

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

DERİN ÇEKME İŞLEMİNİN SİMÜLASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Gökhan ÖZÇELİK

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : MAKİNE TASARIM VE İMALAT
Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Erdal KARADENİZ

Haziran 2008

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DERİN ÇEKME İŞLEMİNİN SİMÜLASYONU

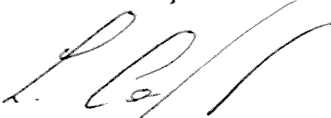
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Gökhan ÖZÇELİK

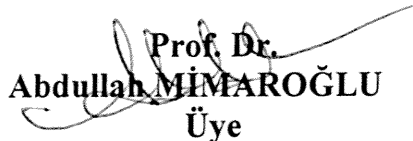
Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : MAKİNA TASARIM VE İMALAT

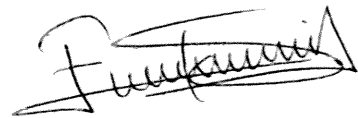
Bu tez 02 / 06 /2008 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.



**Prof. Dr.
Levon ÇAPAN
Jüri Başkanı**



**Prof. Dr.
Abdullah MİMAROĞLU
Üye**



**Yrd. Doç. Dr.
Erdal KARADENİZ
Üye**

Bu alışma, Sakarya Üniversitesi BAPK tarafından 2007.50.01.004 proje numarası ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Günümüzde üretilecek parçalar için form geliştirme yüzeylerinin uygunluğunun %99 oranında tasarım aşamasında çözülmesi istenmektedir. Çünkü tasarım aşamasında gözden kaçırılacak, sac kalınlığında incelme veya kırışma gibi bir durumun imalat safhasında çözümü onlarca kat pahalıya mal olabilir. Hatta üretilen kalıbın hiç bir şekilde kullanılmaması durumu ile karşı karşıya kalınabilir. Sac form simülasyonları için genel amaçlı simülasyon programları yerine farklı konularda özelleştirilen programlar kullanılmaktadır. Çünkü bu tür programlarda istenilen özellik için çok daha fazla çalışma yapılabilen ve kullanıcıların karşılaştıkları sorunlar için çözüm metodları geliştirilebilmektedir. Sac form simülasyon programlarında sacın incelmesi, kırışma bölgeleri, değerleri, yırtılmalar ve geri - yaylanma bölgeleri belirlenebilir.

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde yardımlarını esirgemeyen yüksek lisans danışmanım Yrd. Doç. Dr. Erdal Karadeniz'e teşekkürlerimi sunarım.

Yardımlarını esirgemeyen EKOL Makine Kalıp San. Tic. Ltd. Şti. Genel Müdürü Sadık Arslan'a, çekme deneylerinin gerçekleştirilmesi için laboratuvar imkanlarını sağlayan SAÜ Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi Bölümü öğretim üyelerinden Doç. Dr. Mehmet Sarıbyık'a ayrı ayrı teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmayı gerçekleştirecek aşamaya gelmemde emeği geçen tüm hocalarıma ve aileme ayrı ayrı teşekkürü borç bilirim.

Gökhan ÖZÇELİK

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
SUMMARY	xiv
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	
DERİN ÇEKME YÖNTEMİ	7
2.1. Yöntem	7
2.1.1. Derin çekme işleminde kullanılan kalıp elemanları.....	9
2.1.1.1. Üst kalıp tablası	9
2.1.1.2. Alt kalıp tablası	9
2.1.1.3. Istampası.....	10
2.1.1.4. Matris.....	10
2.1.1.5. Pot çemberi	10
2.1.1.6. İtici tij milleri	10
2.1.2. Çekme donanımları	10
2.1.2.1. Presler	10
2.1.2.2. Pot çemberi	11
2.1.2.3. Federler	11
2.1.2.4. Kalıplar.....	12

2.1.3. Derin çekme işlemi aşamalarında oluşan gerilmeler	12
2.2. Derin Çekmeyi Etkileyen Değişkenler	13
2.2.1. İşlem değişkenleri	13
2.2.1.1. Çekme hızı	15
2.2.1.2. Pot çemberi basıncı	16
2.2.1.3. Kalıp geometrisi	19
2.2.1.4. Sac parça geometrisi	21
2.2.1.5. Yağlama	21
2.2.1.6. Çekme boşluğu	25
2.2.2. Malzeme değişkenleri	26
2.2.2.1. Pekleşme üsteli “n”	26
2.2.2.2. Birim şekil değiştirme hızı duyarlılığı “m”	28
2.2.2.3. Anizotropi katsayısı “r”	29
2.2.2.4. Akma dayanımı	32
2.2.2.5. Sac kalınlığı ve tane boyutu	32
2.2.2.6. Elastisite modülü	34
2.2.2.7. Kalıntı gerilmeler	34
2.2.2.8. Geri yaylanma	34
2.2.2.9. Malzemenin kimyasal bileşiminin biçimlendirmeye etkisi	35
BÖLÜM 3.	
NÜMERİK ANALİZ	42
3.1. Sonlu Elemanlar Metodu	37
3.1.1. Sonlu elemanlar yöntemine giriş ve temel kavramlar	38
3.1.2. Sonlu elemanların matematiği	45
3.1.3. İmpilisit ve eksplisit yöntemler	50
3.1.3.1. Eksplisit yöntemler	51
3.1.3.2. İmpilisit zaman integrasyonu	52
3.1.3.3. Eksplisit zaman integrasyonu	53
3.1.3.4. Eksplisit yöntemin avantajları	55
3.1.3.5. Stabilite limiti	55
3.1.3.6. Kritik zaman basamağının büyüklüğü	55

3.1.3.7. Ls-Dyna'da zaman basamağı büyüklüğü.....	56
3.1.3.8. İmpilisit programlarda izlenen prosedürler	57
3.1.3.9. Ekspilisit programlarda izlenen prosedürler	58
3.1.3.10. Ekspilisit zaman integrasyonunda elemanlar	58
3.1.3.11. Kum saati durumları	59
3.1.3.12. Ekspilisit zaman integrasyonu için elemanlar.....	60
3.1.3.13. Ekspilisit dinamik analizde modelleme.....	61
3.1.3.14. İmpilisit ve ekspilisit yöntemlerin hesaplama süresine etki eden faktörler	61
3.1.3.15. İmpilisit ve ekspilisit yöntemlerde kullanıcının etki edebileceği faktörler	62
3.2. Simülasyonun Kullanımı	62
3.2.1. Akademik ve ticari yazılımlara genel bakış	62
3.2.2. Sac metal form işlemlerinde simülasyonun kullanılması..	65
BÖLÜM 4.	
DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	71
4.1. Deney Malzemesinin İncelenmesi	71
4.2. Çekme Deneyi Çalışmaları	71
4.3. Kalıp Sistemi ve Çalışması	73
4.4. Dynaform'da Sonlu Elemanlar Çalışmaları	75
4.5. İncelenen Parametreler	85
BÖLÜM 5.	
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	87
5.1. Çekme Deneyi Sonuçlar	87
5.2. Sonlu Elemanlar Metodu Sonuçları.....	89
5.2.1. Hız=50mm/s ve radyüs=4mm'deki kalınlık değişimi ve hasar sonuçları	90
5.2.2. Hız=30mm/s ve radyüs=4mm'deki kalınlık değişimi ve hasar sonuçları	92
5.2.3. Hız=10mm/s ve radyüs=4mm'deki kalınlık değişimi ve hasar sonuçları.....	94

5.2.4. Hız=50mm/s ve radyüs=6mm'deki kalınlık değişimi ve hasar sonuçları	98
5.2.5. Hız=30mm/s ve radyüs=6mm'deki kalınlık değişimi ve hasar sonuçları	102
5.2.6. Hız=10mm/s ve radyüs=6mm'deki kalınlık değişimi ve hasar sonuçları	106
5.2.7. Hız=50mm/s ve radyüs=8mm'deki kalınlık değişimi ve hasar sonuçları	116
5.2.8. Hız=30mm/s ve radyüs=8mm'deki kalınlık değişimi ve hasar sonuçları	123
5.2.9. Hız=10mm/s ve radyüs=8mm'deki kalınlık değişimi ve hasar sonuçları	129
5.2.10. İstampa radyüsü, çekme hızı ve derin çekme yüksekliği hasar durumu sonuçları.....	136
5.3. Tartışma	136
BÖLÜM 6.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	141
6.1. Sonuçlar	141
6.2. Öneriler	142
KAYNAKLAR	143
ÖZGEÇMİŞ	146

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

E	: Elastisite modülü
e	: Birim şekil değiştirme
ϵ	: Gerçek birim şekil değiştirme
F	: Kuvvet
K	: Mukavemet katsayısı
l	: Numune boyu
n	: Pekleşme üssü
m	: Gerinim hızı duyarlılığı
σ	: Gerçek gerilme
σ_y	: Akma gerilmesi
τ	: Kayma gerilmesi
G	: Kayma modülü
μ	: Sürtünme katsayısı
P	: Basınç
V	: Hacim
m	: Kütle
Δl	: Birim uzama
ν	: Malzemeye ait poisson oranı
B	: Şekil fonksiyonlarının türevlerini içeren matris
D	: Malzeme özellikleri matrisi
G	: Eleman genişliği
U	: Yer değiştirme vektörü
Q	: Kuvvet vektörü
t	: Zaman
ü	: İvme

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Derin çekme işlemi öncesi.....	7
Şekil 2.2.	Derin çekme işlemi sonrası	7
Şekil 2.3	Derin çekme işleminden çıkan dikdörtgenel iş parçası	8
Şekil 2.4	Basit bir form kalıbının bölümleri.....	9
Şekil 2.5	Düz bir sacın form verilme adımları	12
Şekil 2.6.	Form sonu	13
Şekil 2.7.	Çeşitli çelik sınıfları için çatlak ve kırışıklıklara pot çemberi kuvvetinin etkisi	17
Şekil 2.8	Çapak bölgesinde çatlak oluşumu.....	21
Şekil 2.9.	Şekillendirme diyagramı üzerinde yağlamanın etkisi	23
Şekil 2.10.	Çekme boşluğu	25
Şekil 2.11.	Mühendislik ve gerçek gerilme-b.ş.d. diyagramı	27
Şekil 2.12.	Pekleşme üsteli “n” değerinin hesaplanması	27
Şekil 2.13.	Farklı b.ş.d. hızı ile yapılan deneylerden ”m” nin tayini	29
Şekil 2.14.	Derin çekme işleminde düzlemsel anizotropi katsayısına bağlı kulak oluşumu	32
Şekil 2.15.	Çeşitli levhalar için Erichsen kap yüksekliği ile levha kalınlığı arasındaki ilişki	33
Şekil 2.16.	Malzeme kalınlığının % uzama değeriyle değişimi	34
Şekil 3.1.	Fiziksel model	37
Şekil 3.2.	Sonlu elemanlar modeli	37
Şekil 3.3.	Bi–lineer dört köşe elaman için interpolasyon fonksiyonları	46
Şekil 3.4.	Gerilme birim şekil değiştirme grafiği	47
Şekil 3.5.	Dış yük yer değiştirme	47
Şekil 3.6.	Hata oluşumu	48
Şekil 3.7.	İterasyon yaklaşımı	49

Şekil 3.8.	Yük basamakları	49
Şekil 3.9.	Zaman basamakları	50
Şekil 3.10.	Yük ve zaman değişimi	50
Şekil 3.11.	İvme-zaman grafiği	52
Şekil 3.12.	Yer değiştirme zaman grafiği	53
Şekil 3.13.	Kabuk elemanın kenar numaraları	57
Şekil 3.14.	Kum saati hatasının şekil ile gösterimi	59
Şekil 3.15.	Katı ağ yapısının kum saati durumu.....	59
Şekil 3.16.	Kabuk elaman tipleri ve hatalar.....	61
Şekil 3.17.	Incremental form simülasyonu için gerekli girdi verileri	68
Şekil 3.18.	Prototip kalıpların yapılmasında incremental form simülasyonu kullanılırsa zaman ve maliyet	69
Şekil 3.19.	Form simülasyonlarının kalıp imalatındaki konumu	70
Şekil 4.1.	ALŞA marka çekme cihazı	72
Şekil 4.2.	Çekme deneyi numunesi.....	73
Şekil 4.3.	Kalıp sistemi	73
Şekil 4.4.	Dynaform programının genel ekran görüntüsü	76
Şekil 4.5.	Birim sistem menüsü	76
Şekil 4.6.	Sistemin hareket doğrultusu	77
Şekil 4.7.	Temas tanımlama menüsü	77
Şekil 4.8.	NX5'deki parça datalarının dynaform'a import edilmesi	78
Şekil 4.9.	Parçanın mesh edilmesi	79
Şekil 4.10.	Parçanın ağ yapısı	79
Şekil 4.11.	Kalıp sisteminin ağ yapısı	80
Şekil 4.12.	Matris kalıbın tanıtılması	80
Şekil 4.13.	Matris kalıp temas tipi	81
Şekil 4.14.	Hareketli kalıp temas parametreleri	81
Şekil 4.15.	Matrisin hareket eğrisi	82
Şekil 4.16.	Analizi yapılacak parçanın malzeme tanımlama menüsü	82
Şekil 4.17.	Blank (sac) malzemesinin özelliklerinin girilmesi.....	83
Şekil 4.18.	Sacın özelliğinin girilmesi.....	83
Şekil 4.19.	Sac kalınlığı ve kayma gerilmesi anımlama menüsü.....	84
Şekil 4.20.	Analiz menüsü.....	84

Şekil 5.1.	Kuvvet-uzama eğrisi.....	87
Şekil 5.2.	Gerçek gerilme - gerçek birim şekil değişimi eğrisi.....	88
Şekil 5.3.	Hız = 50 mm/s ve radyüs = 4 mm'deki hasar başlangıcı sonuçları (h = 18,7 mm).....	90
Şekil 5.4.	18,6 mm'deki kalınlık değişimi sonuçları.....	91
Şekil 5.5.	Hız = 30 mm/s ve radyüs = 4 mm'deki hasar başlangıcı sonuçları (h = 21,6 mm).....	92
Şekil 5.6.	18,6 mm'deki kalınlık değişimi sonuçları.....	93
Şekil 5.7.	Hız = 10 mm/s ve radyüs = 4 mm'deki hasar başlangıcı sonuçları (h = 24,7 mm).....	94
Şekil 5.8.	18,6 mm'deki kalınlık değişimi sonuçları.....	95
Şekil 5.9.	Derin çekme hızının en büyük kalınlık azalmasına etkisi.....	97
Şekil 5.10.	Derin çekme hızının hasarsız en büyük derin çekme yüksekliğine etkisi.....	97
Şekil 5.11.	Hız = 50 mm/s ve radyüs = 6 mm'deki hasar başlangıcı sonuçları (h = 31 mm).....	99
Şekil 5.12.	18,6 mm'deki kalınlık değişimi sonuçları.....	100
Şekil 5.13.	31 mm'deki kalınlık değişimi sonuçları.....	101
Şekil 5.14.	Hız = 30 mm/s ve radyüs = 6 mm'deki hasar başlangıcı sonuçları (h = 37,1 mm).....	102
Şekil 5.15.	18,6 mm'deki kalınlık değişimi sonuçları.....	103
Şekil 5.16.	31 mm'deki kalınlık değişimi sonuçları.....	104
Şekil 5.17.	37,2 mm'deki kalınlık değişimi sonuçları.....	105
Şekil 5.18.	Hız = 10 mm/s ve radyüs = 6 mm'deki hasar durumu sonuçları (h = 43,4 mm).....	107
Şekil 5.19.	Hız = 10 mm/s ve radyüs = 6 mm'de hasar yoktur.....	108
Şekil 5.20.	18,6 mm'deki kalınlık değişimi sonuçları.....	109
Şekil 5.21.	31 mm'deki kalınlık değişimi sonuçları.....	110
Şekil 5.22.	37,2 mm'deki kalınlık değişimi sonuçları.....	111
Şekil 5.23.	43,4 mm'deki kalınlık değişimi sonuçları.....	112
Şekil 5.24.	Derin çekme hızının en büyük kalınlık azalmasına etkisi.....	114
Şekil 5.25.	Derin çekme yüksekliğinin en büyük kalınlık azalması değişimi.....	114

Şekil 5.26	Derin çekme hızının hasarsız en büyük derin çekme yüksekliğine etkisi.....	115
Şekil 5.27.	Hız = 50 mm/s ve radyüs = 8 mm'deki hasar durumu sonuçları (h = 43,4 mm).....	117
Şekil 5.28.	Hız = 50 mm/s ve radyüs = 8 mm'de hasar yoktur.....	118
Şekil 5.29.	18,6 mm'deki kalınlık değişimi sonuçları.....	119
Şekil 5.30.	31 mm'deki kalınlık değişimi sonuçları.....	120
Şekil 5.31.	37,2 mm'deki kalınlık değişimi sonuçları.....	121
Şekil 5.32.	43,4 mm'deki kalınlık değişim sonuçları.....	122
Şekil 5.33.	Hız = 30 mm/s ve radyüs = 8 mm'deki hasar durumu sonuçları (h = 43,4 mm).....	123
Şekil 5.34.	Hız = 30 mm/s ve radyüs = 8 mm'de hasar yoktur.....	124
Şekil 5.35.	18,6 mm'deki kalınlık değişimi sonuçları.....	125
Şekil 5.36.	31 mm'deki kalınlık değişimi sonuçları	126
Şekil 5.37.	37,6 mm'deki kalınlık değişimi sonuçları.....	127
Şekil 5.38.	43,4 mm'deki kalınlık değişimi sonuçları.....	128
Şekil 5.39.	Hız = 10 mm/s ve radyüs = 8 mm'deki hasar durumu (h = 43,4 mm).....	129
Şekil 5.40.	Hız = 10 mm/s ve radyüs = 8 mm'de hasar yoktur.....	130
Şekil 5.41.	18,6 mm'deki kalınlıkdeğişimi sonuçları.....	131
Şekil 5.42.	37,2 mm'deki kalınlık değişimi sonuçları.....	132
Şekil 5.43.	43,4 mm'deki kalınlık değişimi sonuçları.....	133
Şekil 5.44.	Derin çekme hızının en büyük kalınlık azalmasına etkisi.....	135
Şekil 5.45	Derin çekme yüksekliği en büyük kalınlık azalması değişimi.....	135
Şekil 5.46	Istampa radyüsü-kalınlık azalma ilişkisi.....	139
Şekil 5.47	Istampa radyüsü-hasarsız ürün yüksekliği ilişkisi.....	140

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1.	Farklı metallerin normal çekme hızları.....	16
Tablo 2.2.	Bazı malzemeler için pot çemberi basınçları.....	18
Tablo 2.3.	Düşük karbonlu çeliklerin derin çekilmesinde pot çemberi kuvvetleri.....	19
Tablo 2.4.	Düşük karbonlu çeliklerin pres altında formlanmasında yaygın olarak kullanılan yağlayıcılar.....	24
Tablo 3.1.	Mevcut ticari ve akademik yazılımlar.....	64
Tablo 4.1.	Deney malzemesi ERD 1314 için kimyasal analiz sonuçları.....	71
Tablo 4.2.	Deney parametreleri.....	75
Tablo 4.3.	İncelenen değişkenler.....	86
Tablo 5.1.	Çekme deneyinden elde edilen ve deneyde kullanılan malzeme özellikleri.....	88
Tablo 5.2.	4 mm ıstampa radyüsü - 10–30–50 mm/s derin çekme hızları en Büyük kalınlık azalması değerleri ve hasarsız en büyük derin çekme yükseklik değerleri sonuçları.....	96
Tablo 5.3.	6 mm ıstampa radyüsü - 10–30–50 mm/s derin çekme hızları ve farklı ürün yükseklikleri için en büyük kalınlık azalması değerleri ve hasarsız en büyük derin çekme yükseklik değerleri sonuçları..	113
Tablo 5.4.	8 mm ıstampa radyüsü - 10–30–50 mm/s derin çekme hızları ve farklı ürün yükseklikleri için en büyük kalınlık azalması değerleri sonuçları.....	134
Tablo 5.5.	Istampa radyüsü, derin çekme hızı ve derin çekme yüksekliği hasar durumu sonuçları.....	137

ÖZET

Anahtar kelimeler: derin çekme, sonlu elemanlar yöntemi, dikdörtgen kutular, kalıp tasarımı

0,6 mm kalınlıktaki ERD 1314 (DIN EN 10327) kalite galvanize kaplanmış çelik sac'dan dikdörtgen derin çekme ürünü için DYNAFORM sonlu elemanlar metodu simülasyonu çalışılmıştır. Bu çalışmada, 4 mm, 6mm ve 8 mm ıstampa radyüsü - 10 mm/s, 30 mm/s ve 50 mm/s derin çekme hızı değişkenlerinin en büyük kalınlık azalmasına ve hasarsız ürün yüksekliğine etkisi incelenmiştir.

Araştırma sonuçları; (1) 4 mm ıstampa radyüsü ile 10 mm/s derin çekme hızı kullanılarak 24 mm hasarsız ürün, 30 mm/s derin çekme hızı kullanılarak 21 mm hasarsız ürün, 50 mm/s derin çekme hızı kullanılarak 18 mm hasarsız ürün yükseklik değerlerinin, (2) 6 mm ıstampa radyüsü ile 10 mm/s derin çekme hızı kullanılarak 43,4 mm hasarsız ürün, 30 mm/s derin çekme hızı kullanılarak 37 mm hasarsız ürün, 50 mm/s derin çekme hızı kullanılarak 30 mm hasarsız ürün yükseklik değerlerinin, (3) 8 mm ıstampa radyüsü ile 10 mm/s - 30 mm/s - 50 mm/s derin çekme hızı değerleri kullanılarak 43,4 mm ürün yükseklik değerlerinin hasarsız elde edilebileceği şeklindedir.

THE SIMULATION OF THE DEEP-DRAWING

SUMMARY

Keywords: Deep-drawing, FEM, Rectangular boxes, Die design

The simulation of the deep-drawing of a rectangular box of coated galvanise ERD 1314 (DIN EN 10327) with the material of steel using the explicit DYNAFORM non-linear finite-element (FE) code has been investigated. In this research the effect of 4 mm, 6mm and 8 mm punch radii as well as 10 mm/s, 30 mm/s and 50 mm/s deep drawing speed variables on the maximum thickness decrease and on the undestructed product height, have been investigated.

