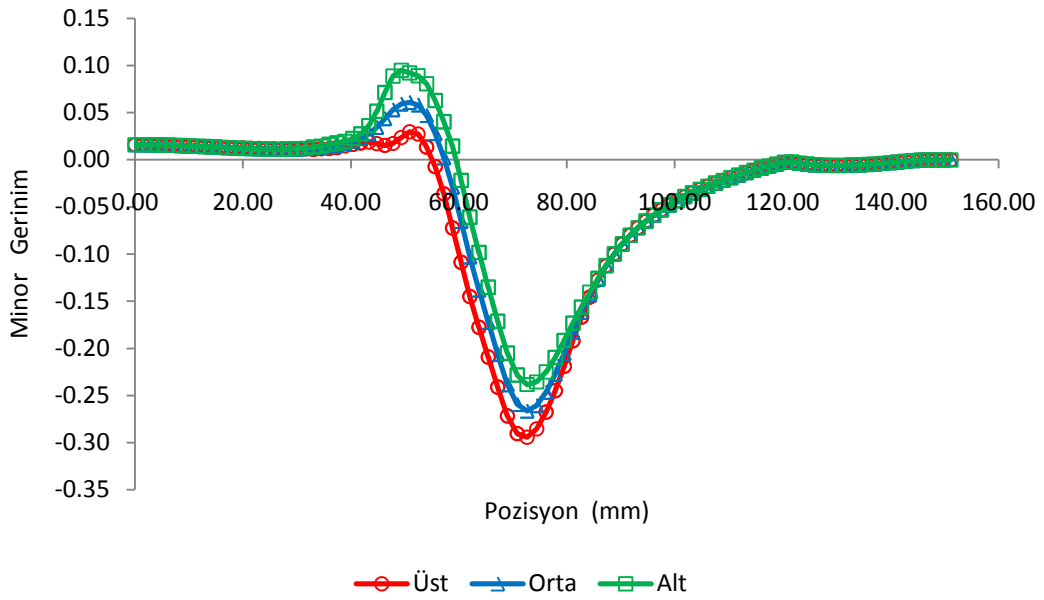


Şekil B.34 – Kesit 3 – Majör Gerinim / Pozisyon Grafiği

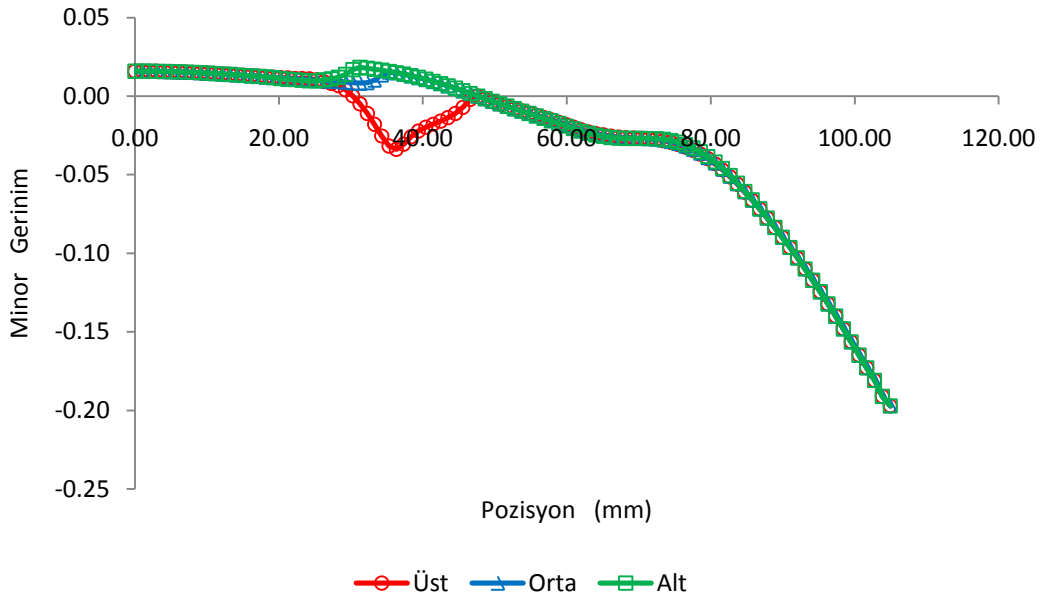
Minör Gerilim / Pozisyon Grafiği



Şekil B.35 – Kesit 1 – Minör Gerilim / Pozisyon Grafiği

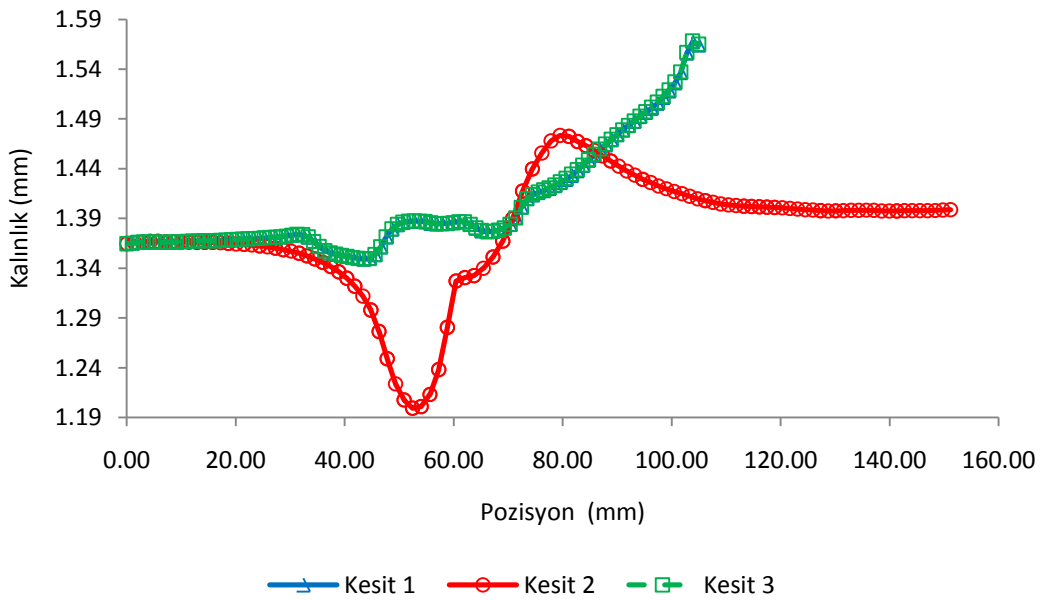


Şekil B.36 – Kesit 2 – Minör Gerilim / Pozisyon Grafiği

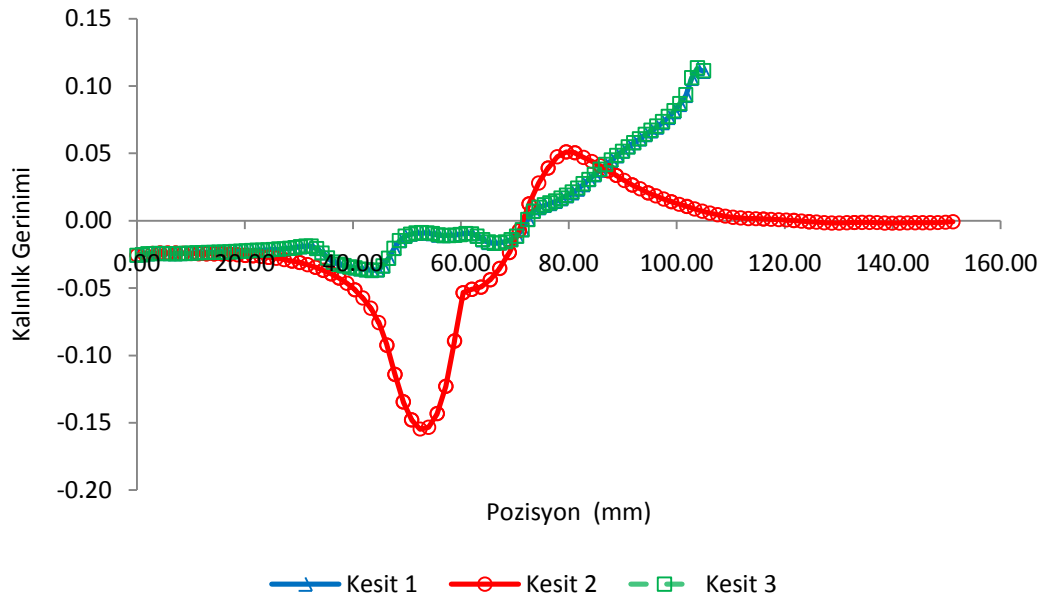


Şekil B.37 – Kesit 3 – Minör Gerinim / Pozisyon Grafiği