The results shows indicate that: (1) With 4 mm punch radius and 10 mm/s deep drawing speed, 24 mm undestructed product with 30 mm/s deep drawing speed, 21 mm undestructed product, with 50 mm/s deep drawing speed, 18 mm undestructed product, (2) With 6 mm punch radius and 10 mm/s deep drawing speed, 43.4 mm undestructed product with 30 mm/s deep drawing speed, 37 mm undestructed product, with 50 mm/s deep drawing speed, 30 mm undestructed product, (3) With 8 mm punch radius and 10 mm/, 30 mm/s and 50 mm/s deep drawing speeds, 43.4 mm undestructed product, can be obtained.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Metalik sacların çekme kalıplarında soğuk deformasyon ile şekillendirmesi esasına dayanan bir imalat yöntemi olan derin çekme, özellikle otomotiv, havacılık, gıda sanayii gibi sektörlerde oldukça geniş bir uygulama alanına sahiptir. Otomobil kapısı, beyaz eşya parçaları, basınçlı tüp gibi, kap formuna sahip üç boyutlu elemanların tek parça halinde seri üretimi söz konusu olduğunda, imal usulü olarak genellikle derin çekme tercih edilmektedir. Ekonomik yaklaşım tarzının hemen her alanda egemen olduğu günümüzde, seri üretimde kullanılmakta olan yöntemlere genel olarak bakıldığında malzeme kaybını minimize etmesinden dolayı derin çekmenin, talaşlı imalata nazaran oldukça avantajlı olduğu söylenebilir. Bunun yanı sıra, hidromekanik derin çekme gibi gelişen yeni teknolojiler sayesinde iş ekonomisinin daha da üst seviyelere çekilmesi mümkün olmaktadır [1].

Derin çekmede üretim akışı ilk olarak istenen özelliklerdeki sacın fabrikada istenen açınım ebatlarında giyotin makas ile kesilerek şekillendirme işlemine hazır hale getirilmesi ile başlar. Sac şekillendirmede pek çok yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemlerde genel olarak, sac malzemenin uygun özellikteki presler ile istenen forma sahip daha rijit kalıp elemanları yardımıyla şekillendirilmesi esas alınır. Kalıplar, bazen sertleştirilmiş bir çelik parça bazen de özel amaçlı kompozit malzemelerdir. Bunlardan en yaygını, genelde "ıstamp" ve "matris" olarak adlandırılan formlu dökme demir veya çelik malzemedeki kalıp arasına sacın yerleştirilmesi ve orta kısımda ıstampaya uygulanan bir çekme kuvveti ile şekillendirilmesidir.

Kaliteli bir derin çekme işlemi için hammaddeden ürün oluşumuna kadar işleme etkileyen değişkenlerin etkilerinin bilinmesi gerekir. Derin çekmeyi etkileyen bu değişkenler işlem değişkenleri ve malzeme değişkenleri gibi iki ana grup altında incelenir [1].

1-İşlem Değişkenleri;

- a. Çekme hızı
- b. Pot çemberi basıncı
- c. Kalıp geometrisi
- d. Sac parça kenar geometrisi
- e. Yağlama
- f. Çekme Boşluğu

2-Malzeme Değişkenleri;

- a. Pekleşme üsteli “n”
- b. Şekil değişimi hızı duyarlılığı “m”
- c. Anizotropi katsayısı “r”
- d. Akma dayanımı
- e. Sac kalınlığı ve tane boyutu
- f. Elastisite modülü
- g. Kimyasal bileşim
- h. Kalıntı gerilmeler
- i. Geri yaylanma

Uygulamada, derin çekme işlemlerini etkileyen değişkenlerin en uygun değerlerini seçme tecrübe, deneyler veya bilgisayarlı modelleme çalışmaları ile gerçekleştirilmektedir. Bunlar arasında en avantajlı olanı tecrübelerden yararlanabilmektir. Fakat üretimi gerçekleştirilecek derin çekme ürünü için yeterli bilgilere ulaşılamadığı durumlarda, deneme yanılma çalışmaları uygulanır. Bu durum ise maliyetli bir uygulamadır. Bu nedenle bilgisayar teknolojilerindeki gelişmelere paralel bilgisayarlı simülasyon çalışmaları ile daha az maliyetle en uygun işlem koşulları belirlenebilmektedir. Bundan dolayı son yıllarda derin çekme işlemleri için bilgisayarlı simülasyon çalışmaları sayısında artış görülmektedir.

Derin çekme bilgisayarlı simülasyon çalışmaları ile ilgili impilisit sonlu elemanlar analiz metotları, ekspilisit sonlu eleman analiz metotları, tek adımlı sonlu eleman analiz metotları ve birçok farklı non-lineer çözücünün değişik konularda kullanımıyla ilgili

örneklere rastlanmaktadır. Bunlar arasında, derin çekme teorisini en geniş ve detaylı yansıtan ekspilisit metot incelenmeye ve uygulamaya değerdir.

Ekspilisit yöntem, kalıp simülasyonlarında, alternatif tek basamaklı sac açılım metodudur. Bu metot da sonlu elemanlar ağı yardımı ile geometri verileri işlenir. Şekillendirme işlemi yapılmış sac parça geometrisi sonlu elemanlar ağı olarak yazılıma girilir. Bu geometriden sacın açılımı hesaplanır. Parça üzerindeki her düğüm noktasının ne kadar yer değiştirdiği bu açılım yardımı ile bulunabilir. Yer değiştirmelerden gerilme ve benzeri bilgiler elde edilir. Akma ve kopma kriterlerine göre parçanın kritik bölgeleri gözden geçirilebilir. Bu metot hiç bir non-lineer işlem içermediğinden çok hızlı sonuç vermektedir. Fakat şekillendirme işleminin ara basamaklarını içermediğinden ve kalıp sisteminin diğer elemanları hiç kullanılmadığından sonucun tutarlılığı ve şekillendirme işlemine etkisi ekspilisit metoda göre zayıftır [2].

Literatürde benzer çalışmalarda farklı non-lineer yaklaşımlar içeren çözümlere rastlanmıştır.

A.G. Mamalis ve arkadaşları (1997), silindirik kapların şekillendirilmesinde malzemenin ve form karakteristiklerinin kalınlık değişimi ile ıstampa kuvvetine etkisini, ekspilisit sonlu elemanlar yöntemi ile (DYNA 3D) incelemiştir [3]. İnceleme sonuçları derin çekme hızındaki azalışının, bilgisayarın FE modeli çözme zamanını artırdığını göstermiştir.

A.G. Mamalis ve arkadaşları (1997), kare kapların şekillendirilmesinde malzemenin ve form karakteristiklerinin kalınlık değişimi ile ıstampa kuvvetine etkisini, ekspilisit sonlu elemanlar yöntemi ile (DYNA 3D) incelemiştir [4]. İnceleme sonuçları derin çekme hızındaki azalışının, bilgisayarın FE modeli çözme zamanını artırdığını göstermiştir. Claudio Garcia ve arkadaşları (2006), silindirik kapların derin çekme uygulamasında, simülasyon ve deneysel sonuçları karşılaştırmışlar ve sonuç olarak simülasyon ve deney sonuçlarının yakın olduğunu göstermiştir. [5].

Gasper Gantar ve arkadaşları (2005), dikdörtgen kutuların derin çekme işlemini deneysel ve simülasyon sonuçları ile incelemiştirler [6]. Çalışmada 1 mm kalınlığa sahip St 14 sac'dan derin çekme için, sürtünme koşulları, ıstampa radyüsü ve derin

çekme yüksekliği değişkenler olarak seçilmiş olup çatlaksız ve pot oluşturmeyan kalıp parametreleri araştırılmıştır.

H. Sattari ve arkadaşları (2007), dikdörtgen kutuların derin çekme işleminde simülasyon ile ürünün farklı kesitlerindeki kalınlık değişimini incelemiştir [7]. İnceleme sonuçları en fazla kalınlık azalması sacın ıstampa radyüs bölgesinde olduğu görülmüştür.

D.W. Jung (1998), dinamik ekspilisit analiz ile dikdörtgen kutuların derin çekme işleminde derin çekme hızının kalınlık azalmasına etkisini incelemiştir [8]. İnceleme sonuçları derin çekme hızı artışının kalınlıktaki azalış miktarını artırdığını göstermektedir.

Literatürden, ayrıca derin çekme işlemini etkileyen işlem değişkenlerinin de araştırıldığı görülmektedir.

S.S.Han (1997), çeşitli takımlar için radyüs ve sürtünme testleri ile takım geometrisinin sürtünme davranışına etkisini incelemiştir [9]. İnceleme sonucunda sürtünme kuvvetinin derin çekme için gerekli olan derin çekme kuvvetini artırdığını göstermiştir.

Amit Jaisingh ve arkadaşları (2004), derin çekme işlemini etkileyen önemli parametreleri belirlemiş ve bu parametrelerin benzer şekildeki fakat farklı boyuttaki unsurları için derin çekme işlemleri üzerindeki etkilerini niceliksel olarak incelemiştir [10]. İnceleme sonucunda unsurların boyutu ve parametrelerin derin çekme üzerindeki etkisi arasında karşılıklı bir ilişki oluşturmuşlardır.

Gasper Gantar ve arkadaşları (2002), dikdörtgen şeklinde bir kutunun derin çekmesi incelemiştir. İlk olarak, sonlu elemanlar metoduna dayanan deneyler ve sayısal simülasyonlar yoluyla üretim sürecinin istikrarı ve girdi parametrelerinin değişiminin çıktı parametreleri üzerindeki etkisi çalışılmıştır [11]. Çalışma sonucunda istikrarın belirli toleranslar dahilinde sağlandığı görülmüştür.

M.T. Browne ve arkadaşları (2003), C.R.1. çelik kaplarının derin çekmesinde ıstampa ve kalıp geometrisi, sac-tutma baskı basıncı, yağlama ve çekme hızının varyasyonlarını ve etkilerini incelemişlerdir [12]. İnceleme sonuçları en fazla kalınlık azalması sacın ıstampa radyüs bölgesinde olduğu görülmüştür.

Bunların yanı sıra malzemenin karakteristik özelliklerinin de derin çekmeye etkisini de inceleyen araştırmalar da olmuştur.

O. Ghouti ve arkadaşları (1998), Alüminyum malzeme için derin çekme işlemi süresince malzeme özelliklerindeki değişimi sonlu elemanlar metodu ile incelemişlerdir [13].

Claudio Garcia ve arkadaşları (2006), EK4 derin çekme özeliği olan çeliğin mekanik davranışının deneysel tanımlanmasını gerçekleştirmişlerdir [14].

Aynı zamanda derin çekme işleminde günümüzde bilgisayar teknolojisi kullanarak simülasyonlar gerçekleştirilmekte ve kalıp tasarımı da bu simülasyonlar neticesinde tasarlanmaktadır. Yapılan simülasyonların doğruluğu aşağıdaki araştırmalarda incelenmiştir.

Marc Colgan ve arkadaşları (2003), deneysel ve sonlu elemanlar analizi ile derin çekmede ıstampa kuvveti ve kalınlık değişimini incelemişlerdir [15]. İnceleme sonuçları deneysel sonuçlar ile simülasyonun birbiriyle örtüştüğünü göstermiştir.

Laurent Duchene ve arkadaşları (2005), derin çekme işlemi ıstampa kuvveti, ıstampa radyüsü ve derin çekme ürün yüksekliği değerlerini simülasyon ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırmıştır [16]. İnceleme sonucunda deneysel sonuçlar ile simülasyonun birbirine yakın olduğunu göstermiştir.

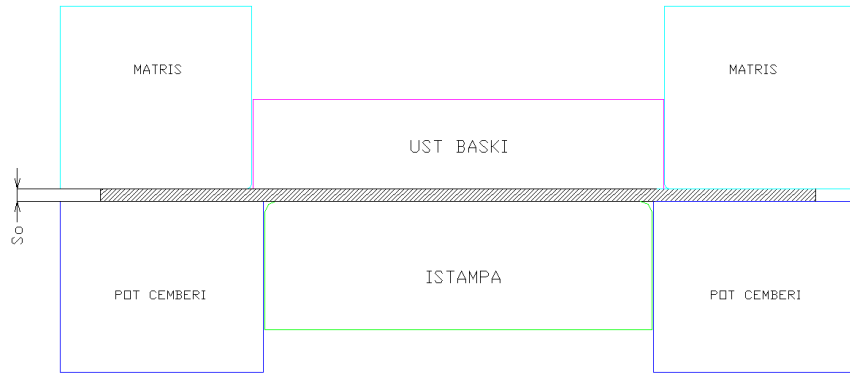
Gerçekleştirilen literatür çalışması galvanize edilmiş saclar için çekme hızının ve ıstampa radyüsünün hasarsız ürün yüksekliğine etkisinin araştırılmasının yararlı olacağı sonucunu göstermektedir. Bu nedenle, bu çalışmada derin çekmeyi etkileyen işlem değişkenlerinden kalıp geometrisindeki ıstampa radyüsü ve çekme hızının

0,6mm kalınlığa sahip galvenize edilmiş ERD 1314 çeliğinden dikdtgen geometriye sahip kap imalatında hasar ve kalınlık değişimine etkisi araştırılmıştır. Araştırmada derin çekme işlemleri Dynaform programı kullanılarak bilgisayarlı simülasyon ile gerçekleştirilmiştir. İncelemeler; 18,6 mm, 31 mm, 37,2 mm ve 43,2 mm yüksekli değerleri için 10 mm/s, 30 mm/s ve 50 mm/s çekme hızlarında ve 4 mm, 6 mm ve 8 mm ıstampa radyslarında gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçlarının güvenilirliğinin değerlendirilmesi 10 mm/s hız ve 6 mm ıstampa radyus koşulları için elde edilen deneysel verideki hasar durumu esas alınarak yapılmıştır.

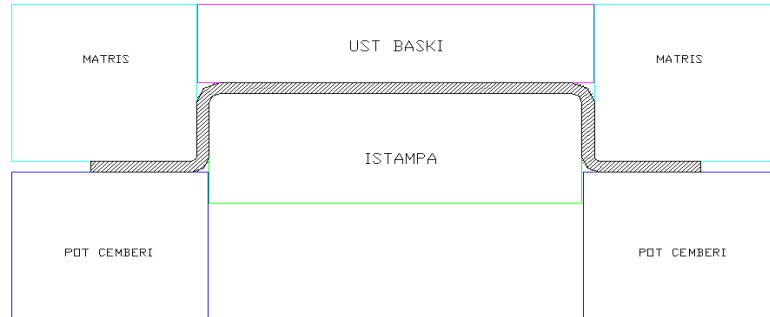
BÖLÜM 2. DERİN ÇEKME YÖNTEMİ

2.1. Yöntem

İki boyutlu, düzlemsel geometriye sahip iş parçasının (sac) çekme kalıbı denilen elemanlar yardımı ve bir zımba vasıtasıyla preste çökertilmesi ya da bir başka ifadeyle, iş parçasının çekme kalıbı içine sıvanması sonucunda belirli derinlik ve profillere sahip üç boyutlu parçalar elde edilmesi işlemine pres tekniğinde çekme adı verilir [1]. Şekil 2.1'de, çekme sacı olarak adlandırılan dikdörtgenel iş parçasından dikörtgen bir kabın çekme işlemiyle elde edilmesi şematik olarak verilmiştir.



Şekil 2.1. Derin çekme işlemi öncesi

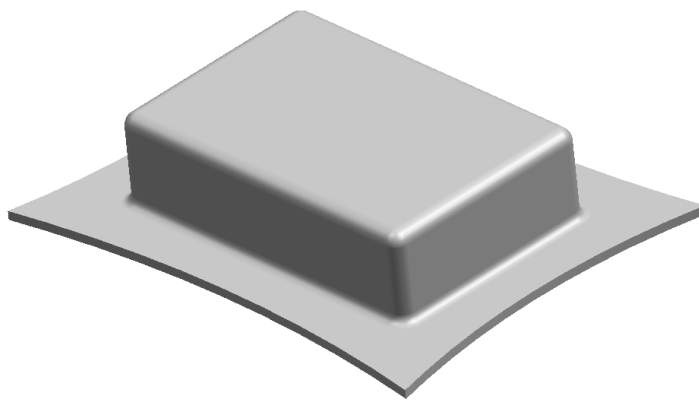


Şekil 2.2. Derin çekme işlemi sonrası

Şekil 2.1. ve 2.2.' den görüldüğü gibi, başlangıçta S_0 kalınlığına sahip saca üst baskı plakası baskı uygulandıktan sonra, sacın matris ve pot çemberi ile sıkıştırılıp formlu ıstampa üzerine sıvanması ile istenen parça elde edilmiş olur. Bu işlem, basitliğinin yanısıra öteki derin çekme işlemleri içerisinde geniş uygulama alanına sahip olan dikdörtgenel kap çekmedir.

Derin çekme işlemi Şekil 2.1 ve Şekil.2.2 'de şematik olarak gösterilen beş kademededen oluşur. Buna göre;

1. Başlangıç dikdörtgenel ilkel iş parçası kalıp üzerine yerleştirilir.
2. Presi koçunun düşey hareketi sonrasında üst baskı düşey yönde iş parçasına doğru harekete başlar ve sac üst baskı ile ıstampa arasına sıkıştırılmış olur.
3. Pres koçunun düşey yönlü hareketine devam ederek sacın matris ile pot çemberi arasına sıkışmasını sağlar.
4. Düşey yöndeki pres koçunun hareketi devam ederek tutulmuş olan sacın formlu ıstampa üzerine sıvanması ile derin çekme işlemi biter.
5. Çekme işlemi tamamlandıktan sonra presin koçu yine düşey yönde ama yukarı istikamete doğru hareket ederek sactan ayrılır ve pot çemberi ile matris arasına sıkışan iş parçası yukarı yönlü bu hareket sayesinde kalıptan ayrılır ve formlu ıstampanın şeklini almış olur (Şekil 2.3).



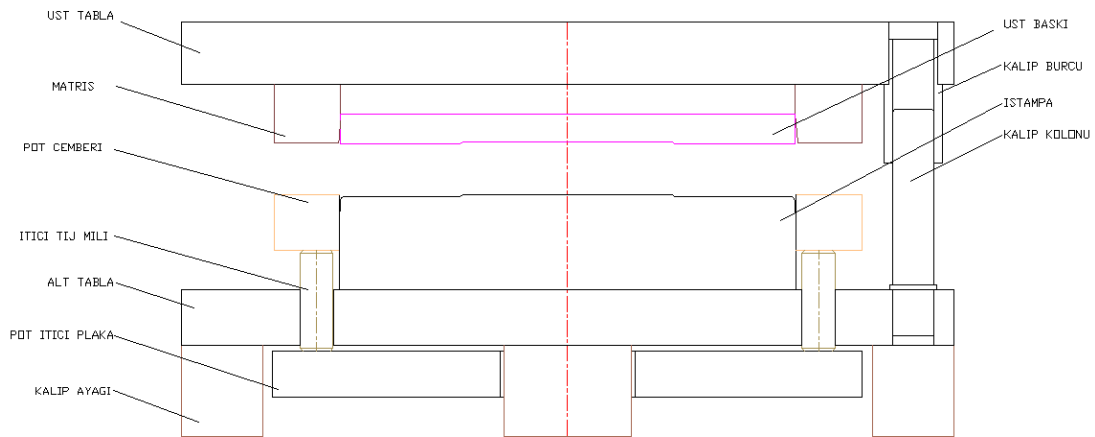
Şekil 2.3. Derin çekme işleminden çıkan dikdörtgenel iş parçası

Çekme kalıbı, bir kalıp setinin genellikle ilk kalıbıdır. Bazen sacın dış hatlarını (açınım) belli bir formda kesen çevre kesme kalıpları çekme kalıbından önce olsalar da, çekme kalıbına, saca istenilen formda ilk ve en büyük şekillendirmeyi

gerçekleştiren kalıp denilmesi yanlış olmayabilir. Bu noktada çekme kalıbının önemi, uygun formda parça elde edilmesi açısından açıkça ortaya çıkmaktadır. Parçanın bazı yüzeylerine daha sonra ütüleme veya form kalıplarında şekil vermek mümkün olsa da, bu miktar olarak sınırlı olmaktadır. Zira şekil almış bir parçada büyük şekillendirmeler, sacın mevcut formunda bozulma, çatlama, yırtılma veya pot oluşumlarına yol açar. Kısaca iyi tasarlanmış bir çekme kalıbı, parçanın başarılı bir şekilde imal edilmesinde çok önemli bir etkiye sahiptir.

2.1.1. Derin çekme işleminde kullanılan kalıp elemanları

Derin çekme işleminde kullanılan basit bir form kalıp örneği Şekil 2.4'de görülmektedir.



Şekil 2.4. Basit bir form kalıbının bölümleri

2.1.1.1. Üst kalıp tablası

Kalıbın pres üst tablasına bağlanması için kullanılır.

2.1.1.2. Alt kalıp tablası

Kalıbın pres alt tablasına bağlanması ve kuvvet dengesi için pres alt tablası üzerinde konumlanması için kullanılır. Kalıp alt tablası ve kalıp üst tablası arasında merkezleyiciler bulunmalıdır.

2.1.1.3. Istampı

Sac malzemeye Şeklini verir. Sacın matrisin içerisine itilmesini sağlar. Form verme esnasında öncelikle sac ıstampı ile temas eder, daha sonra sac malzeme ıstampı üzerinde eğilmeye başlar. Istampı kuvvetinin devamı neticesinde sac malzeme akarak istenilen formu alır.

2.1.1.4. Matris

Matris, sacın pot çemberi ile sıkıŐtırılmasına yardım eder. Aynı zamanda sacın son Şeklini almasını sağlar. Form esnasında sac üzerinde oluşan sürtünme kuvveti sacın gerilmesini sağlar. Sac malzeme matris içerisine aktıka ıstampı ve matris çevresindeki eğimden dolayı mukavemetlenir.

2.1.1.5. Pot emberi

Pot emberi sacın matris ile sıkıŐtırılmasını sağlayarak matris içerisine düzgün akmasını sağlar. Form baŐlangıcında sacın gerilerek pot oluŐmasını önler.

2.1.1.6. İtici tij milleri

Pres alt tablasının altında bulunan yastıklardan pot çemberi için gereken kuvvetin taŐınmasını sağlar.

2.1.2. Çekme donanımları

2.1.2.1. Presler

Metal plakalar hem hidrolik hem de mekanik preslerde çekilebilirler. Ancak ift etkili presler bütün derin çekme işlemleri için tercih edilirler. Çünkü bu tip preslerde daha üniform bir parça kuvveti korunabilmektedir. Çift etkili hidrolik presler derin çekmede kalıp yastıklarıyla birlikte genellikle tercih edilirler. Çünkü bu presler sabit çekme hızına, strok uyumuna ve üniform sıkıştırma basıncına sahiptirler [1].

Kayma kuvvetleri ihmal edilmek suretiyle derin çekme işlemleri için en fazla tercih edilen presler çift etkili düz yanlı tipte olanlardır. Bu tip presler kalıp yastıklarıyla birlikte, geniş ton kapasitesi, yatak hacmi, strok ve kapalı yükseklik sağlarlar.

Derin çekmede kullanılan preslerde göz önüne alınması gereken en önemli faktörler; kuvvet kapasitesi, kalıp boşluğu ve strok miktarıdır. Krank mili, yatakların durumu ve ayrıca saplamalar da pres seçiminde birer faktördürler.

2.1.2.2. Pot çemberi

Pot çemberleri parça çekilirken kenarlardan oluşabilecek pot oluşumlarını önlemek amacıyla kullanılırlar. Pot oluşumu, parça kenarından çeperine doğru gerçekleşen metal dizilişini önleyici bir düzene sahiptirler. Pot çemberi kullanılan uygulamalarda daha büyük derinliklere ulaşmak mümkündür [1].

Pot çemberleri çift etkili ve tek etkili preslerin her ikisinde de kullanılabilir. Çift etkili bir preste, pot çemberi ıstampanın önünde yavaşça ilerleyerek çekme safhası boyunca alt ölü noktada yer alır. Pot çemberinin yerleşimi genellikle belirlenmiş bir kovanın pozitif akışına tekabül eden ıstampa üst stroğunda bir noktaya uzar. Tek etkili preslerde de kalıp yastığı ve ters çevrilmiş kalıp kullanımı ile benzer etki elde edilebilir.

2.1.2.3. Federler

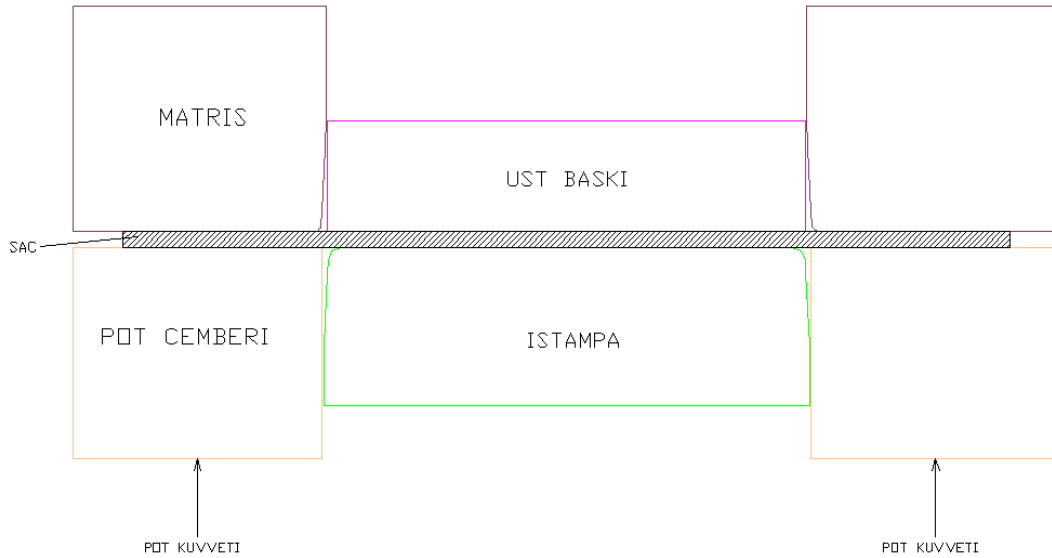
Federler çekme işleminde pot oluşumunu önlemek ve metal akışını kontrol etmek için kullanılır. Feder kullanımı; üretim gelişimini, takım maliyetini ve bakımını arttırmasına rağmen, belirli bir şekli olmayan parçaların çekilmesinde metal akışı için tek kontrol mekanizmasıdır. Federler yalnız ilk çekme için kullanıldığı için imalat oranları bastırıcı uygulamaları ile aynı değerdedir [1].

2.1.2.4. Kalıplar

Sacların şekillendirilmesinde kullanılan kalıplar, yaptıkları işe göre, kesme, delme, derin çekme bükme kalıplan vb. şeklinde sınıflandırılabilirler. Diğer işlemler içinde, benzer tarzda isimlendirmeye gidilmektedir [1].

2.1.3. Derin çekme işlemi aşamalarında oluşan gerilmeler

Derin çekme işlemi süresince malzemenin farklı bölgelerinde farklı gerilme halleri söz konusudur. Bu durum derin çekme işleminde hasarı ve aynı zamanda derin çekme kuvvetini etkiler. Bundan dolayı kare parçanın derin çekmesinde oluşacak gerilmeleri önceden bilmek kalıp tasarımı dolayısıyla da işlemin istenilen kalitede gerçekleştirilmesi için önemlidir.



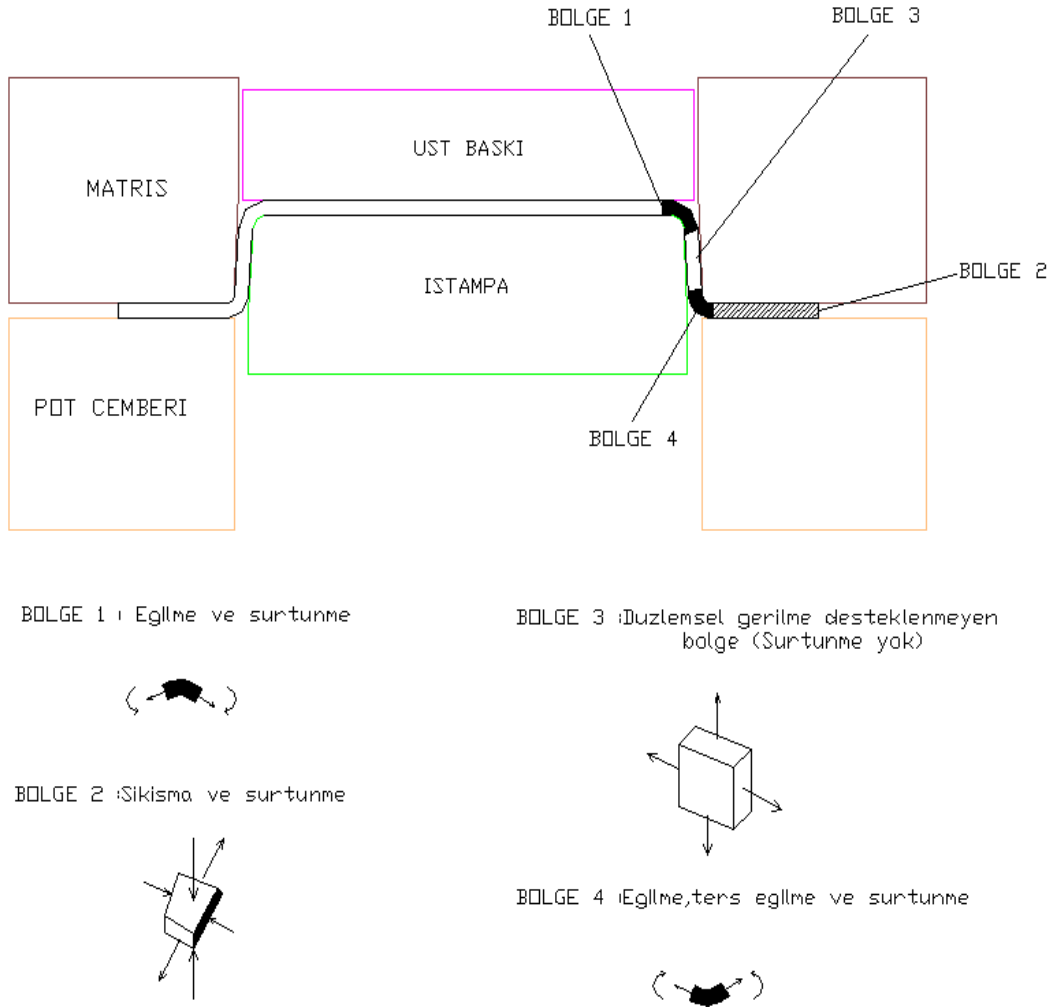
Şekil 2.5. Düz bir sacın form verilme adımları (sacın pot çemberi ile matris arasında tutulması)

ADIM 1: Sacın Tutulması

Derin çekmenin ilk aşaması olan sacın tutulması Şekil 2.5'deki gibi olmaktadır. Bu ilk anda herhangi bir gerilme söz konusu değildir. Sadece sacın tutulması işlemi gerçekleştirilir.

ADIM 2: Çekme

Derin çekme işleminde çekme işlemi ve çekme işleminde oluşan gerilmeler Şekil 2.6’da sunulmuştur.



Şekil 2.6. Form sonu

2.2. Derin Çekmeyi Etkileyen Değişkenler

2.2.1. İşlem değişkenleri

Kalıp ve zımba geometrileri, yapılandırmaları, kalıp mamul boşlukları, pot basıncı süzdürme uygulamaları gibi değişkenler sac şekillendirme işlemlerini etkileyen önemli parametrelerdir [17]. Bu faktörler aynı zamanda şekillendirme işlemlerinin sınırlarını

belirlemede önemli rol oynamaktadır. Bu parametreler arasında kalıp ve ıstampaların köşe radyüsleri (çekme radyüsü genellikle karmaşık parçalar için sabit değildir) bölgesel şekil değişimlerde çok etkin olmalarından dolayı oldukça önemlidir. Tasarımcılar tarafından keskin hatlara sahip karmaşık şekilli parçalar için küçük radyüslü ıstampalar kullanılmakta zorunda kalmaktadır. Bu gibi durumlarda çekme radyüsü ya bu hattın dışından geçmeli ya da çekme operasyonunda bu değer büyütülüp kalibre operasyonunda istenilen değere düşürülmelidir. Küçük çekme radyüslerinin oluşturduğu büyük yerel şekil değişimlerden dolayı imalatta büyük zorluklar çıkarmaktadır. Radyüs üzerindeki bölgesel şekil değişimleri deformasyonun diğer bölgelere yayılmasını önleyerek hasar olasılığını arttırır. Bu tür parçalarda yumuşak geçişlerin olmayışı, işlem sırasında kalıbın deformasyonunu takip edememesi problemini de meydana getirebilir. Ayrıca montaj sırasında ıstampa kalıp grubundaki eksen kaçıklıklarında şekillendirme sırasında sac üzerinde oluşan farklı doğrultulardaki kuvvet bileşenlerini değiştirecektir. Genellikle imalat sırasında çekme kalıplan için plaka tipi yataklamalar kullanılmaktadır. Bu yataklar için paralellik toleransı $\pm 0,1$ mm dir.

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

Birden fazla şekil değiştirme işlemlerinde, ilk aşamada germe şekil değişimine uğrayan bölgeler bir sonraki aşamada derin çekme şekil değişimine uğrayabilir. Yükleme sırasındaki bu tür değişimler farklı malzemeler üzerinde önemli etkilere sahip olabilir. Örneğin, konteyner imalatı için üretilen derin çekilmiş kaplarda ütüleme yöntemi kullanılarak çekme ve basma gerilimlerinin beraberce etkimesi ile sac kalınlıkları olabildiğince azaltılmaktadır. Optimum şartlarda yerine getirilen bu teknikler, derin çekme sırasında meydana gelen pot oluşumlarının giderilmesinde de oldukça etkili olmaktadır.

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

Yağlama, kalıp ile sac arasındaki sürtünmeyi azaltarak şekillendirme sırasında daha üniform şekil değişimlerinin meydana gelmesinde rol oynar. Yağlama şartlarının iyileştirilmesi ile deformasyon sırasındaki şekil değişim oranları da değişmektedir.

2.2.1.1. Çekme hızı

Çekme hızının çekme olayına etkisi üzerindeki çalışmalar henüz kesin kurallara bağlanmamıştır [17]. Soğuk olarak şekil değiştirmede mukavemetin değişimine şekillenme hızının etkisi olmaktadır. Bununla beraber malzemeye şekillenme için gerekli zamanın bırakılması uygun olur. Özellikle karmaşık şekilli parçaların çekilmelerinde kritik bölgelerdeki malzeme zayıflamalarını arttıracak ve yırtılmalara sebep olacak yüksek hızlardan kaçınılması gerektiği hatırlanmalıdır. Derin çekme hızı artışının kalınlıktaki azalış miktarını artırdığı gözlenen çalışmada bu durumu desteklemektedir [8]. Çekme hızı olarak istampanın malzemeyle temas ettiği anki hız anlaşılmalıdır [17].

Tablo 2.1. Farklı metallerin normal çekme hızları [17]

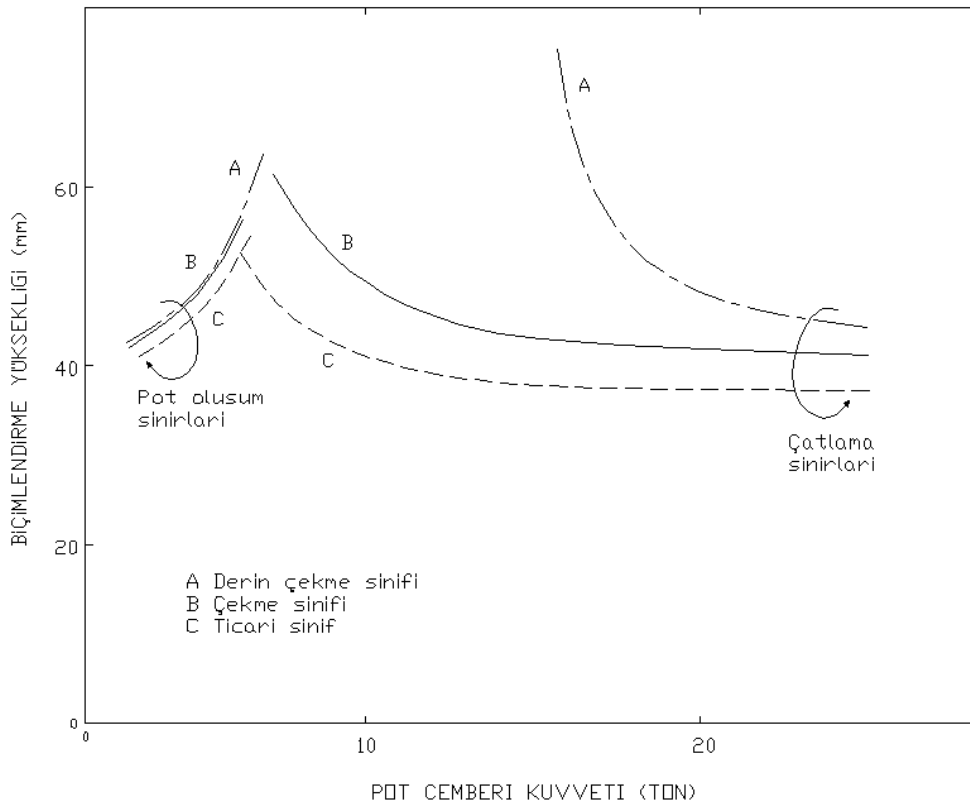
Ortalama Çekme Hızları		
Malzeme	Çekme Hızları (mm / s)	
	Tek Etkili Presler	Çift Etkili Presler
Alüminyum	900	100
Yüksek gerilimli Al	-	35
Pirinç (Sarı)	1000	100
Bakır	750	85
Çelik	300	42,5
Çelik (Karpit kaplı)	-	60
Paslanmaz çelik	-	25
Çinko	150	40

2.2.1.2. Pot çemberi basıncı

Pot çemberi basıncının sac parçada pot oluşumu ve yırtılma oluşumuna etkisi büyüktür. Pot çemberi basıncındaki artış ile derin çekme modelindeki şekil değişiminin (çekme-basma) gererek biçimlendirme modeline doğru (çekme-çekme) yöneldiği görülür [18].

Pot çemberi basıncı oldukça düşük tutulursa sac parçada potluklar oluşur. Bu potlar uygun kalıp aralığı kullanıldığı takdirde sadece flanşa; aksi takdirde kap duvarlarında da meydana gelir. Genelde düşük akma dayanımına sahip bir çelik kıvrılma ve pot oluşumunu önlediği için pot çemberi basıncının düşük kullanılmasına izin verir.

Farklı r değerlerine sahip çelikler için pot oluşumu üzerine pot çemberi basıncının etkisi, çatlama sınırları ile birlikte Şekil 2.7 'de gösterilmektedir. Yüksek r değerleri, pot oluşumunu sınırlamak için daha düşük pot çemberi basıncı gerektirir. Pot çemberi basıncının yüksek tutulması ise ayrıca çatlamalara yol açacaktır.



Şekil 2.7. Çeşitli çelik sınıfları için çatlak ve kırışıklıklara pot çemberi kuvvetinin etkisi [18]

Yüksek r değeri pot oluşumu ve çatlak oluşumu arasındaki alanı büyültür. (Şekil 2.7 'da A ile gösterilen derin çekme sınıfındaki çeliğin diğer çeliklere göre (B ve C) daha yüksek r değerine sahip olması nedeniyle pot oluşumu ve çatlak arasındaki alanın daha büyük olduğu belirlidir.)

Pot çemberi kuvvetini aşağıdaki formülden de hesaplanabilir.

$$F_p = \Pi / 4(D^2 - d^2) \frac{\sigma_a + \sigma_k}{200} \quad (2.1)$$

$$\sigma_a = \text{Akma dayanımı} \quad (\text{N/mm}^2)$$

$$\sigma_k = \text{Kopma dayanımı} \quad (\text{N/mm}^2)$$

Dengeli bir kuvvet büyüklüğü kap cidarlarının başarılı bir şekilde incelmeye izin verecektir.

Metalin mekanik özelliklerine bağlı, yaklaşık pot çemberi basıncı Tablo 2.2 'de birçok farklı metal için verilmektedir. Tablo 2.3 'de düşük karbonlu çelikler için geniş bir çekme kalınlığı alanına eşit pot çemberi kuvvetleri ve kalınlıkları verilmiştir. Kuvvetler yüzde olarak yer almaktadır.

Tablo 2.2–2.3 'de yer alan basınçlar, yalnızca yarı mamul ve flanş kenarlarındaki potları önlemek için kullanılır. Takım arasında kalmayan diğer iş parçası bölgelerinde de potlar görülebilir. İş parçası kalınlığına göre ıstampa radyüsü geniş olduğu zaman potun meydana gelmesi muhtemeldir.

Pot oluşumu, sık sık çekme içinde gelişen normal zorlama üzerindeki son derece yüksek radyal gerilme ile önlenemez. Bu yüksek gerilme normal olarak federler vasıtasıyla sağlanır. Buruşmaları önlemenin bir diğer yolu da daha büyük boyutta yarı mamül kullanmaktır. Ancak bu da iş parçası sarfiyatına neden olur. Ayrıca büyük boyutlu yarı mamül metal akışını sınırlar ve aşırı incelmeye veya çatlaklara neden olabilir.

Tablo2.2. Bazı malzemeler için pot çemberi basınçları [18]

Metal	Basınç, Mpa (a)
Düşük karbonlu çelik	3,45
Ostenitik paslanmaz çelik	6,89
Alüminyum	0,69
Alüminyum alaşımları	2,41
Bakır	1,38
Alfa princi	1,90
Fosforlu bronz	2,75

a)Değerler akma gerilmesi ve gerilme direnci'nin Yaklaşık 1/150-1/200'üdür.

Tablo 2.3. Düşük karbonlu çeliklerin derin çekilmesinde pot çemberi kuvvetleri (a) [18]

İş parçası kalınlığı (mm.)	Pot çemberi kuvveti % çekme kuvveti olarak	İş parçası kalınlığı (mm.)	Pot çemberi kuvveti % çekme kuvveti olarak
0,13	85	1,30	23
0,25	67	1,78	14
0,38	57	2,54	9
0,50	50	3,18	8,5
0,64	44	4,75	8,25
0,76	39	6,35	8

(a) Verilen değerler sıg çekmeler için değil, özellikle eliptik veya küresel şekiller için kullanılmalıdır

2.2.1.3. Kalıp geometrisi

Bir sac parçanın biçimlendirilmesinde kalıp ıstampa radyüsü en önemli parametredir [19].

Istampa üzerinde küçük bir radyüs, sac parça üzerindeki keskin hatların iyi bir şekilde elde edilmesi için arzu edilen bir özelliktir. Fakat böyle keskin hatlar birim şekil değişimi artışını bir yerde toplayacağı için imalatta zorluklar ortaya çıkartır. Radyüs üzerindeki şekil değiştirme yoğunluğu sac eşyada buraya komşu düz bölgelerde deformasyonun yayılmasına engel olur ve hata olasılığını artırır. Böyle alanlarda sac malzeme çatlayacak veya yırtılacaktır. Çok büyük radyüs (~50 to) ise ıstampa profili üzerinde pot oluşumuna neden olacaktır [18].

Sadece ıstampa üzerinde bir radyüs verilmesi yeterli değildir. Sac malzemenin kalıba girişindeki kalıp radyüsünün de önemi büyüktür. Bu bölüme radyüs verilmemesi halinde malzeme kalıp içerisinde rahatça hareket edemez, kesme işlemine benzer bir durum söz konusu olur. Kalıp radiusunun değerinin artması biçimlendirme kuvvetini azaltacağı gibi biçimlendirme oranını da artırır. Fakat bu radyüs gereğinden fazlada büyük

yapılamaz. Çünkü aşırı durumda, sıkıştırma kalıbının etki alanı azalacağından sac parça çevresinde veya yan duvarında kırışıklık ve erken hasar görülür [18].

Uygun kalıp radyüsü:

$$R_K = (8 \sim 10) \cdot t_0 \text{ (mm)} \quad (2.2)$$

$$t_0 = \text{Sac kalınlığı (mm)}$$

Istampa için en uygun radyüs:

$$R_I = (6 \sim 8) \cdot t_0 \text{ (mm)} \quad (2.3)$$

$$t_0 = \text{Sac kalınlığı (mm)}$$

Kalıp aralığının minimum bir germe ile ıstampa etrafında malzemenin düzenli bir şekilde akacağı biçimde olmalıdır. Çok büyük kalıp aralıkları sac malzemenin kalıbın iç kısmında kalıp ile ıstampa arasında desteksiz kalmasına bunun sonucunda da kırışıklıklara neden olur. Küçük kalıp aralığı ise ıstampa, kalıp ve sac arasındaki sürtünme kuvvetlerini arttıracığından biçimlendirme için gerekli radyal kuvvetlerin artışına ve aşırı zorlama sonucu sac da çatlama ve yorulmalara yol açacaktır [18].

Kalıp aralığı daima sac kalınlığından fazla olmalıdır. Basit bir ifade ile aşağıdaki gibidir;

$$t = t_0 (D/d)^{1/2} \quad (2.4)$$

$$t = \text{Kalıp aralığı (mm)}$$

$$D = \text{Taslak çapı (mm)}$$

$$d = \text{Kalıp iç çapı (mm)}$$

“Ranknin” gerçeğe çok uygun olan aşağıdaki bağıntıyı önermiştir [19].

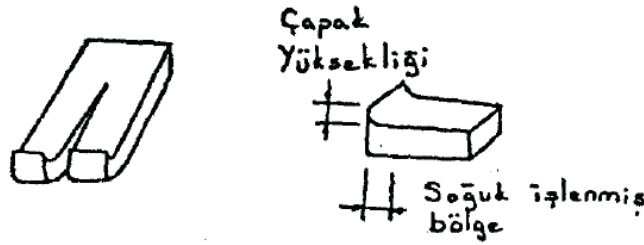
$$t = t_0 (D/d)^{1/4} \quad (2.5)$$

Pratikte ise çok yaygın olarak $(1,2 \sim 1,1) t_0$ aralıkları kullanılır ($t_0 = \text{Sac kalınlığı}$).