Kalınlık / Pozisyon, Kalınlık Gerinimi / Pozisyon Grafikleri

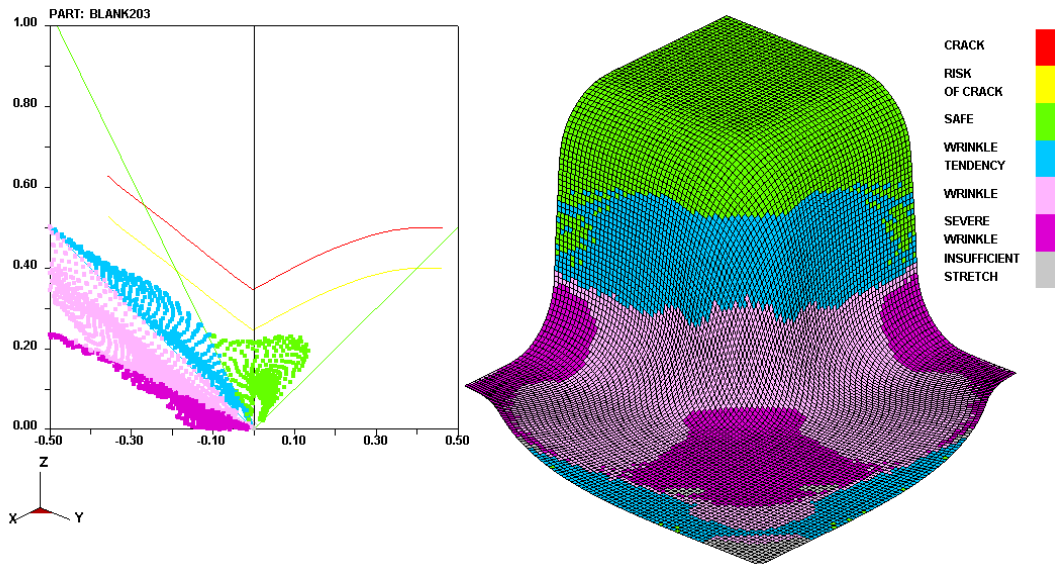


Şekil B.38 – Kalınlık / Pozisyon Grafiği



Şekil B.39 – Kalınlık Gerinimi / Pozisyon Grafiği

Şekillendirme Sınır Grafiği (ŞSG - FLD)



Şekil B.40 – Deneysel ŞSE Göre Şekillendirme Sınır Grafiği

ÖZGEÇMİŞ

Mustafa AKPINAR, 1983 yılında Sakarya’ da doğdu. 1994 yılında Figen Sakallıoğlu Anadolu Lisesi öğrencisi oldu. 7 yıl süren orta ve lise öğreniminden sonra 2001 yılı Sakarya Üniversitesi, Makina Mühendisliği bölümünü kazandı. Aynı bölümden 2006 yılında mezun oldu. 2007 yılında Yüksek Lisans programına başlamaya hak kazandı. Ford Tool & Die ve Coşkunöz Metal Form firmalarının Tübitak projelerinde araştırma mühendisi olarak çalışmaktadır. Halen eğitimine devam etmektedir.