2.2.1.4. Sac parça geometrisi

Sac malzemelerin biçimlendirilmesinde diğer bir faktör sac parça kenarlarının durumudur. Eğer sac parça kenarlarında çapak varsa bu durum biçimlendirilebilirliği genellikle düşürür [18].

Çapak oluşumuna neden kör kesme bıçaklarıdır. Yüksek şekil değişimine maruz kalan bir çapak bölgesindeki çatlak şekil 2.8 'de gösterilmektedir.



Şekil 2.8. Çapak bölgesinde çatlak oluşumu [20]

Sacın kenar ve artık kısımların yanık ve soğuk işlem nedeniyle tokluğu düşüktür. Bu bölgeler çekme gerilmesine maruz kaldığında çatlamalara neden olurlar. Bu bölgelerin tamamen kaldırılması problemin tamamen çözülmesine yetecektir [20].

2.2.1.5. Yağlama

Çekme'de yağlama malzeme ile kalıp arasındaki sürtünmeyi azaltmayı amaçlar. Böylece malzemenin şekillendirmeye karşı göstereceği direnç azaltılmış olur. İyi bir yağlama kalıp ve iş parçası yüzeylerinin zamansız bozulmalarını önlediği gibi kalıp ömrünün artmasına sebep olur. Yağlama iş parçasının kalıptan kolayca ayrılmasını sağlamak amacıyla da kullanılır [1,20]. Yağlama için kullanılacak maddelerde aşağıdaki genel özelliklerin bulunması gereklidir:

- Yağlama maddesinin meydana getirdiği yağ filmi homojen olmalı ve yüksek basınçlarda yırtılarak kuru sürtünmeye sebep olmamalıdır.

- b) Yağlama maddesi malzeme yüzeyini iyi ıslatmalı (yapışmalı) ve bütün yüzeylere homojen olarak dağılmalıdır.
- c) İş parçası üzerindeki yağ tabakası operasyondan sonra kolayca temizlenebilmelidir.
- d) Yağlama maddesi kalıp ve malzeme yüzeyinde kimyasal ve fiziksel reaksiyonlar meydana getirmemelidir.
- e) Yağlama maddesinin bileşimi kararlı ve sağlığa zararlı etkileri bulunmamalıdır.
- f) Yağlama maddesinin temini kolay ve ucuz olmalıdır.

Pratikte dolgu maddeli denilen içinde grafit talk (magnezyum silikat) tebeşir (kalsiyum karbonat) MoS₂ (Molibden disülfid) vs. gibi katık maddeleri bulunan yağlarla dolgu maddesiz çok çeşitli yağlama maddesi kullanılmaktadır. Tecrübeler dolgu maddesiz yağlama maddelerinin dolgu maddeli yağlar kadar yağ filmi kararlılığına sahip olmadığını göstermektedir. Aynı zamanda dolgu maddeli yağlarda sürtünmenin diğerine nazaran 2-3 kat daha az olmakta, bu sebepten kalıp ömrü artmaktadır [21].

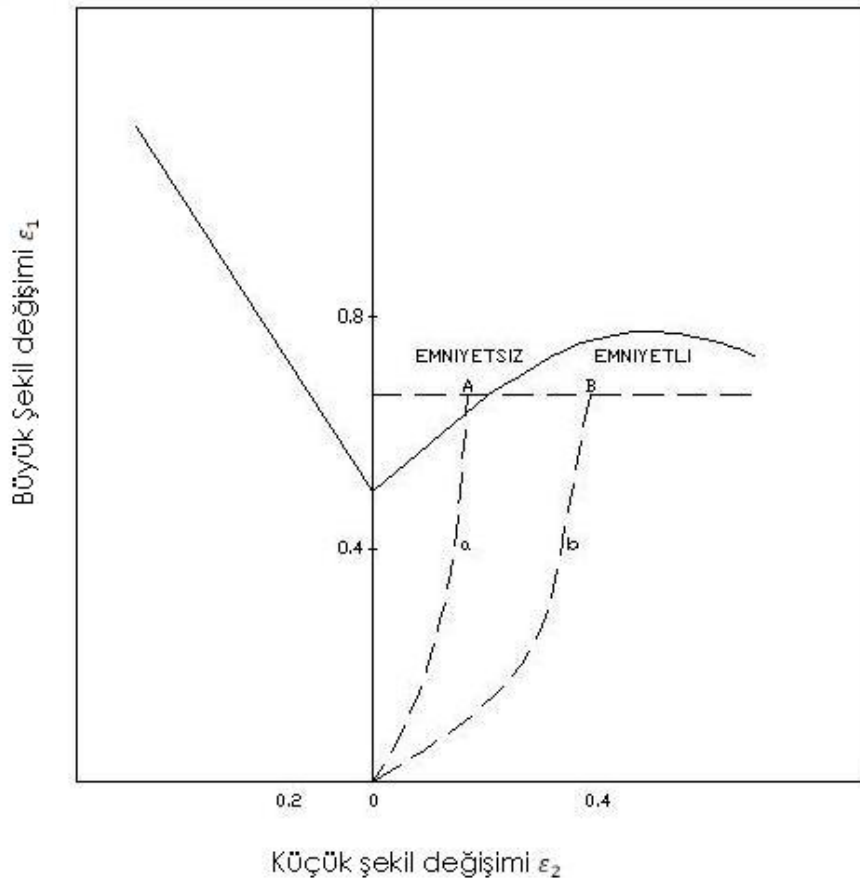
Yağlama maddesinin kullanımı ile ilgili birkaç öneri aşağıdaki gibidir;

- 1) İlkel pulun yağlama maddesine daldırılarak bütün yüzeylerin yağlanması tavsiye edilmemektedir.
- 2) İlkel pulun yalnız çekme kalıbına bakan tarafı belli aralıklarla yağlanmalıdır.
- 3) Malzemenin ıstampa boyunca kayarak cidar incelmeye uğrayacağı düşünülerek ilkel pulun bpot çemberine bakan tarafının yağlanmaması iyidir.
- 4) Parçanın tabanı ile ıstampa alın yüzeyi arasındaki sürtünmeyi arttırmak için zımbanın alın yüzeyi ile kavis bölgeleri yağlanmamalıdır. Hatta sürtünmeyi azaltmak için ıstampanın alın yüzeyinin parlatılması gerekir. Malzeme ıstampa alın yüzeyinden kolayca kayarsa kavis bölgesinde malzeme incelmesi daha fazla olacak ve malzemenin çekmede yırtılması kolaylaşacaktır.
- 5) Malzeme ile kalıp elemanları arasındaki sürtünmeyi azaltmak malzemenin pot oluşumuna olan eğilimini artırır. Bu sebepten $s / D < \% 0,3$ gibi düşük malzeme kalınlığı oranlarında ilk çekme operasyonunda yağlama yapılmaması tavsiye

edilir. Fakat kalıp aşınmalarını ve iş parçası yüzey bozukluklarını önlemek için matris kavis bölgelerinin yağlanması gerekir.

- 6) Beşinci maddede açıklanan önerileri ince saclardan yarım küre ve benzeri şekilli parçaların çekimleri için de uygulamalıdır.
- 7) Magazine doldurularak otomatik besleme yapılan küçük boyutlu pulların yağlanması besleme esnasında pulların birbirlerine yapışmalarına sebebiyet verebileceğinden yağlama yapılmaması iyidir. Bu durum kalıp aşınmalarını artırır ve çekme oranını olumsuz yönde etkiler.

Yağlama, kalıp ile sac arasındaki sürtünmeyi azaltarak şekillendirme sırasında daha üniform şekil değişimlerinin meydana gelmesinde rol oynar. Yağlama şartlarının iyileştirilmesi ile deformasyon sırasındaki şekil değişim oranları da değişmekte, Şekil 2.9'da görüldüğü gibi hasar bölgesinde olan A noktası yağlamanın geliştirilmesi ile emniyetli bölgedeki B noktasına kaydırılabilmektedir.



Şekil 2.9. Şekillendirme diyagramına yağlamanın etkisi [19] a) Yağlayıcı kullanılmamış b) Yağlayıcı kullanılmış

Tablo 2.4. Düşük karbonlu çeliklerin pres altında formlanmasında yaygın olarak kullanılan yağlayıcılar [18]

Yağlayıcı Tipi ve Bileşimi	Temizleme Kolaylığı		Paslanmaya Karşı Koruması
	Su Bazlı	Solventler	
Su Bazlı Yağlayıcılar			
Düşük Şiddetli Pres Operasyonları 1-) %5-20 su emülsiyonlu çok amaçlı çözülebilir yağ veya cila	Çok İyi	İyi	Vasat
Orta Şiddetli Pres Operasyonları 2-) %5-20 su emülsiyonlu sabun 3-) Su emülsiyonlu çözülebilir ağır hizmet ağı (Sülfür yada klor katkı maddesi içerir)	Çok İyi Çok İyi	Çok İyi İyi	Vasat Vasat
Yüksek Şiddetli Pres Operasyonları 4-) Su ile inceltilmiş yağlı sabun (cila içerebilir) 5-) Su emülsiyonlu çözülebilir ağır hizmet ağı (yüksek konsantrasyonda sülfür yada klorlu katık içerikli)	Vasat Çok İyi	Zayıf İyi	Vasat Vasat altı
Maksimum Şiddetli Pres Operasyonları 6-) Su ile inceltilmiş boyalı yağlı-sabun 7-) Kuru sabun veya cila (su solüsyonu ile uygulanır) Boraks gibi çözünen astar içerebilir.	Zayıf İyi	Çok Zayıf Çok Zayıf	İyi İyi
Yağ Bazlı Yağlayıcılar			
Düşük Şiddetli Pres Operasyonları 8-) Makine yağı,artık (genellikle ortalama 100F'da 40-300 sus) 9-) Mineral yağlar (100F'da 40-300 sus) 10-) Acıbadem yağı	İyi İyi	Çok İyi Çok İyi Temizleme gerektirmez	Vasat Vasat
Orta Şiddetli Pres Operasyonları 11-) %10-30 dolgun yağ ilaveli mineral yağ 12-) %2-20 sülfürlü veya klorlu yağ (EP yağı) ilaveli mineral yağ	İyi Vasat üstü	Çok İyi İyi	Vasat Vasat altı
Yüksek Şiddetli Pres Operasyonları 13-) Organik yağ 14-) Mineral yağ (100F'da 100-3000 sus) +%5-50 a-) Emülsiyonlaştırılmamış klorlu yağ b-) Emülsine klorlu yağ 15-) Konsantre fosforlu yağ	Vasat Zayıf İyi Vasat	Vasat İyi İyi Vasat	Vasat Çok Zayıf Çok Zayıf Vasat
Maksimum Şiddetli Pres Operasyonları 16-) Boyalı yağlı sabun ile karıştırılmış mineral yağ 17-) Konsantre sülfürlü yağ a-) Emülsiyonlaştırılmamış b-) Emülsine 18-) Konsantre klorlu yağ a-) Emülsiyonlaştırılmamış b-) Emülsine	Zayıf Çok Zayıf İyi Çok Zayıf İyi	Zayıf Vasat Vasat Vasat	Vasat Zayıf Zayıf Çok Zayıf Çok Zayıf

2.2.1.6. Çekme boşluğu

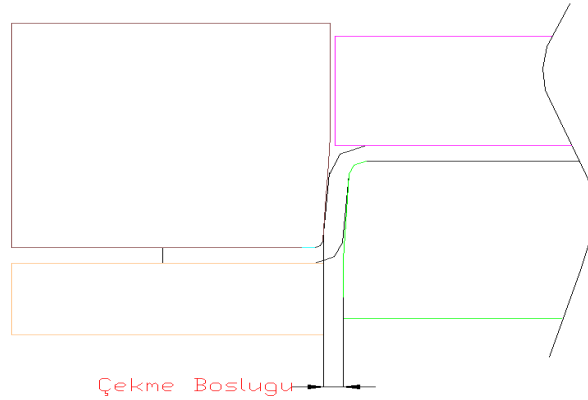
Çekme işlemi sırasında ıstampa ile kalıp arasında kalan aralık kalıp boşluğu ya da çekme boşluğu (w) olarak adlandırılmaktadır ve Şekil 2.10'da gösterilmiştir. Bu büyüklüğün belirlenmesinde göz önüne alınan temel husus, çekme işlemi sırasında parçanın üst bölgelerinde ortaya çıkan malzeme yığılması kökenli kalınlaşmadır. Bu nedenle ıstampa ve kalıp arasındaki boşluk nominal sac kalınlığının belirli bir miktar üzerinde seçilir [22].

Kalıp boşluğunun öngörülen bir sınır değerinin altında olması halinde çekme işlemi, amacından saparak bir cidar inceltme çekmesi haline gelir; iş parçası kalıpla ıstampa arasında ezilir. Bu durumda ortaya çıkacak incelmelerin sonucunda parça, etkiyen ıstampa kuvvetine karşı gelemmez ve hasara uğrar. Kalıp boşluğunun aşırı derecede yüksek seçilmesi durumunda ise, özellikle ince malzemelerde potlar ve ölçü sapmaları ortaya çıkabilmektedir. Bu da üretim kalitesini olumsuz etkileyen bir durumdur.

Derin çekme tekniğinde çoğu sayısal kavramda olduğu gibi, çekme işleminin birinci kademesinde uygulanacak kalıp boşluklarının seçiminde de bazı deneysel bağıntılardan yararlanılmaktadır [21].

a. Çelik saclar için, $w = S + 0.07 \sqrt{10.S}$ (2.6)

b. Alüminyum için, $w = S + 0.02 \sqrt{10.S}$ (2.7)



Şekil 2.10. Çekme boşluğu,

2.2.2. Malzeme değişkenleri

2.2.2.1. Pekleşme üsteli

Sacın soğuk biçimlendirilebilirliğini etkileyen en önemli malzeme özelliği, gerilme artışı sonucu meydana gelen deformasyon ile sacın pekleşme durumudur [18]. Pekleşme özelliği yüksek olan malzemelerde deformasyon sonucu incelenen bölgedeki dislokasyon yoğunluğu artışı ile bu bölge deformasyona karşı koyar. Bu durumda uygulanan gerilme altında deformasyon komşu bölgelere doğru yayılarak sacda üniform bir incelme meydana getirir. Pekleşme özelliği düşük olan malzemelerde ise, incelme belirli bir bölgede başlar ve hızla o bölgede yoğunlaşır. Sonunda o bölgede çatlak oluşacaktır.

Çekme testinde üniform birim şekil değişimi maksimum yükteki birim şekil değişimi olarak isimlendirilir ve sacın pekleşme kabiliyetinin bir ölçüsüdür [4]. Diğer ölçü pekleşme üsteli " n" dir. Gerilme – birim şekil değişimi eğrilerinin üniform deformasyon bölgesi (Şekil 2.11) Holloman denklemi olarak bilinen;

$$\sigma_g = K \cdot \varepsilon^n \text{ bağıntısı ile ifade edilir.} \quad (2.8)$$

Bu arada;

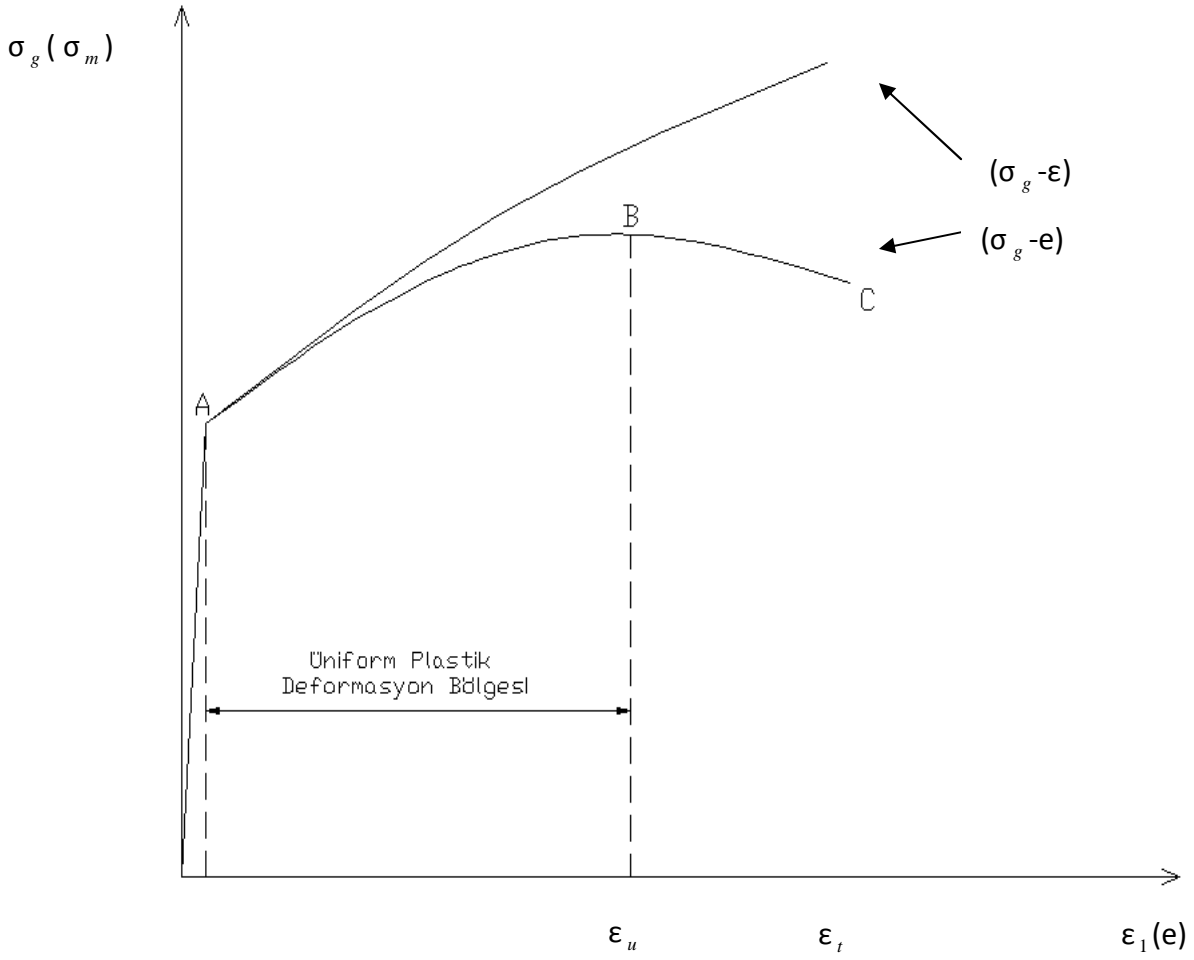
σ_g = Gerçek gerilme

ε = Gerçek birim şekil değişimi

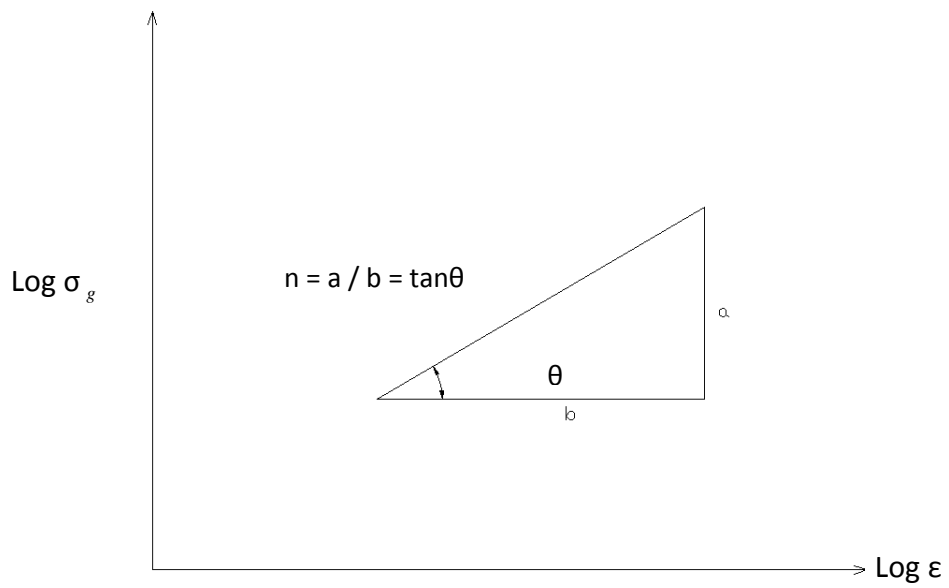
K = Malzeme mukavemet katsayısı

n = Pekleşme üsteli

Pekleşme üssü "n" plastik deformasyonun başladığı akma gerilmesi ile boyun vermenin başladığı nokta arasında bulunan üniform deformasyon bölgesindeki gerçek gerilme ve gerçek birim şekil değişimi değerlerine göre çizilen (Log σ – Log ε) grafiğinin eğimine eşittir (Şekil 2.12).



Şekil 2.11. Mühendislik ve gerçek gerilme-birim şekil değiştirme diyagramı $\sigma_g (\sigma_m)$ [18]



Şekil 2.12. Pekleşme üsteli "n" değerinin hesaplanması [18]

"K" ve "n" in değerleri çoğu metaller için gerilme-birim Şekil değiştirme eğrisinin bütününi açıklanamaktadır. Fakat yaklaşık olarak karşılaŐtırma için kullanılır. Bu değerler ilk %5 – 10 birim Şekil değiştirme içerisinde genel olarak düşüktür, orta dereceli bir birim Şekil deęiŐtirmesi içerisinde yükselir ve son olarak büyük Şekil deęiŐtirmesi derecelerinde yine düşer. Düşük karbonlu çelik saclar bu üç durumun oluşmadığı birkaç malzemedendir. Düşük Şekil deęiŐtirmesindeki düşük "K" ve "n" değerleri elastikliğin hesabında önemli olmakla birlikte belverme (necking) ve hata oluşumunda büyük Şekil deęiŐtirmesindeki "K" ve "n" değerleri esas faktörlerdir [18].

"n" değerinin artışına neden olan çeşitli mikroyapı özellikleri daha iyi birim Şekil değiştirme dağılımı ve yüksek sınır Şekil deęiŐtirmesini sağlaması nedeniyle biçimlendirilebilirliği uygun hale getirir. Örneğin, rekristalize olmuş malzeme yapılan, düşük akma dayanımı ve büyük pekleşme değerleri verdiğinden bu tür malzemeler biçimlendirme uygulamaları için idealdir [18].

2.2.2.2. Birim Şekil değiştirme hızı duyarlılığı üsteli

Gerinim hızı duyarlılığı gerilim dağılımına yardım eden diğer önemli özelliktir. Birim Şekil değiştirme hızı duyarlılığı üsteli "m" pozitif ve yüksek olan malzemelerde boyun verme olayından sonraki Şekil değiştirme miktarı artar [18]. Bu tür malzemelerde boyun verme bölgesinde plastik gerilme artar ve boyun verme olayının etrafa yayılmasını sağlar. Böylece kalınlık incelmesinin sadece bir bölgede yoğunlaşmayıp tüm malzemede üniform olarak gelişmesi sağlanır.

Yüksek sıcaklıklarda. ($T > 0.5T_m$) birim Şekil değiştirme hızının malzemenin mukavemetine etkisi çok olup, sabit sıcaklıkta ve birim Şekil değiştirme miktarı için;

$$\sigma = C \cdot \dot{\epsilon}^m \quad (2.9)$$

bağıntısının geçerli olduğu saptanmıştır. Burada;

σ = Plastik gerilme (veya Akma Gerilmesi)

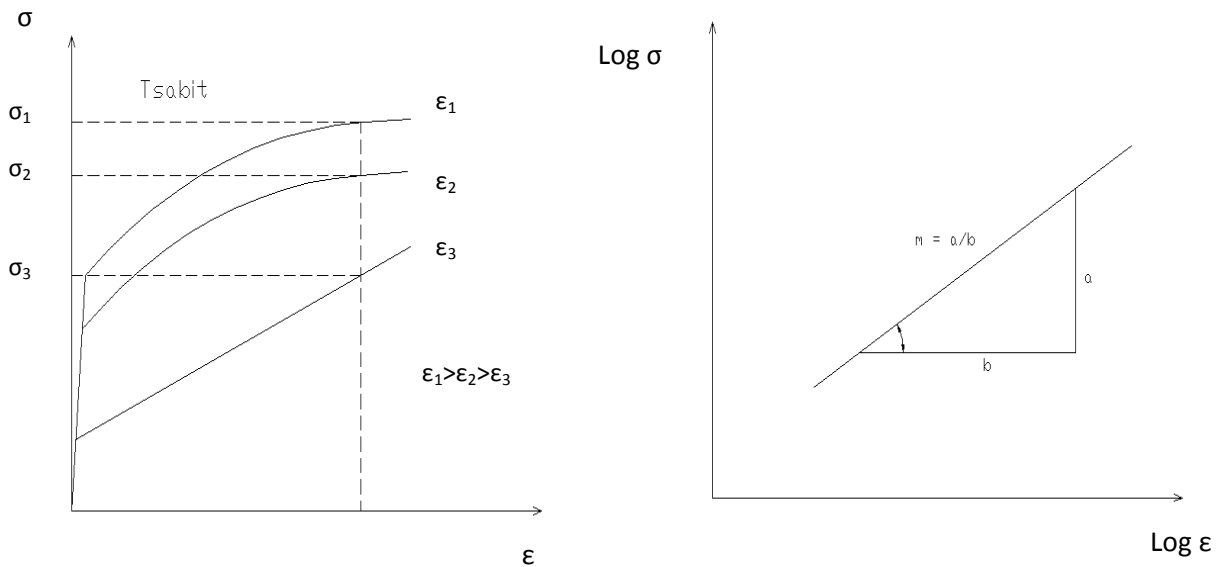
C = Malzeme Sabiti

m = Şekil değiştirme hızı duyarlılığı üssü

$\dot{\epsilon}$ = Birim şekil değiştirme hızı

Birim şekil değiştirme hızı duyarlılığı üssü " m " $\text{Log } \sigma - \text{Log } \epsilon$ grafiğinin eğimine eşittir. Böyle bir grafik sabit sıcaklıkta, farklı şekil değişimi hızlarında yapılan çekme deneyleri sonuçlarından yararlanılarak çizilebilir (Şekil 2.13).

Hız duyarlılığının etkileri birim şekil değişimi hızındaki değişimle gösterilir ve böylece çekme testinde maksimum yüke karşılık gelen birim şekil değişimi en çok " m " den etkilenir [19]. Hız duyarlılığının birim şekil değiştirme duyarlılığına göre daha fazla etkiye sahip olduğu söylenmişse de çoğu soğuk biçimlendirilmiş malzemeler için " m " nin değeri 0,05 den küçüktür. Düşük karbonlu ve paslanmaz çelikler için " m " değeri önemli bir şekilde değişmediğinden, biçimlendirilebilirlik üzerine " m " değerinin etkisi oda sıcaklığında ihmal edilebilir.



Şekil 2.13. Farklı birim şekil değiştirme hızı ile yapılan deneylerden " m " nin tayini [18]

2.2.2.3. Anizotropi katsayısı

Özelliklerin yöne bağımlılığına anizotropi adı verilir [18]. Bir sac kristalografik yönlenmeden dolayı farklı yönlerde ($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$) farklı anizotropi değerlerine

sahiptir. Anizotropi, genişlikteki birim şekil değiştirmenin kalınlıktaki birim şekil değiştirmeye oranı şeklinde verilir.

$$r = \frac{\mathcal{E}_w}{\mathcal{E}_t} \quad (2.10)$$

Burada:

\mathcal{E}_w = Genişlikteki birim şekil değiştirme

\mathcal{E}_t = Kalınlıktaki birim şekil değiştirme

Anizotropi katsayısı “r” malzemenin kalınlığındaki birim şekil değiştirmenin (sac yüzeyine dik) genişlikteki birim şekil değiştirmeden az veya çok belirttiğinden “ dikey anizotropi katsayısı” olarak isimlendirilir.

İnce saclarda kalınlıktaki çok küçük değişimlerin doğru bir şekilde ölçülmesi zor olduğundan kalınlık yerine uzunluk ölçülür. Bu durumda önceki eşitlik şu şekil alacaktır;

$$r = \frac{-\mathcal{E}_w}{\mathcal{E}_t} = \frac{\mathcal{E}_w}{\mathcal{E}_w + \mathcal{E}_L} = \frac{Ln(w/wn)}{-(Ln(w/wn) + Ln(l/ln))} \quad (2.11)$$

İzotropik bir malzemede dikey anizotropi katsayısı “1” dir. Bu sac malzemenin bütün yönlerde eşit dayanıma sahip olduğunu gösterir. Dikey anizotropi katsayısının 1 den büyük olması durumunda sac kalınlığı yönündeki yüksek dayanımı, 1 den küçük olması durumunda ise kalınlık yönündeki düşük dayanımı gösterir. Sac malzemelerde “r” nin sacın haddeme yönüne göre (0°,45°,90°) farklı değerler verdiğini bilmekteyiz. Bu nedenle elde edilen farklı dikey anizotropi katsayılarının ortalaması alınır [18].

Bu durumda ortalama dikey anizotropi katsayısı;

$$\bar{r} = \frac{r_0 + r_{90} + 2r_{45}}{4} \quad (2.12)$$

şeklinde tanımlanır.

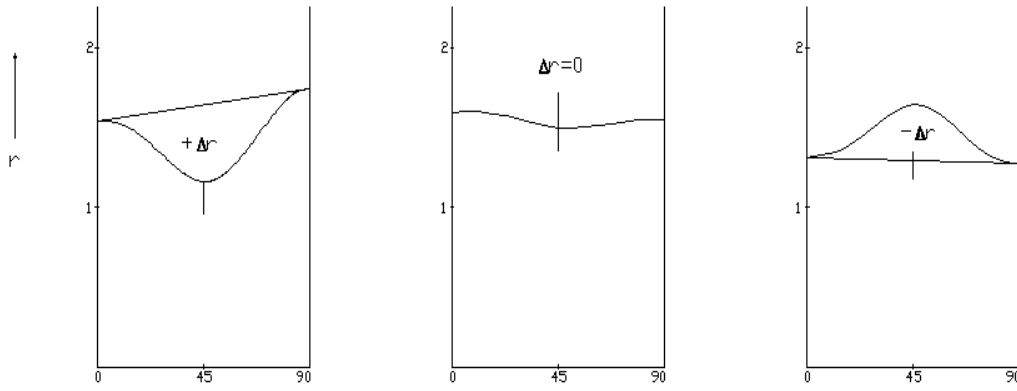
Ortalama dikey anizotropi katsayısı “r” sac malzemelerde derin çekilebilirliğin bir ölçüsüdür ve 1 den büyük olması istenir. Başka bir deyimle sac metalin kalınlık yönündeki birim şekil değiştirme direncinin genişlik yönündeki birim şekil değiştirme direncinden büyük olması istenir. Böylece malzemenin kalınlığında fazla incelme olmadan, birim şekil değiştirme büyük oranda sac düzlemde oluşacak ve biçimlendirme başarıyla sonuçlanacaktır.

Derin çekme işlemlerinde yüksek değerlerde dikey anizotropi katsayısı istenmekle beraber, düzlemsel anizotropi katsayısı aşağıdaki bağıntı ile tanımlanacağı gibidir ancak istenmemektedir.

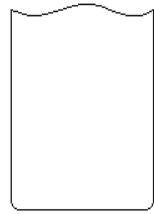
$$\Delta r = \frac{r_0 + r_{90} - 2r_{45}}{2} \quad (2.13)$$

Düzlemsel anizotropiye sahip parçalar haddeleme yönünde, ona dik yönde ve bu iki yön arasındaki herhangi bir açıya sahip yönde (ör. 45°) farklı şekil değiştirme özelliği gösterirler.

Saclarda Δr nin sıfıra eşit olması istenir. Çünkü bu durumda kalıbın üst tarafında kulak adı verilen dalgalanma meydana gelmez. Eğer $\Delta r < 0$ ise 45° lik yönlerde $\Delta r > 0$ ise 0° ve 90° lik yönlerde kulak oluşumu görülür. (şekil 2.14)



DENEY YÖNÜ İLE HADDELEME YÖNÜ ARASINDAKİ AÇI



0° - 90°

(a)



YOK
KULAKLANMA

(b)



45°

(c)

Şekil 2.14. Derin çekme işleminde düzlemsel anizotropi katsayısına bağlı kulak oluşumu [19]

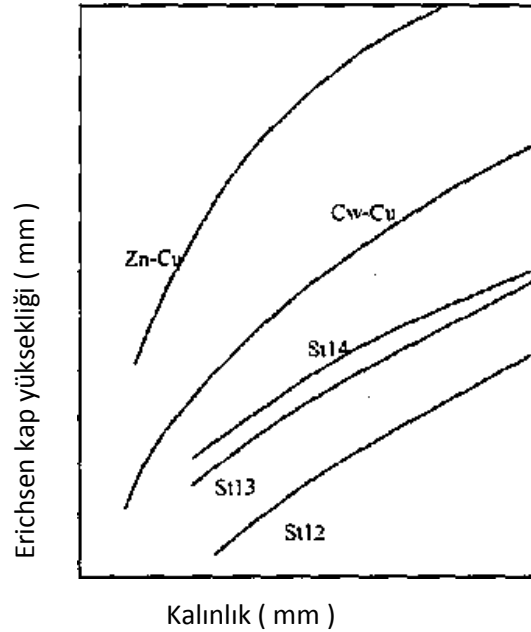
2.2.2.4. Akma dayanımı

Akma sınırı çekme testinde elastik deformasyonun durduğu ve plastik deformasyonun başladığı noktadır [18]. Plastik deformasyonun gerçekleşmesi için sac parçanın bütün bölgelerinde bu noktanın aşılması gerekir. Akma dayanımının artması durumunda derin çekme kuvveti de aynı oranda artmaktadır.

2.2.2.5. Sac kalınlığı ve tane boyutu

Malzemelerin preste şekillendirilme kabiliyeti malzemenin prese girmeden önceki kalınlığıyla yakından ilişkilidir [20]. Malzeme kalınlığı arttıkça verilebilecek deformasyon miktarı da artar (Şekil 2.15). Levha kalınlığının kopmadaki etkisini görmek amacıyla 0,5 ve 2,0 mm. kalınlıkta alüminyum numuneler çekme deneyine

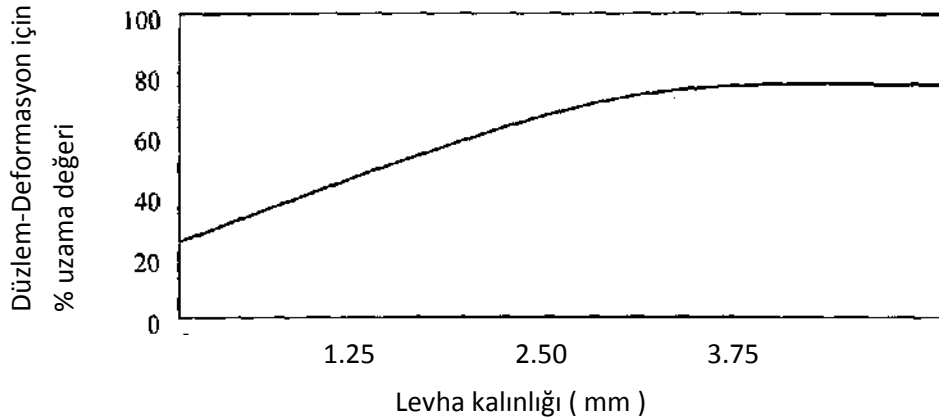
tabi tutulmuştur. Deney sonuçları çekme mukavemeti ve pekleşme üssü (n) değerlerinin değişmediği, ancak % kopma uzaması değerinin 0,5 mm'lik sac için daha az olduğu gözlenmiştir. Levha kalınlığının artmasıyla levhadaki kusurların etkisinin azalması nedeniyle biçimlendirme sınırı artmaktadır.



Şekil 2.15. Çeşitli levhalar için Erichsen kap yüksekliği ile levha kalınlığı arasındaki ilişki [19]

Normalde presleme işleminde kullanılacak levhalar için boşluk gibi içyapı kusurları kadar yüzey pürüzlülüğü de deformasyon sınırına etki eder [18]. Belirli bir deformasyon miktarı için yüzey pürüzlülüğünün etkisi malzeme kalınlığı azaldıkça artar. Bu nedenle belirli kalınlığın üzerindeki levhalar için yüzey pürüzlülüğünün çok büyük etkisi yoktur. Yüzey pürüzlülüğünün tane boyutuyla doğru orantılı olması nedeniyle deformasyon sınırının tahmininde levha kalınlığının yanı sıra tane boyutu da dikkate alınmalıdır.

Şekil 2.16 'da malzeme kalınlığının biçimlendirme sınır diyagramının en alt noktası yani düzlem deformasyon koşulunu ifade ettiği bölgeyle ilişkisini vermektedir. Buradan görülebileceği gibi levha kalınlığının etkisi yaklaşık 3 mm. kalınlıktan sonrası için sabit kalmaktadır.



Şekil 2.16. Malzeme Kalınlığının % Uzama Değeriyle Değişimi [20]

2.2.2.6. Elastisite modülü

Malzemenin elastik davranışını belirleyen en önemli faktördür. Özellikle akma dayanımı ile birlikte bükme İşlemlerinde karşılaşılan problemlerin analizinde önemli rol oynamaktadır. Geri yaylanmayı kontrol eden elastik şekil değişimleridir [20].

2.2.2.7. Kalıntı gerilmeler

Sacların şekillendirmesi sırasında üniform olmayan şekil değişimi nedeniyle üründe kalıntı gerilmeler doğar. Dengeleri bozulduğunda kalıntı gerilmeler parçanın çarpılmasına yol açar. Yüzeydeki çekme kalıntı gerilmeleri ise giderilemedikleri takdirde gerilmeli korozyon çatlamasına neden olabilir [22].

2.2.2.8. Geri yaylanma

Bükülen parça üzerinden bükme kuvveti kaldırıldığı takdirde parça bir miktar elastik şekil değiştirir ve sonuçta bükme açısı küçülür, bükme yarıçapı ise büyür. Bu olaya geri yaylanma denilmektedir [1]. Geri yaylanmanın giderilmesi amacıyla çeşitli yöntemler uygulanır. Bunlardan biri sacı gereğinden biraz fazla bükmeaktır. Böylece geri yaylanmadan sonra istenen bükme açısı elde edilir. Bu yöntemde parçanın ne kadar fazla büküleceği deneme-yanılma yöntemiyle bulunur. Geri yaylanmanın

önlenmesi için uygulanan bir diğer yöntem de bükme alanına ıstampanın burnu ile bastırarak bu alanda yüksek basma gerilmeleri doğurmaktır.

2.2.2.9. Malzemenin kimyasal bileşiminin biçimlendirmeye etkisi

Biçimlendirme işlemi gerektiren parçalar için daha çok düşük karbonlu çelikler kullanılır [19]. Bu tür çelikler genellikle %0,15'den az karbon ve kalıntı elementlerle birlikte toplam %1'den az alaşım elementi içerirler. Bazı yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çelikler daha fazla karbon ve diğer alaşım elementleri içerir. Ana alaşım elementi olarak manganez miktarı %0,20 – 0,60 arasında değişir. Deokside edici ya da daha özel amaçlar için kontrollü olarak silisyum, niyobyum, titanyum ya da alüminyum ilave edilebilir. Kükürt, krom, nikel, molibden, bakır, azot ve fosfor gibi çeliğin kalitesini belirleyen kalıntı elementler çelik üretimi sırasında mümkün olduğunca aşağıya çekilmelidir. Alaşımlı çelikler (bunlara yüksek mukavemet, düşük alaşımlı çelikler de dahildir) bu elementleri belirli miktarda içerirler.

Karbon miktarı arttırıldığında mukavemet artar ve süneklik düşer [20]. Bunun nedeni ferrit yapısındaki karbür fazının oluşumu ve ince tane boyutunun oluşumudur. Genellikle karbon miktarı %0,10 ile sınırlıdır ve biçimlendirme kabiliyetini arttırmak için daha da azaltmak gerekir.

Manganez çeliğin yüksek sıcaklıkta çalışma karakteristiğini yükseltir ve belirlenen tane boyutuna erişmeyi kolaylaştırır [20]. Ayrıca sülfürün kötü etkisini gidermek için, özellikle yüksek sıcaklıklar için, biraz manganez gereklidir. Düşük karbonlu çelik levhalar için manganez miktarı %0,2–0,6 arasında değişir, %2,0'a kadar manganez yüksek mukavemet - düşük alaşımlı çeliklerde görülür.

Malzemede sülfür miktarı az ise manganez miktarı da azaltılabilir ve böylece plastik deformasyon oranı değerinde artış görülür.

Fosfor ve kükürt elementleri biçimlendirme işlemlerinde çatlama ve kırılma riskini arttırdıklarından istenmezler. Ulaşılabilen değerlere göre ticari kalite çeliklerde fosforun %0,035 ve kükürdün %0,04'den az olması gerekir [20]. Bazı uygulamalarda bir

miktar fosfor R değerini arttırdığı için eklenir. Kükürt genelde yapıda mangansülfür bileşigi şeklinde bulunur. Bu bileşik deformasyon sırasında yarılmalara yol açar. Ayrıca levhanın anizotropisini artırır ve ısıl işlem sırasında rekristalizasyonu yavaşlatır ya da beklenmeyen rekristalizasyon sağlar.

Silisyum miktarı üretim sırasındaki deoksidasyon pratiğine bağlıdır. Kaynar çeliklerde genelde %0,10'den azdır. Söndürme işlemi için Al yerine Si kullanılırsa %0,4'e kadar artabilir. Si varlığı eğme sırasında çatlama riskini arttıran silikat inklüzyonlarının oluşmasına yol açar [20]. Son olarak Si çelik mukavemetini artırarak şekillendirilme kabiliyetini düşürür.

Azot düşük karbonlu çelikler için bariz sertleştirme sağlar. Aynı zamanda deformasyon yaşlanmasına da yol açar. Azotun etkisi alüminyum ilavesiyle giderilebilir [20].

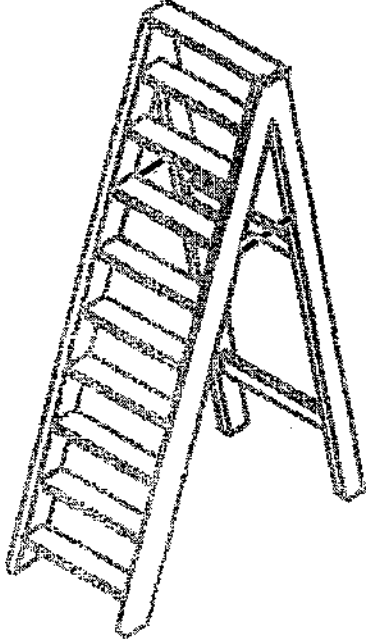
Mangan sülfür inklüzyonlarının şeklini iğnesel yapıdan küresel yapıya doğru dönüştürülmesini sağlamak için eklenebilir [20]. Küresel yapılar biçimlendirmede çatlama riskini azaltır.

Oksijen miktarı ingottaki metalin katılma karakteristiğini belirler [20]. Fazla miktarda oksijen nitrat formunu engeller ve böylece deformasyon yaşlanmasını düşürmek için katılan alaşım elementlerinin gerekliliğini azaltır. Silisyum, alüminyum ve titanyum gibi deoksidasyon elementleri oksijen miktarını kontrol ederler. Oksijen bu deoksidanlarla birleştiği zaman karmaşık yapıda metalik olmayan yapılar oluşur. Çoğu metalik olmayan yapı cürufta toplanır, fakat çelik içine kaçanlar uniform tane boyutunu yakalamada engel oluştururlar.

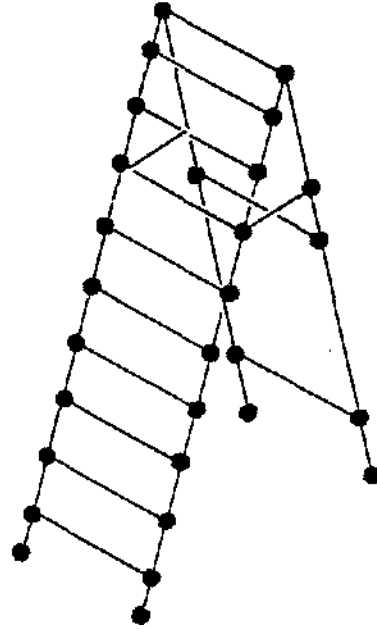
BÖLÜM 3. NÜMERİK ANALİZ

3.1. Sonlu Elemanlar Metodu

Sonlu elemanlar yöntemiyle analiz, bir tasarımın (Şekil 3.1) belirli yük ve sınır koşullarında simule edip, bu yüklere tepkisini bulmanın bir yöntemidir [2]. Tasarımın modellenmesi elemanlar denen parçalara ayrılarak yapılır (Şekil 3.2). Her elemanın yüklemeye vereceği tepkiyi ifade eden bir denklemi vardır. Bu elemanların tepkilerinin toplamı, tasarımın yüklemeye vereceği tepkiyi oluşturur. Elemanlar sonlu sayıda bilinmeyen içerir ve sonlu elemanlar ifadesi buradan gelir.



Şekil 3.1. Fiziksel model[2]



Şekil 3.2. Sonlu elemanlar modeli[2]

Sonlu sayıda bilinmeyen olan sonlu elemanlar modeli sonsuz miktarda bilinmeyen içeren fiziki modele yalnızca benzeşim yapar, asla gerçeğin yerini tutmaz (Şekil 3.1-3.2).

Bu durumda "benzerlik ne kadar iyi?" sorusu gündeme gelir. Ancak bu sorunun kolay bir yanıtı yoktur. Bu hangi sistemin simüle edildiğine ve simülasyon için nelerin kullandığına bağlıdır.

Sonlu elemanlar metodu, yüzeylerin geometri bilgisini matematiğe dönüştürmede oldukça başarılıdır. Sonlu elemanlar ağı detaylandıkça matematik model, fiziksel modele daha da yaklaşacaktır [2].

Çalışma içeriğinde plastik şekillendirmeyi incelemek için sonlu elemanlar yöntemi seçilmiştir. Sonlu elemanlar dışında bu konuda çözümler sunan başka yöntemlerde vardır. Fakat bu yöntemler malzeme hareketini her doğrultuda kontrol etmez, kesitlerde inceler. Ayrıca malzeme bilgisi içermeden yalnız geometrik özdeşlikler yardımı ile sonuca ulaştıkları için, gerilmeler ve enerji değişimleri konusunda yetersiz kalmaktadırlar [2].

Metal şekillendirmede sonlu elemanların seçilmesinin başka sebepleri de; çok farklı malzeme ve çok çeşitli temas tanımlama imkanlarıdır. Böylelikle şekillendirme işleminin doğasını oldukça fazla değişken ile simüle etme imkanı sağlanır.

3.1.1. Sonlu elemanlar yöntemine giriş ve temel kavramlar

Doğada karşılaşılan her olay, kanunları yardımıyla ve matematik diliyle anlaşılmaya çalışılır [2]. Bu olayların biyolojik, jeolojik veya mekanik olması durumu değiştirmez. Her olay kendine ait büyüklükler yardımıyla cebirsel, diferansiyel veya integral denklemler yardımıyla büyük oranda ifade edilebilir. Pratikte karşılaşılan problemler ne kadar karmaşık olursa olsun tarihin her devrinde o devrin ihtiyaçlarına cevap verecek derecede modellenmeye çalışılmış ve her devirde alınan örnekler yardımıyla insanın kullanımına arz edilmiştir. Günümüzde karmaşık problem denince gen yapısı anlaşılmaktadır. Hâlbuki mekanik, termal ve/veya aerodinamik

yüklere maruz, değişik şekilli delikler bulunan bir kanaldaki basınç dağılımını belirlemek üzere suyun modelini oluşturmak gibi daha birçok karmaşık problem bulunmaktadır. Problemin en azından bir kısmının anlaşılması bile pratik birçok yararlar sağlamaktadır.

İnsanlar çevresinde meydana gelen olayları ya da karşılaştıkları problemleri çoğu zaman kolayca kavrayıp doğrudan çözemezler. Bu yüzden karmaşık bir problem, bilinen veya kavranması daha kolay alt problemlere ayrılarak daha anlaşılır bir hale getirilir. Oluşturulan alt problemler çözülüp birleştirilerek esas problemin çözümü yapılabilir. Örneğin; gerilme analizi üzerinde çalışan mühendisler, gerilme problemini basit kiriş, plak, silindir, küre gibi geometrisi bilinen şekillerle sınırlarlar. Bu elde edilen sonuçlar çoğu kez problemin yaklaşık çözümüdür ve bazen doğrudan bazen de bir katsayı ile düzeltilerek kullanılır. Mühendislik uygulamalarında problemlerin karmaşıklığı sebebiyle genellikle problemlerin tam çözümü yerine, kabul edilebilir seviyede bir yaklaşık çözüm tercih edilir.

Öyle problemler vardır ki, tam çözüm imkânsız kabul edilerek yaklaşık çözüm tek yol olarak benimsenir.

Sonlu elemanlar metodu; karmaşık olan problemlerin daha basit alt problemlere ayrılarak her birinin kendi içinde çözülmesiyle tam çözümün bulunduğu bir çözüm şeklidir. Bu metod bilgisayarlar çağının bir ürünüdür. Bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle birlikte veri iletim hızlarının sürekli olarak artmasına bağlı olarak bu metotla çözüm yapan paket programlarının sayısı gittikçe artmaktadır. Günümüzde çeşitli analizler için bu paket programlarının kullanımı yaygınlaşmaktadır. Sonlu elemana metodunun üç temel özelliği vardır.

- 1) Geometrik olarak karmaşık olan çözüm bölgesi sonlu elemanlar olarak adlandırılan geometrik olarak basit alt bölgelere ayırır.
- 2) Her elemandaki, sürekli fonksiyonların, cebirsel polinomların lineer kombinasyonu olarak tanımlanabileceği kabul edilir.

- 3) Aranılan değerlerin her eleman içinde sürekli olan tanım denklemlerinin belirli noktadaki (düğüm noktaları) değerlerinin elde edilmesinin problemin çözümünde yeterli olmasıdır.

Kullanılan yaklaşım fonksiyonları interpolasyon teorisinin genel kavramları kullanılarak polinomlardan seçilir. Seçilen polinomların derecesi ise çözülecek problemin tanım denkleminin derecesine ve çözüm yapılacak elemandaki düğüm sayısına bağlıdır.

Sürekli bir ortamda alan değişkenleri (gerilme, yer değiştirme, basınç, sıcaklık v.s) sonsuz sayıda farklı değerlere sahiptir. Eğer sürekli bir ortamın belirli bir bölgesinin de aynı şekilde sürekli ortam özelliği gösterdiği biliniyorsa, bu alt bölgede alan değişkenlerinin değişimi sonlu sayıda bilinmeyen olan bir fonksiyon ile tanımlanabilir. Bilinmeyen sayısının az ya da çok olmasına göre seçilen fonksiyon lineer ya da yüksek dereceden olabilir. Sürekli ortamın alt bölgeleri de aynı karakteristik özellikleri gösteren bölgeler olduğundan, bu bölgelere ait alan denklem takımları birleştirildiğinde bütün sistemi ifade eden denklem takımı elde edilir. Denklem takımının çözümü ile sürekli ortamdaki alan değişkenleri sayısal olarak elde edilir.

Sonlu elemanlar metodunun kullanılması ve bilgisayarların sanayiye girmesiyle, bugüne kadar ancak pahalı deneysel yöntemlerle incelenebilen birçok makine elemanının (motor blokları, pistonlar vs.) kolayca incelenebilmesi, hatta çizim esnasında mukavemet analizlerinin kısa bir sürede yapılarak uygun tasarımın gerçekleştirilmesi mümkün olabilmektedir.

Sonlu elemanlar metodunu diğer nümerik metotlardan üstün kılan başlıca unsurlar şöyle sıralanabilir [2].

- a. Kullanılan sonlu elemanların boyutlarının ve şekillerinin değişkenliği nedeniyle ele alınan bir cismin geometrisi tam olarak temsil edilebilir.
- b. Bir veya birden çok delik veya köşeleri olan bölgeler kolaylıkla incelenebilir.
- c. Değişik malzeme ve geometrik özellikleri bulunan cisimler incelenebilir.

- d. Sebep sonuç ilişkisine ait problemler, genel direngenlik matrisi ile birbirine bağlanan genelleştirilmiş kuvvetler ve yer değiştirmeler cinsinden formüle edilebilir. Sonlu elemanlar metodunun bu özelliği problemlerin anlaşılmasını ve çözülmesini hem mümkün kılar hem de basitleştirir.
- e. Sınır şartları kolayca uygulanabilir.

Sonlu elemanlar metodunun temel prensibi, öncelikle bir elemana ait sistem özelliklerini içeren denklemlerin çıkartılıp tüm sistemi temsil edecek şekilde eleman denklemlerini birleştirerek sisteme ait lineer denklem takımının elde edilmesidir. Bir elemana ait denklemlerin elde edilmesinde değişik metotlar kullanılabilir. Bunlar içinde en çok kullanılan dört temel yöntem şunlardır.

Direkt yaklaşım: Bu yaklaşım daha çok tek boyutlu ve basit problemler için uygundur.

Varyasyonel yaklaşım: Bir fonksiyonelin ekstremize yani maksimum ve minimum edilmesi demektir. Katı cisim mekaniğinde en çok kullanılan fonksiyoneller potansiyel enerji prensibi, komplementer (tümleyen) potansiyel enerji prensibi ve Reissner prensibi olarak sayılabilir. Fonksiyonelin birinci türevinin sıfır olduğu noktada fonksiyonu ekstremize eden değerler bulunur. İkinci türevinin sıfırdan büyük veya küçük olmasına göre bu değer maksimum veya minimum olduğu anlaşılır.

Ağırlıklı kalanlar yaklaşımı: Bir fonksiyonun çeşitli değerler karşılığında elde edilen yaklaşık çözümü ile gerçek çözüm arasındaki farkların bir ağırlık fonksiyonu ile çarpılarak toplamlarını minimize etme işlemine “ ağırlıklı kalanlar yaklaşımı ” denir. Bu yaklaşım kullanılarak eleman özelliklerinin elde edilmesinin avantajı, fonksiyonellerin elde edilmediği problemlerde uygulanabilir olmasıdır.

Enerji dengesi yaklaşımı: Bir sisteme giren ve çıkan termal veya mekanik enerjilerin eşitliği ilkesine dayanır. Bu yaklaşım bir fonksiyonele ihtiyaç göstermez.

Sonlu elemanlar metodu ile problem çözümünde kullanılacak olan yaklaşım çözüm işleminde izlenecek yolu değiştirmez. Çözüm yöntemindeki adımlar şunlardır [2];

- a) Cismin sonlu elemanlara bölünmesi,
- b) Interpolasyon fonksiyonlarının seçimi,
- c) Eleman direngenlik matrisinin teşkili,
- d) Sistem direngenlik matrisinin hesaplanması,
- e) Sisteme etki eden kuvvetlerin bulunması,
- f) Sınır şartlarının belirlenmesi,
- g) Sistem denklemlerinin çözümü

Sonlu eleman probleminin çözümünde ilk adım eleman tipinin belirlenmesi ve çözüm bölgesinin elemanlara ayrılmasıdır. Çözüm bölgesinin geometrik yapısı belirlenerek bu geometrik yapıya en uygun gelecek elemanlar seçilmelidir. Seçilen elemanların çözüm bölgesini temsil etme oranında, elde edilecek neticeler gerçek çözüme yaklaşmış olacaktır. Sonlu elemanlar boyutlarına göre beş kısma ayrılabilir:

Tek boyutlu elemanlar: Bu elemanlar tek boyutlu olarak ifade edilebilen problemlerin çözümünde kullanılır.

İki boyutlu elemanlar: İki boyutlu (düzlem) problemlerinin çözümünde kullanılırlar. Bu grubun temel elemanı üç düğümlü üçgen elemandır. Üçgen elemanın altı, dokuz ve daha fazla düğüm ihtiva eden çeşitleri de vardır. Düğüm sayısı seçilecek interpolasyon fonksiyonunun derecesine göre belirlenir. Üçgen eleman, çözüm bölgesini aslına uygun olarak temsil etmesi bakımından kullanışlı bir eleman tipidir. İki üçgen elemanın birleşmesiyle meydana gelen dörtgen eleman, problemin geometrisine uyum sağladığı ölçüde kullanışlılığı olan bir elemandır. Dört veya daha fazla düğümlü olabilir. Dörtgen eleman çoğu zaman özel hal olan dikdörtgen eleman şeklinde kullanılır.

Dönel elemanlar: Eksensel simetrik özellik gösteren problemlerin çözümünde dönel elemanlar kullanılır. Bu elemanlar bir veya iki boyutlu elemanların simetri eksenini etrafında bir tam dönme yapmasıyla oluşurlar. Gerçekte üç boyutlu olan bu

elemanlar, eksensel simetrik problemleri iki boyutlu problem gibi çözüme olanağı sağladığı için çok kullanışlıdır.

Üç boyutlu elemanlar: Bu grupta temel eleman üçgen piramittir Bunun dışında dikdörtgenler prizması veya daha genel olarak altı yüzeyle elemanlar, üç boyutlu problemlerin çözümünde kullanılan tipleridir.

İzoparametrik Elemanlar: Çözüm bölgesinin sınırları eğri denklemleri ile tanımlanmışsa, kenarları doğru olan elemanların bu bölgeyi tam olarak tanımlaması mümkün değildir.

Böyle durumlarda bölgeyi gereken hassasiyette tanımlamak için elemanların boyutlarını küçültmek, dolayısıyla adetlerini artırmak gerekmektedir. Bu durum çözülmesi gereken denklem sayısını artırır, dolayısıyla gereken bilgisayar kapasitesinin ve zamanın büyümesine sebep olur. Bu olumsuzluklardan kurtulmak için, çözüm bölgesinin eğri denklemleri ile tanımlanan sınırlarına uyum sağlayacak eğri kenarlı elemanlara ihtiyaç hissedilmektedir. Böylece hem çözüm bölgesi daha iyi tanımlanmakta hem de daha az sayıda eleman kullanılarak çözüm yapılabilmektedir. Bu elemanlar üzerindeki düğüm noktaları bir fonksiyon ile tanımlanır [2]. İzoparametrik sonlu elemanın özelliği, her noktasının konumunun ve yer değiştirmesinin aynı mertebeden aynı şekil (interpolasyon) fonksiyonu ile tanımlanabiliyor olmasıdır. İzoparametrik elemanlara eş parametrelilik elemanlar da denir.

İzoparametrik elemanların şu özellikleri vardır:

- 1) Lokal koordinatlarda iki komşu eleman arasında süreklilik sağlanıyorsa, izoparametrik elemanlarda da sağlanıyor demektir.
- 2) Eğer interpolasyon fonksiyonu yerel koordinat takımındaki elemanda sürekli ise, izoparametrik elemanda da sürekli dir.
- 3) Çözümün tamlığı yerel koordinatlarda sağlanıyor ise izoparametrik, elemanlarda da sağlanır.

İzoparametrik elemanların anılan özellikleri dolayısıyla, interpolasyon fonksiyonları yerel koordinatlarda seçilir.

İnterpolasyon Fonksiyonlarının Seçimi: İnterpolasyon fonksiyonu alan değişkeninin eleman üzerindeki değişimini temsil etmektedir. İnterpolasyon fonksiyonunun belirlenmesi seçilen eleman tipine ve çözülecek denklemin derecesine bağlıdır. Ayrıca interpolasyon fonksiyonları şu şartları sağlamalıdır:

- 1) İnterpolasyon fonksiyonda bulunan alan değişkeni ve alan değişkenini en yüksek mertebeden bir önceki mertebeye kadar olan kısmi türevleri eleman sınırlarında sürekli olmalıdır.
- 2) İnterpolasyon fonksiyonunda bulunan alan değişkeninin bütün türevleri, eleman boyutları limitte sıfıra gitse bile alan değişkenini karakterize etmelidir.
- 3) Seçilen interpolasyon fonksiyonu koordinat değişimlerinden etkilenmemelidir.

Hem yukarıdaki şartları sağlamaları hem de türev ve integral almadaki kolaylığından dolayı interpolasyon fonksiyonu olarak genelde polinomlar seçilir. Seçilen polinom, yukarıdaki şartların gerçekleşmesi için uygun terimleri ihtiva etmelidir.

Eleman Direngelik Matrisinin Elde Edilmesi: Eleman direngeliğinin bulunması, elemana etki eden dış etkenler ile alan değişkenleri arasında bir ilişkiyi kurmak anlamına gelmektedir. Eleman direngeliğini elde ederken çözülecek problemin konusu, alan değişkeni, seçilen eleman tipi, seçilen interpolasyon fonksiyonu, eleman özelliklerini elde ederken kullanılan metot gibi pek çok faktör göz önüne alınmak durumundadır. Etki eden bu faktörlere göre de eleman direngeliğinin elde edilmesinde değişik yollar izlenir.

Sistem Direngelik Matrisinin Oluşturulması: Sistem direngelik matrisi sistemin düğüm sayısı ve her düğümdeki serbestlik derecesine bağlı olarak belirlenir. Elemanlar için hesaplanan direngelik matrisleri, elemanın üzerindeki düğüm numaralarına bağlı olarak genel direngelik matrisinde ilgili satır ve sütununa

yerleştirilir. Farklı elemanlar tarafından ortak kullanılan düğümlerdeki terimler genel direngenlik matrisinin ilgili satır ve sütununda üst üste toplanmalıdır. Elemanların düğüm numaralaması bir sistematığe göre yapılırsa genel direngenlik matrisinde elemanlar diyagonal üzerinde üst üste toplanır. Genelde direngenlik matrisi simetriktir.

Sisteme Etki Eden Kuvvetlerin Bulunması: Bir problemde sisteme etki edebilecek kuvvetler şunlar olabilir:

1) Tekil Kuvvetler: Tekil kuvvetler hangi elemanın hangi düğümüne ne yönde etki ediyorsa genel kuvvet vektöründe etki ettiği düğüme karşılık gelen satıra yerleştirilir. Problemin cinsine göre tekil yük kavramı değişebilir. Örneğin ısı iletimi probleminde elastisite problemindeki tekil yüke karşılık noktasal ısı kaynağı veya tanımlı ısı akışı yükleri bulunmaktadır.

2) Yayılı Kuvvetler: Bu kuvvetler bir kenar boyunca ya da bir alanda etkili olurlar.

3) Kütle Kuvvetleri: Eleman hacmi için geçerli olan merkezkaç kuvveti ve ağırlık kuvvetleri gibi kuvvetlerdir.

Sınır Şartlarının Belirlenmesi: Her problemin tabii olarak ya da yapay sınır şartları vardır. Sınır şartları, cismin çeşitli kısımlarındaki elastik yer değiştirmelerin ölçülebileceği bir referans sağlar.

Sistem Denkleminin Çözümü: Çözüm için, sistemin sınır şartları da göz önüne alınarak direngenlik matrisinin tersini almak yeterlidir. Fakat bilgisayar kapasitesi ve bilgisayar zamanı açısından çok büyük matrislerin çözümünü ters alma işlemi ile yapmak yerine Gauss eliminasyon metodu, Skyline yöntemi gibi yöntemlerle daha az kapasite ve daha kısa sürede yapmak mümkün olmaktadır.

3.1.2 Sonlu elemanların matematiği

Sonlu elemanlar metodu bir zayıf problem durumuna ihtiyaç duyar.

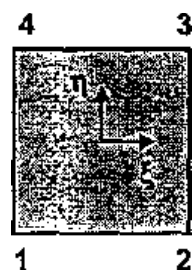
$L(u)$ ' yu Ω düzleminde bir ağırlık fonksiyonu w ile çarpıp, integrali alınarak zayıf form diye adlandırabileceğimiz yapıyı oluşturabiliriz. Bu yapıyı kısmi integrasyon ile iki basamağa ayılabılıriz [2];

$$\int_{\Omega} w_{(ij)} C_{ijkl} u_{(k,l)} dV = \int_{\Omega} w_i f_i dV + \int_r w_i \bar{t}_i dS \quad (3.1)$$

Interpolasyon fonksiyonu N_a , yardımıyla; yer değıştirme alanı u ve ağırlık fonksiyonu w yaklaşımları tanımlanabilir.

$$u_i \cong \sum_a N_a d_{ia} \quad (3.2)$$

Burada d_{ia} "a" düğüm noktasındaki "i" yönündeki değerdır. Interpolasyon fonksiyonu N_a bilinear quadratik eleman için Şekil 13'teki gibi ifade edilebilir.

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{1}{4}(1-\xi)(1-\eta) \\ N_2 &= \frac{1}{4}(1+\xi)(1-\eta) \\ N_3 &= \frac{1}{4}(1+\xi)(1+\eta) \\ N_4 &= \frac{1}{4}(1-\xi)(1+\eta) \end{aligned} \quad (3.3)$$


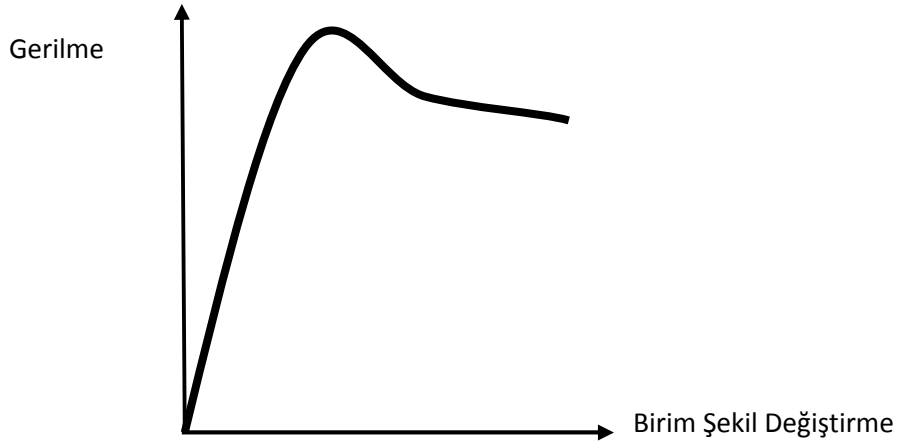
Şekil 3.3. Bi-lineer dört köşe eleman için interpolasyon fonksiyonları [2]

Lineer bir sistemde zayıf form (3.1) bilinmeyenler d_{ia} için çözdürülebilir.

" $Kd = F$ " Burada katılık matrisi K ve kuvvet vektörü F eleman bilgilerinin değerlendirilmesi ile sağlanır.

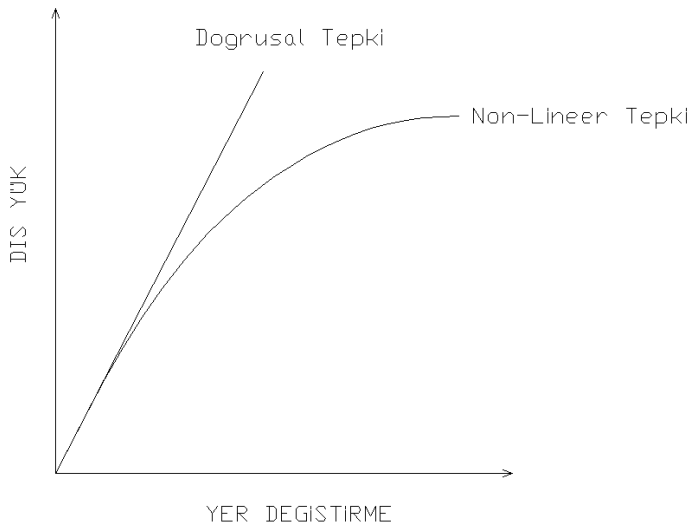
Yapıya uygulanan yük belirgin şekilde yapının katılığını değıştiriyorsa; yapının yük altında davranışını en iyi şekilde yalnızca doğrusal olmayan analizler ifade edebilir. Katılığın belirgin değışim nedenleri [23]:

- a. Elastik limitin üstünde birim şekil değiştirme
- b. Büyük yer değiştirmeler
- c. Yapılar arası temas



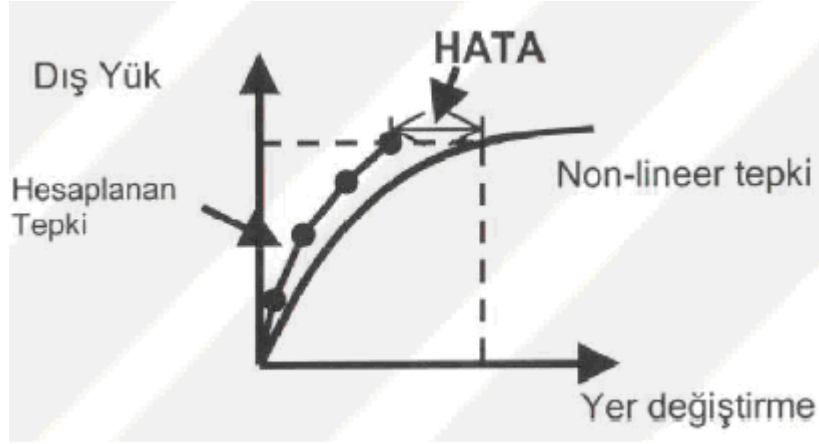
Şekil 3.4. Gerilme birim şekil değiştirme grafiği [2]

Yüklemeye, katılıkta belirgin etki yaratınca yük-deformasyon eğrisi doğrusal olmayan bir şekil alır (Şekil 3.4). Doğrusal olmayan yer değiştirmenin etkisi, doğrusal denklem sistemleri bir araya getirilerek oluşturulabilir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Dış yük yer değiştirme [2]

Bu yaklaşım; uygulanan dış yükü artış serilerine bölüp, her artışın sonunda katılık matrisini baştan düzenlemektir. Bu yaklaşımdaki problem; biriken hataların sonucun dengesini bozacak miktara gelme riskidir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Hata oluşumu [2]

Newton–Raphson algoritması bu konuda bir çözüm sunar (Şekil 3.7)

Yük kademeli olarak uygulanır. Ayrıca eşitlikteki denge, artış iterasyonlar ile korunmaya çalışılır.

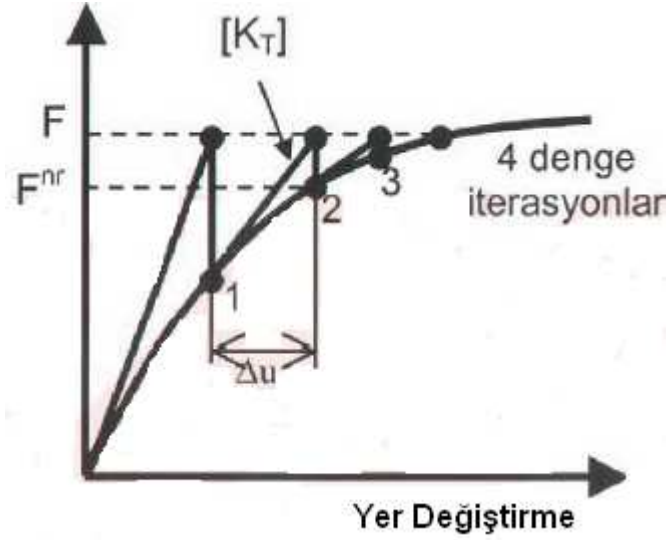
$$[K] \{\Delta u\} = \{F\} - \{F^{nr}\} \quad (3.4)$$

$[K_T]$ = Tanjant Katılık Matrisi

$\{\Delta u\}$ = Yer Değişirme Artırımları

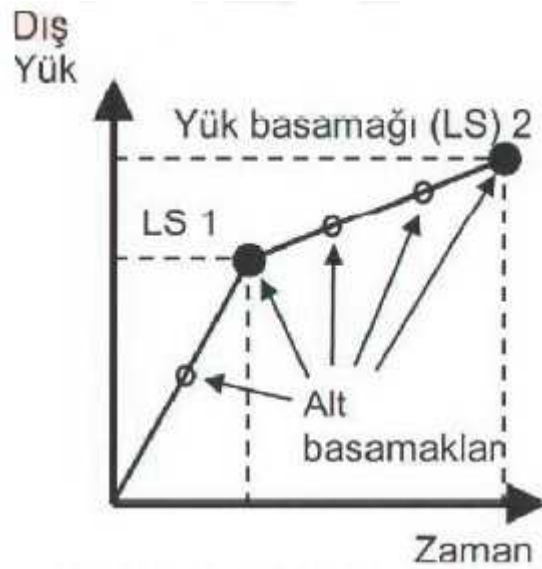
$\{F\}$ = Dış Yük Vektörü

İterasyonlar $\{F\} - \{F^{nr}\} = \varepsilon$ eşitliği sağlanana kadar sürer (iç dış yük farkı bir tolerans değerine ulaşıncaya kadar)



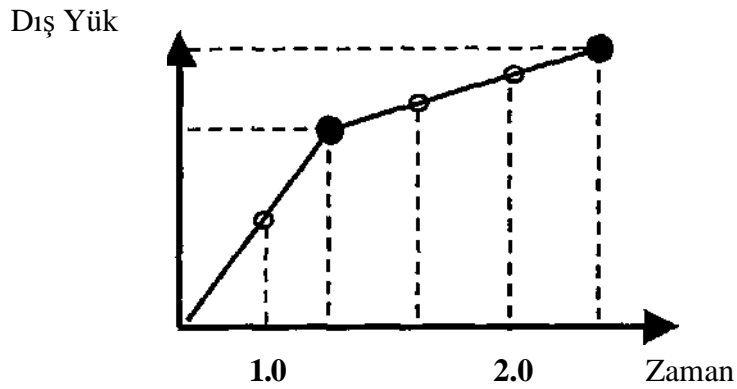
Şekil 3.7. İterasyon yaklaşımı [2]

Bu proses dış yükün tamamı uygulanana kadar sürdürülür. Bir veya daha çok yük basamağı sınır şartı olarak verilebilir. Böylelikle çok sayıda alt basamak ve içi içe geçmiş yükleme durumları oluşacaktır (Şekil 3.8).



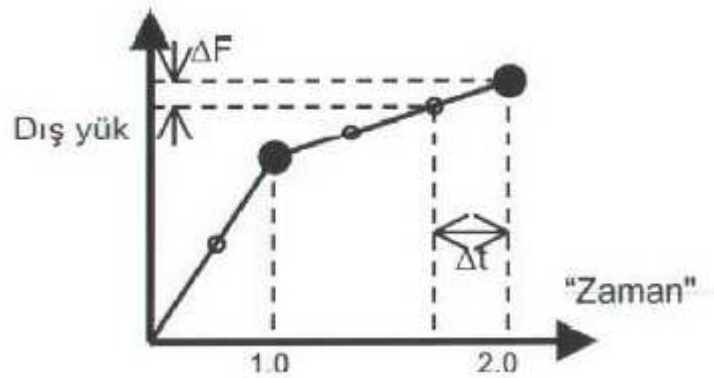
Şekil 3.8. Yük basamakları [2]

Dengeyi sağlamak için yapılacak iterasyonlar yüklemenin doğrusal olmayan bir şekil almasını her zaman sağlayamayabilir. Her yük ve alt basamak bir zaman basamağı (Şekil 3.9) ile ilişkilidir. Zaman statik analizlerde bir sayacıdır, kronometre değeri değildir. Oran artırımlı analizlerde zaman değeri örneğin; yer değiştirme miktarı olarak verilebilir, böylece yük ve çökme eğrisi elde edilmiş olur.



Şekil 3.9. Zaman basamakları [2]

Her basamak değişimi arasındaki zaman artırımını; zaman basamağı veya zaman adımı olarak ifade edilebilir. Δt zamandaki yük artış ΔF , daha büyük bir yük artışı ΔF doğurur (Şekil 3.10), böylece zaman adımının değişimi Δt sonuca direk etki eder. Paket sonlu elemanlar programları zaman artışı Δt değerinin ne olması gerektiğini girdilerden hesaplayan algoritmalar içerir [2].



Şekil 3.10. Yük ve zaman değişimi [2]

3.1.3. İmpilisit ve ekspilisit yöntemler

Ekspilisit yöntemin, impilisit yöntemden farkını anlayabilmek için öncelikle zamana bağlı sonlu elemanlar genel hareket denklemini inceleyelim [2];

$$(M + \alpha \Delta t K) V F^{n+1} = F^{n+1} - K d^{n+1} \quad (3.5)$$

Eğer bu ifadede $\alpha = 0$, olursa ve M kütle matrisi "topaklanmış" formda kullanılırsa, eşitliğin çözümü için matris işlemlerine gerek kalmayacaktır.

Bu durumda ifadenin çözüm metodu ekspilisit olarak adlandırılır.

3.1.3.1. Ekspilisit yöntem

Metal şekillendirme, sonlu elemanlar yönteminin bir alt başlığı sayılabilecek ekspilisit yöntemi ile gerçekleştirilebilmektedir [2].

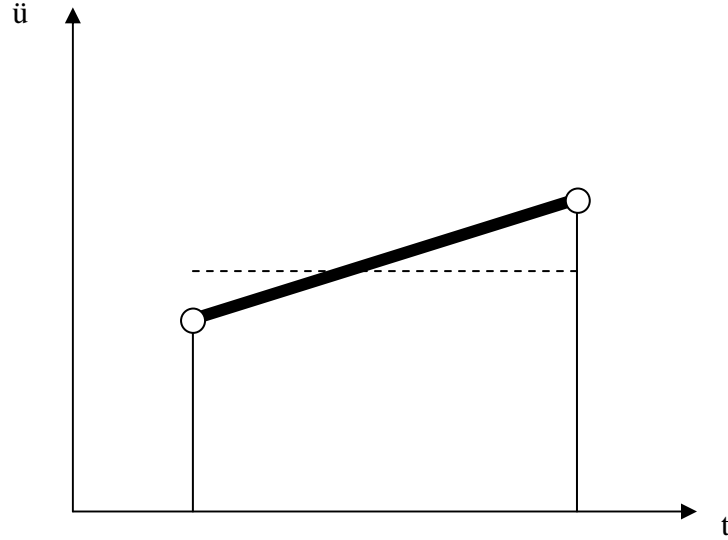
Ekspilisit sonlu elemanlar programlarının genel kullanım amaçları aşağıdaki gibidir:

- a. Transient dynamic analysis (dinamik geçiş analizleri),
- b. Her türlü non-linear analiz,
- c. Yapısal temas veya kopma problemlerinde,
- d. Plastik veya hiper elastik malzeme davranışlarını incelemede,
- e. Fazla uzayan veya fazla dönen geometrileri,

Zamana bağlı analizlerde ivme ve hız kavramları zamana ve yer değiştirmeye bağlı fonksiyonlarla ifade edilmektedir. Ekspilisit analizin zamana yaklaşımını kavrayabilmek için öncelikle statik analizlerde kullanılan impilisit zaman integrasyonunu tanımalıyız.

Ekspilisit iterasyon birçok sonlu elemanlar çözüm yönteminden çok daha hızlı çözüme ulaşır. Bu yüzden çok eleman içeren ve zaman basamağı sık non-linear problemlerde tercih edilir. Sonuçların tutarlılığı yapılan kabullere bağlı olsa da genelde gerilmeden ziyade, yer değiştirme sonuçları istenen problemlerde tercih edilir. Bu tip problemlere; havacılıkta kuş çarpması, otomotivde çarpışma, devrilme simülasyonları, gemi taşımacılığında iskeleye çarpma simülasyonu, inşaat mühendisliğinde yıkılma simülasyonu ve benzeri problemler örnek olarak gösterilebilir.

3.1.3.2. İmpilisit zaman integrasyonu (standart newmark metodu)



Şekil 3.11. İvme-zaman grafiği [2]

Bu metot sabit ortalama ivme kabulüne dayanır [24].

Temel hareket denklemini zamana göre ilerletirsek t_{n+1} bu denklem şöyle olur.

$$[M]\{\ddot{u}_{n+1}\} + [C]\{\ddot{u}_{n+1}\} + [K]\{u_{n+1}\} = \{F_{n+1}^a\} \quad (3.6)$$

İvme ve hızın zamana bağlı denklemleri ise aşağıdaki gibidir:

$$\ddot{u}_{n+1} = \frac{4}{\Delta t^2}(u_{n+1} - u_n) - \frac{4}{\Delta t}\dot{u}_n - \ddot{u}_n \quad (3.7)$$

$$\dot{u}_{n+1} = \dot{u}_n + \frac{\Delta t}{2}\ddot{u}_n + \frac{\Delta t}{2}\ddot{u}_{n+1} \quad (3.8)$$

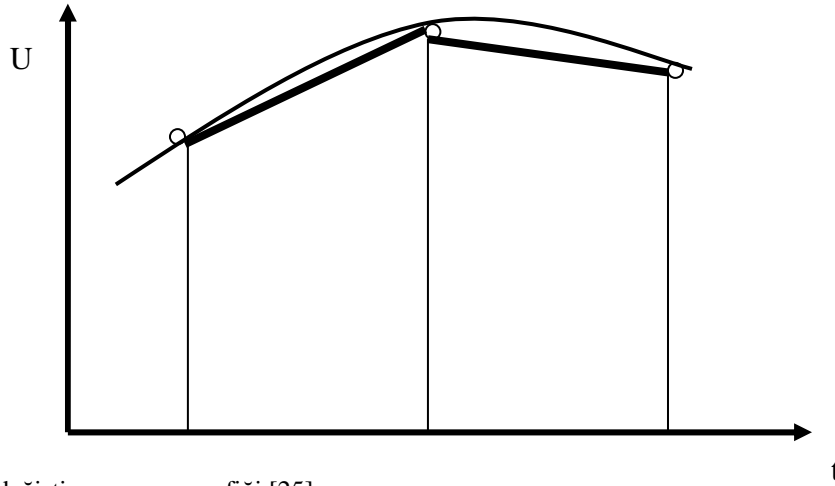
Böylece, t_{n+1} anında bilinmeyen yer değiştirmelerin çözülebileceği denklem sistemi aşağıdaki şekli alır.

$$\left(\frac{4}{\Delta t^2}[M] + \frac{2}{\Delta t}[C] + [K]\right)\{u_{n+1}\} = \{F_{n+1}^a\} + [M]\left(\frac{4}{\Delta t^2}\{u_n\} + \frac{4}{\Delta t}\{\dot{u}_n\} + \{\ddot{u}_n\}\right) + [C]\left(\frac{2}{\Delta t}\{u_n\} + \{\dot{u}_n\}\right) \quad (3.9)$$

Her zaman basamağında denklem sistemi baştan çözülür. Lineer analiz durumunda $[M]$, $[K]$, $[C]$ matrisleri sabittir ve zaman basamağı değeri değişmez. Katsayılar matrisi bir kez tanımlanır ve her zaman basamağında kullanılır. Non-Linear durumlarda matrisler keyfi olarak değiştirilir, böylece denklemlerin çözümü her zaman basamağında sağlanmış olur. Ayrıca $[K]$ matrisi bilinmeyen yer değiştirmelere dayanılarak oluşturulmuşsa çözüm iterasyonlar ile sağlanır.

3.1.3.3. Ekspilisit zaman integrasyonu (merkez fark metodu)

Bu metot lineer değişen yer değiştirme kabulüne dayanır (Şekil 3.12).



Şekil 3.12. Yer değiştirme zaman grafiği [25]

Temel hareket denklemini zamana göre ilerletirsek t_n anında bu denklem şöyle oluşur:

$$[M]\{\ddot{u}_n\} + [C]\{\dot{u}_n\} + [K]\{u_n\} = \{F_n^a\} \quad (3.10)$$

İvme ve hızın zamana bağlı denklemleri aşağıdaki gibidir.

$$\ddot{u}_n = \frac{1}{\Delta t^2}(u_{n+1} - 2u_n + u_{n-1}) \quad (3.11)$$

$$\dot{u}_n = \frac{1}{2\Delta t}(u_{n+1} - u_{n-1}) \quad (3.12)$$

Böylece, t_{n-1} anında bilinmeyen yer değiştirmelerin çözülebileceği denklem sistemi alttaki gibidir.

$$\left(\frac{1}{\Delta t^2}[M] + \frac{2}{\Delta t}[C]\right)\{u_{n+1}\} = \{F_n^a\} - \left([K] - \frac{2}{\Delta t^2}[M]\right)\{u_n\} - \left(\frac{1}{\Delta t^2}[M] - \frac{1}{2\Delta t}[C]\right)\{u_{n-1}\} \quad (3.13)$$


Kütle matrisini iki farklı tipte ifade etmek mümkündür:

- Tutarlı (consistent) kütle matrisi
- Topaklanmış, yığılmış (lumped) kütle matrisi

Bir yığın kütle matrisi yaratmak için her elemanın kütlesi hesaplanıp o elemanın düğüm sayısına bölünmelidir. Bu sonuçlar bir köşegen matrise yerleştirildiğinde yığın kütle matrisi elde edilmiş olur. Bu yöntem dışında da yığın kütle matrisi elde etme yöntemleri mevcuttur.

Ekspilisit zaman integrasyon metodunda tutarlı kütle matrisi kullanılmaz. Yerine topaklanmış kütle matrisi kullanılır.

Örneğin basit bir kiriş elemanı (BEAM3) için tutarlı ve topaklanmış kütle matrisleri aşağıdaki formdadır.

$\begin{matrix} UX_1 \\ UY_1 \\ ROTZ_1 \\ UX_2 \\ UY_2 \\ ROTZ_2 \end{matrix} \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & X & X & 0 & X & X \\ 0 & X & X & 0 & X & X \\ X & 0 & 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & X & X & 0 & X & X \\ 0 & X & X & 0 & X & X \end{bmatrix}$	 <p>1 BEAM 2</p>	$\begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix}$
Consistent [M]		Lumped [M]

Eğer [M] kütle matrisi topaklanmış kütle matrisi ise ve [C] matrisi de kütle matrisinden orantılanarak türetilmiş sönümlenme matrisi ise ekspilisit zaman

integrasyonu oldukça başarılı sonuçlar verecektir. Çünkü denklem sistemi birbirinde bağımsız denklemlerden oluşacaktır.

3.1.3.4. Ekspilisit yöntemin avantajları

- a. [K] Katılık matrisini değiştirmeye gerek yoktur.
- b. Çözülmesi gereken denklem sistemleri yoktur.
- c. Bilgisayar işlemlerinde daha az bellek kullanılır.
- d. Her zaman basamağı için daha az analizle uğraşılır.
- e. Lineer ve Non-Lineer çözüm ayrımı yoktur.

3.1.3.5. Stabilite limiti

İmpilisit zaman integrasyonunda zaman durağandır. Zaman basamağı miktarı keyfi olarak geniş tutulabilir, fakat istenen sonuçlara uygun değerlerde seçilmelidir. Eğer non-lineerite söz konusuysa zaman basamağının miktarı yakınsamayı yakalayabilecek kadar küçük seçilmelidir [2].

Ekspilisit zaman integrasyonunda zaman yalnızca, zaman basamağının boyutu kritik zaman basamağı değerinden küçükse durağanlaşır [24].

$$\Delta t \leq \Delta t^{crit} = \frac{2}{\omega_{max}} \quad (3.14)$$

Burada ω_{max} = en büyük doğal dairesel frekanstr.

3.1.3.6. Kritik zaman basamağının büyüklüğü

Bir çubuğun kritik zaman basamağının büyüklüğü [24];

doğal frekans;

$$\omega_{\max} = \frac{c}{l} \quad (3.15)$$

ses hızı;

$$c = \sqrt{\frac{E}{P}} \quad (3.16)$$

'nın fonksiyonudur.

Δt zamanı, dalganın l uzunluğundaki bir çubuğun üzerinden yayılmak için ihtiyaç duyduğu süredir.

Ekspilisit zaman integrasyonunda kritik zaman basamağının büyüklüğü elemanın uzunluğuna ve malzeme özelliklerine bağlıdır.

3.1.3.7. LS-DYNA' da zaman basamağı büyüklüğü

LS-DYNA her zaman basamağında bütün elemanların ihtiyaç duyduğu zaman basamağı miktarını hesaplar. Stabilitate sebeplerinden dolayı 0.9 (varsayılan) oran faktörüyle zaman basamağı değerini çarpar [24].

$$\Delta t = 0,9 \frac{l}{c} \quad (3.17)$$

Karakteristik uzunluk l ve dalganın yayılma hızı c , eleman tipine bağlıdır [23].

Bu büyüklükler, eleman için;

$$c = \sqrt{\frac{E}{P}} \quad (3.18)$$

l = eleman uzunluğu

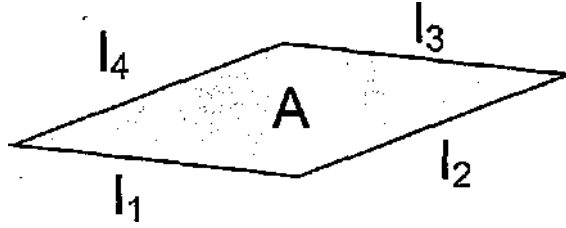
dörtgen kabuk eleman için;

$$l = \frac{A}{\max(l_1, l_2, l_3, l_4)} \quad (3.19)$$

$$c = \sqrt{\frac{E}{p(1-v^2)}} \quad (3.20)$$

burada l_1, l_2, l_3, l_4 dörtgenin kenar uzunlukları, A 'da alandır. (Şekil 3.13) üçgen kabuk eleman için;

$$l = \frac{2A}{\max(l_1, l_2, l_3)} \quad (4.21)$$



Şekil 3.13. Kabuk elemanın kenar numaraları [24]

3.1.3.8. İmpilisit programlarda (ANSYS gibi) izlenen prosedürler

İmpilisit programlarda izlenen prosedürler şu şekilde sıralanabilir [2];

- Elemanların yerel katılık matrisi hesaplanır.
- Tam (Global) katılık matrisi oluşturulur.
- Katılık matrisinin (K^*) tersi alınarak katsayılar matrisi elde edilir.
- Sağ vektörü (eski yer değiştirmeler) hazırlanır.
- Yeni yer değiştirmeler tersi alınmış katılık matrisi (K^*) ile sağ vektörün çarpımı ile elde edilir.
- Birim şekil değiştirmeler, gerilmeler ve kuvvetler her eleman için yeni yer değiştirmelere göre hesaplanır.

İmpilisit programlarda non-lineer geçiş analizlerinde 1 ila 5 iterasyon döngü gereklidir. Ayrıca lineer geçiş analizlerinde 4 ila 6 iterasyon döngü gereklidir. İmpilisit yazılımlarda en çok zamanı denklemlerin çözümü alır.

3.1.3.9. Ekspilisit programlarda (LS-DYNA gibi) izlenen prosedürler

Ekspilisit programlarda izlenen prosedürler Şu Şekilde sıralanabilir [2];

- a. Kütle matrisi hesaplanır, her düğüm noktasındaki kütle hesaplanır. Bu işlem yalnız bir kere en başta yapılır.
- b. Sağ vektörü (eski yer değıştirmeler) hazırlanır.
- c. Eski yer değıştirmelere göre birim Şekil değıştirmeler, gerilmeler ve kuvvetler her eleman için hesaplanır.
- d. Yeni yer değıştirmeler sağ vektörün düğüm noktalarındaki yüklere bölünmesi ile elde edilir.

Ekspilisit programlarda geçiş analizlerinde 2 ila 3 iterasyon döngüsü gereklidir. Ayrıca lineer ve non-lineer analiz arasında fark yoktur. Ekspilisit yazılımlarda en çok zamanı eleman biçimlenmesinin oluşturulması alır.

3.1.3.10. Ekspilisit zaman integrasyonunda elemanlar

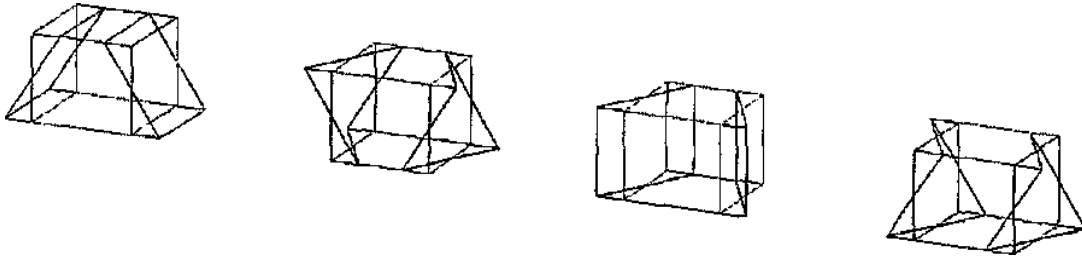
Ekspilisit analiz prosedüründe en çok süreyi ve işlemi elemanların işlenmesi alır. Bu yüzden hızlı eleman biçimlenmeleri gereklidir. Elemanlardaki integrasyon noktalarının miktarı toplam CPU zamanını direk etkiler. Bu yüzden indirgenmiş elemanlar kullanılır [2]. Standart tuğla (brick) elemanlar tam ortalarında bir adet hesap noktası içerir.

Standart kabuk elemanlar, ortalama düzlemde bir adet hesap noktası içerir. İlave olarak kullanıcı tarafından tanımlanacak hesap noktaları kalınlığa eşit aralıklarla yerleştirilir.

Tek hesaplama noktasının avantajları; bilgisayardaki hesaplama süresini kısaltmak ve büyük eleman deformasyonlarında sağlıklı sonuç elde etmektir. Tek hesaplama noktasının dezavantajı ise hiç enerji harcamadan deformasyonun mümkün olmasıdır.

3.1.3.11. Kum saati durumları

Tek hesaplama noktalı katı elemanlarda sıfır enerji deformasyonları aşağıda gösterilmiştir [24].

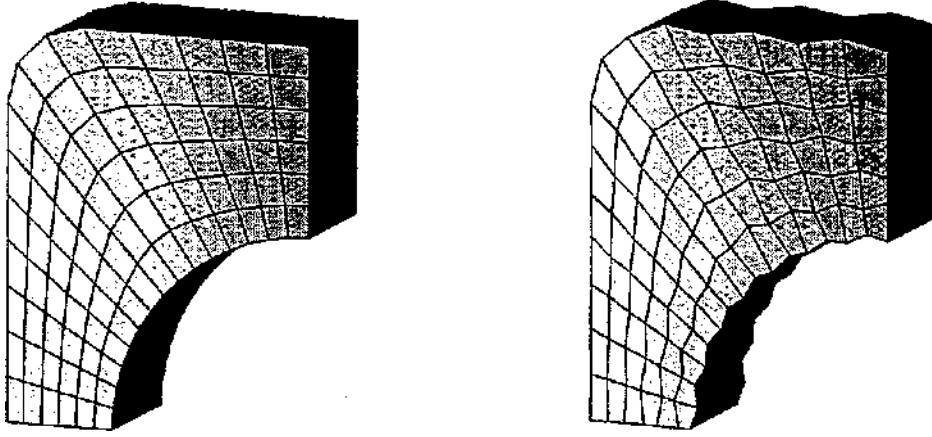


Şekil 3.14. Kum saati hatasının şekil ile gösterimi[2]

Sıfır enerji ile gerçekleşen deformasyonları kontrol altında tutmak analizin tutarlılığı açısından gereklidir. Bu olay kum saati durumu (Hourglass Modes) olarak adlandırılmıştır. (Şekil 3.14–3.15) [24].

Kum saati durumunun kontrolü beraberinde ilave katılık veya viskoz sönümlere yol açmaktadır [2].

Özellikle tek noktadan yapılan yüklemeler kum saati durumunun oluşmasına sebep olur. Kum saati durumu oluşan eleman bu etkiyi komşusu olduğu elemanlara da iletir. İşlemler esnasında tek noktadan uygulanan yüklere dikkat edilmelidir. Ayrıca bu yükleme durumu temas esnasında da oluşabilmektedir.



Şekil 3.15. Katı ağ yapısının kum saati durumu [2]

LS-DYNA oluşan kum saati durumunu otomatik olarak kontrol eder ve kum saati enerjisinin zamana bağlı değişimini çıktı dosyasına (d3plot) yazar. Bu dosya incelenerek sonucun tutarlılığı gözden geçirilebilir [2].

Hesaplama noktaları sayısını arttırmak, işlem süresini arttırmasına rağmen bir çözüm olabilir. Tam hesaplanmış elemanlar tek noktada hesaplanmış elemanlarla bir arada kullanılarak kum saati durumundan uzak durulabilir.

Tam hesaplanmış eleman kullanımında dikkat edilecek bir husus da bu eleman tipini, yalnızca sonuçları bizim için önemli olan parçaya uygulamaktır. Örneğin kalıpta parça şekillendirmede; şekillenecek sac gibi. Ayrıca bu eleman tipine sahip parçanın eleman sayısını; makine kapasitesi ve makul çözüm süresi göz önünde tutarak belirlemek gereklidir.

3.1.3.12. Ekspilisit zaman integrasyonu için elemanlar

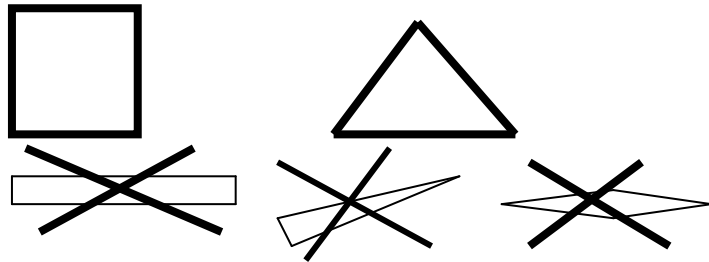
Ekspilisit dinamik analizlerde kullanılan tüm elemanlar lineer yer değiştirme fonksiyonlarından oluşur. Yüksek dereceli yer değiştirme fonksiyonları içeren veya P-metot elemanlar kullanmak mümkün değildir. İlave şekil fonksiyonları veya eleman kenar ortalarında düğüm noktası içeren elemanlarda kullanılmamaktadır [2].

Lineer yer değiştirme fonksiyonuna sahip tek hesap noktalı elemanlar şu non-lineer analizlerde kullanılır;

- Geniş dönme ve yer değiştirme
- Geniş birim şekil değiştirme
- Plastik şekil değiştirme
- Malzeme kırılmaları
- Temas

3.1.3.13. Ekspilisit dinamik analizlerde modelleme

- Üçgen, piramit veya tetragonal prizma elemanlarından kaçınılmalı.
- Küçük elemanlardan kaçınılmalı.
- Keskin elemanlardan kaçınılmalı.(Şekil 3.16)
- Çarpılmış (burulmuş) elemanlardan kaçınılmalı.



Şekil 3.16. Kabuk eleman tipleri ve hataları [2]

3.1.3.14. İmpilisit ve ekspilisit yöntemlerin hesaplama süresine etki eden faktörler

İmpilisit yöntemlerin hesaplanma süresine etki eden faktörler şunlardır [2];

- Model boyutu
- Non – lineerite derecesi
- Zaman basamağı sayısı

Expilisit yöntemlerin hesaplama süresine etki eden faktörler şunlardır;

- a. Model boyutu
- b. Kritik zaman basamağı (Elaman kenar boyu, ses dalgasının hızı, elatisite modülü, uzunluk)
- c. İşlemin bitiş zamanı

3.1.3.15. İmpilisit ve ekspilisit yöntemlerde kullanıcının etki edebileceği faktörler

İmpilisit yöntemlerde kullanıcının etki edebileceği faktörler şu şekildedir [23];

- a. Çözüm için yakınsama kriterinin tespiti
- b. Çözüm
- c. Hesap yakınsamıyorsa yakınsama kriterinin değiştirilip işlemin tekrar edilmesi

Ekspilisit yöntemlerde kullanıcının etki edebileceği faktörler şu şekildedir [23];

- a. Modelin çözüme mümkün olan en hızlı şekilde hazırlanması (Alt döngüler, kütle orantısı, küçük elemanlardan kaçınma)
- b. Eğer bir statik analizde mümkün olan en hızlı yükleme ile sonu, tutarlı bir şekilde ulaşılmak isteniyorsa; bu ancak dinamik anal ile olanaklıdır.
- c. Metal şekillendirme simülasyonlarında ıstampanın hızı gerçek hayattakinden çok daha hızlı alınabilir, bu kabul sonuç tutarlılığında önemsenecek bir hata yaratır.
- d. Tüm sonuçların tutarlılığı kinetik enerji değişiminin incelenmesi ile kontrol edilebilir.

3.2. Simülasyonun Kullanımı

3.2.1. Akademik ve ticari yazılımlara genel bakış

Tek bir sınıflandırma yapılsa dahi yukarıda bahsedilen yöntemlerin birbirlerine göre önemli farklılıkları mevcuttur [17]. Bazı ticari yazılımlar kullanıcı dostudur ve kararlılığı yüksektir. Bazıları ise hala gelişme sürecinde olup sadece uzmanlar tarafından kullanıldığında simülasyon yapabilirler. Yine pek çok yazılım üç boyutlu şekillendirme analizi yapabildiği halde bir kısmı, düzlem uzama veya asimetrik

kabulleri esas aldığından, sadece iki boyutlu takım kesitlerini kullanarak genel şekil değiştirmeyi tahmin etmeyi amaçlar.

Sacın şekillendirilmesini tek adımda (one step) hesaplamaya yönelik hızlı fakat güvenilirliği daha düşük, basit yazılımlar da-mevcuttur [17]. Bazı algoritmalar şekillenmiş parçadan düz saca gitmek suretiyle hesaplama yapar. Ancak bu durumda şekillendirme simülasyonu açısından önemli olan sürtünme, pot oluşumu gibi etkileri hesaplamak mümkün olmaz. Yine de bu tür uygulamalar başta da söylendiği gibi hızlıdır ve özellikle ilk sacın boyutlarını tespit için gayet yararlıdır.

Sac şekillendirilmesinin gerçeğe mümkün olduğunca yakın tahmin edebilmek ve bunu mümkün olabildiğince çok parametreyle ifade edebilmek, şu an sonlu elemanlarla analiz yapan yazılım firmalarının benimsedikleri bir eğilimdir. Elbette hesaplama zamanı da önemli bir kriterdir. Bu yazılımları Tablo 3.1'de bazı özellikleriyle genel olarak görmek mümkündür. Bunlardan belli başlılarına kısaca değinmek yararlı olacaktır.

Pam-stamp 1987 yılında geliştirilmeye başlanmıştır. Bu tarihten sonra pek çok otomotiv üreticinin kullanımına girmiştir. Bunlar arasında BMW, Fiat, General Motors, Hyundai, Renault sayılabilir. Pek çok CAD sistemi ile uyumlu olup IGES veya VDA formatında dosya transferi yapabilir. Hem kabuk eleman hem de 3 boyutlu cidar eleman kullanmak mümkündür. Ters açı kontrolü, otomatik kalıp pozisyonlaması, otomatik eleman boyut ve sayı ayarlaması, geri yaylanma modülü, ve malzeme kütüphanesi mevcuttur [2].

Son yıllarda ESI grubuna katılmış olan bir yazılım olan OPTRIS de dinamik açık bir yazılımdır. Yukarıdakilere ilaveten OPTRIS'te hidroform ve tüp şekillendirme simülasyonlarını da yapmak mümkündür. Bu yazılım ilerdeki bölümlerde daha ayrıntılı olarak incelenecektir [2].

Tablo 3.1. Mevcut ticari ve akademik yazılımlar[2]

Program Name	Organizasyon	Ülke	Sınıflandırma	
SHEET-3	Ohio State Univ.	ABD	Rijid Visko-Plastik	
MFP2D	Univ. Of Catalunya	İspanya		
MFP3D	Univ. Of Catalunya	İspanya		
FCKMSYS-SHEET	KAIST	Kore		
CASHE	KAIST	Kore		
MIIFRM	Fordİvfotor	ABD	Elasto-plastik Statik- Kapalı Y.	
DIEKA	Univ. Of Twente	Hollanda		
IAGAMNE	Univ. Of liege	Belçika		
CALEMBOUR	Ecole Central Paris	Fransa		
ABAQUS	KKSİnc.	ABD		
FLECHE	Univ. Tech. Cörrpiegne	Fransa		
MKE3D	Livermore Sofhvare	ABD		
AUTOFORM	ETHZwrich	İsviçre		
BENDİ	Ford Motor	ABD		
İNDEED	İNPRO	Almanya		
PRCML	InstNarional Sci.	Fransa		
MARC	Ivkrç Analaysis	ABD		
ROBUST	OsakaUniv.	Japonya		Elasto-plastik Statik- Açık Y.
ITAS-3D	REKENInst.	Japonya		
ITAS-2D	RKENInst.	Japonya		
LS-DYNA3D	livermore Software	ABD	Elasto-plastik Dinamik-Açık Y.	
PAMSTAMP	ES.I.	Fransa		
RADIOSS	MECALOG	Fransa		
ABAQUS/Explicit	HK.S.Inc.	ABD		
OFIRIS	ESI	Fransa		
CES-3D	Univ. Of Catalunya	İspanya		

ABAQUS biraz daha geniş amaçlı bir yazılımdır. Sadece sac şekillendirmede gerilme analizi değil aynı zamanda ısı transferi analizleri ve yapısal, sivil, tıbbi alanlardaki diğer mühendislik analizlerinde kullanılabilir. Bu nedenle pek çok eleman tip mevcuttur. Genelde araştırma projelerinde kullanılır ve ordu gibi büyük devlet kurumlarında yaygındır [17].

LS-DYNA geniş eleman kütüphanesi, gerek ısı transferi gerekse gerilme analizi yapabilmesi gibi özellikleri ile pek çok uygulama alanında kullanılmaktadır. Genel olarak araştırma amaçlı ve çokça da üniversitelerde tercih edilir. Son zamanlar

düşme testi modülü de bir yenilik olarak ilave edilmiştir. Sonlu elemanlarla analiz yapan yazılımları en eskilerinden biridir.

AutoForm İsviçre kökenli bir yazılım olup diğer yazılımlara göre daha gençtir. Statik implisit yöntemle çalışır. One step ve incremental hesaplamalar yapabilir. Kabuk eleman kullandığı için sac kalınlığı artıkça gerçekçi simülasyondan uzaklaşılır. Die-design modülü ile yardımcı çekme yüzeyleri bu program içersinden bir CAD programına ihtiyaç duymadan oluşturulabilir. Hatta daha sonra bu yüzeyler IGES çıktı olarak alınabilir.

3.2.2. Sac metal form işlemlerinde simülasyonun kullanılması

Şimdilik çoğunlukla otomotiv ve uçak sanayiinde kullanılan simülasyon programlarının yazılımları özellikle sac malzeme form verme işleminde sac malzeme optimizasyonu üzerine ve derin çekme ve gererek form verme operasyonlarında kullanılmak üzere geliştirilmişlerdir [17].

Simülasyon programlarının kullanıldıkları yerler;

- a. Karmaşık derin çekme ve gererek şekil verme kalıplarının tasarım aşamasında
- b. Proses planlama ve concept metodolojisinin kontrolü
- c. Form verme işlemi sırasında pot şekli, çekme radyüsleri, süzdürmeler, yağlama ve pot kuvveti gibi işlem parametrelerinin optimizasyonunda
- d. Malzeme ve yağ sarfiyatının rminimizasyonunda
- e. Kullanılacak sac malzemenin alternatiflerinin belirlenmesi ve malzeme miktar optimizasyonunda
- f. Farklı pot kuvveti ve pot teknolojisi gibi işlemlerin geliştirilmesinde kullanılır.

Simülasyon işlemi tasarımcı tarafından işlem süresinde kullanılan değerlendirme için dikkate alındığında çok hızlı ve yüksek kalitede sonuç eldesi sağlamaktadır. Bu işlemler sırasında temel olarak şu özelliklerden faydalanır [17].

1. kıyaslama sistemleri vasıtasıyla hızlı hesaplama performansı
2. bütün endüstriyel uygulamalar için kabul edilebilir sonuçlar

Simülasyon işlemi şu gerçek avantajları sunar;

- a. Önemli miktarda tasarım ve geliştirme işlemlerinde sürelerin azaltılması
- b. Geliştirme işlemlerinde kullanılan malzeme miktarındaki azalma
- c. Tasarım esnasında geçiş zaman aralarının azaltılması
- d. Ürün kalitesindeki artıştır.

Simülasyon programlarının software' lerindeki gelişimle birlikte simülasyon için daha özelleşmiş data ve destek sistemi gerekmektedir. Artan sayı ve fiyatların uygunluğu daha çok firmanın bu tür programları almasını kolaylaştırmıştır [17].

Kullanılabilir (uygun) bir simülasyon programı için artık yüksek kalitede bir kullanıcıya ihtiyaç yoktur. Konu ile ilgilenen her bir çalışan kısa bir eğitimden sonra kullanıcı olabilmektedir.

Prototip evresindeki incremental (artımlı) metodlar:

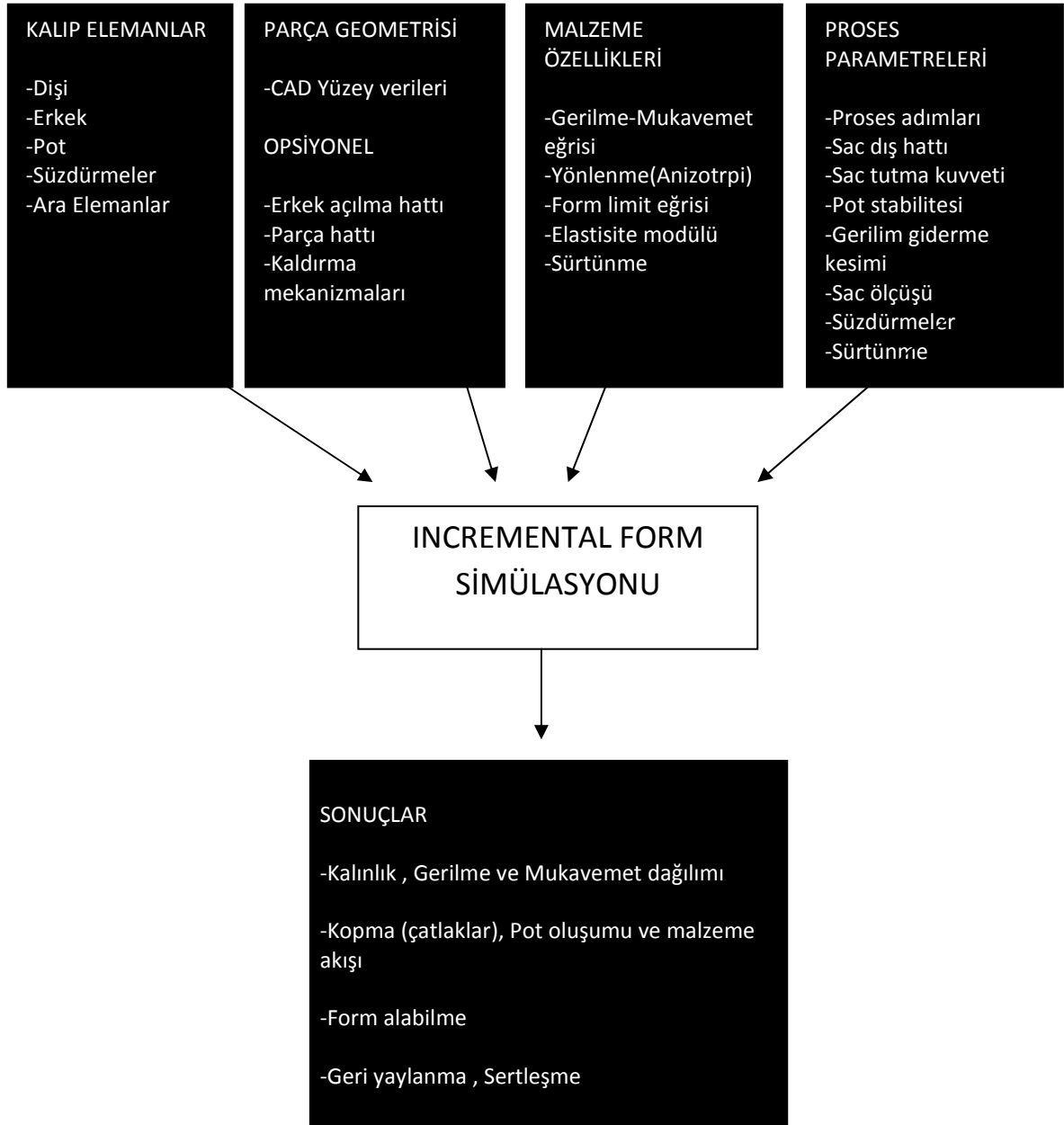
Proses optimizasyonu için birçok kesin hesaplar incremental (artımlı) metodun yardımıyla yapılabilir. Burada form verme prosesi düz bir sacdan başlayarak preste gerçekleşen deformasyonun hesaplanması ile görülebilir [17].

Bu tür simülasyonlar için kalıp elemanın CAD tanımlaması gereklidir. Bu veriler fırın gelişimindeki prototip evresine veya üretim öncesi devreye kadar uygun değildir. Diğer giriş dataları metal karakteristikleri ve proses parametrelerini içermektedir. Incremental (artımlı) simülasyon bütün form işlemlerini ilgilendiren gerilme dağılımı, çatlaklar, springback (geri yaylanma) gerilme birikimi ve sertleşme gibi form verme esnasında ortaya çıkan olaylardan gerekli parametreleri sağlar. Bundan dolayı bu metodla kalıp elemanlarını optimum tasarlamak mümkün olmaktadır [17].

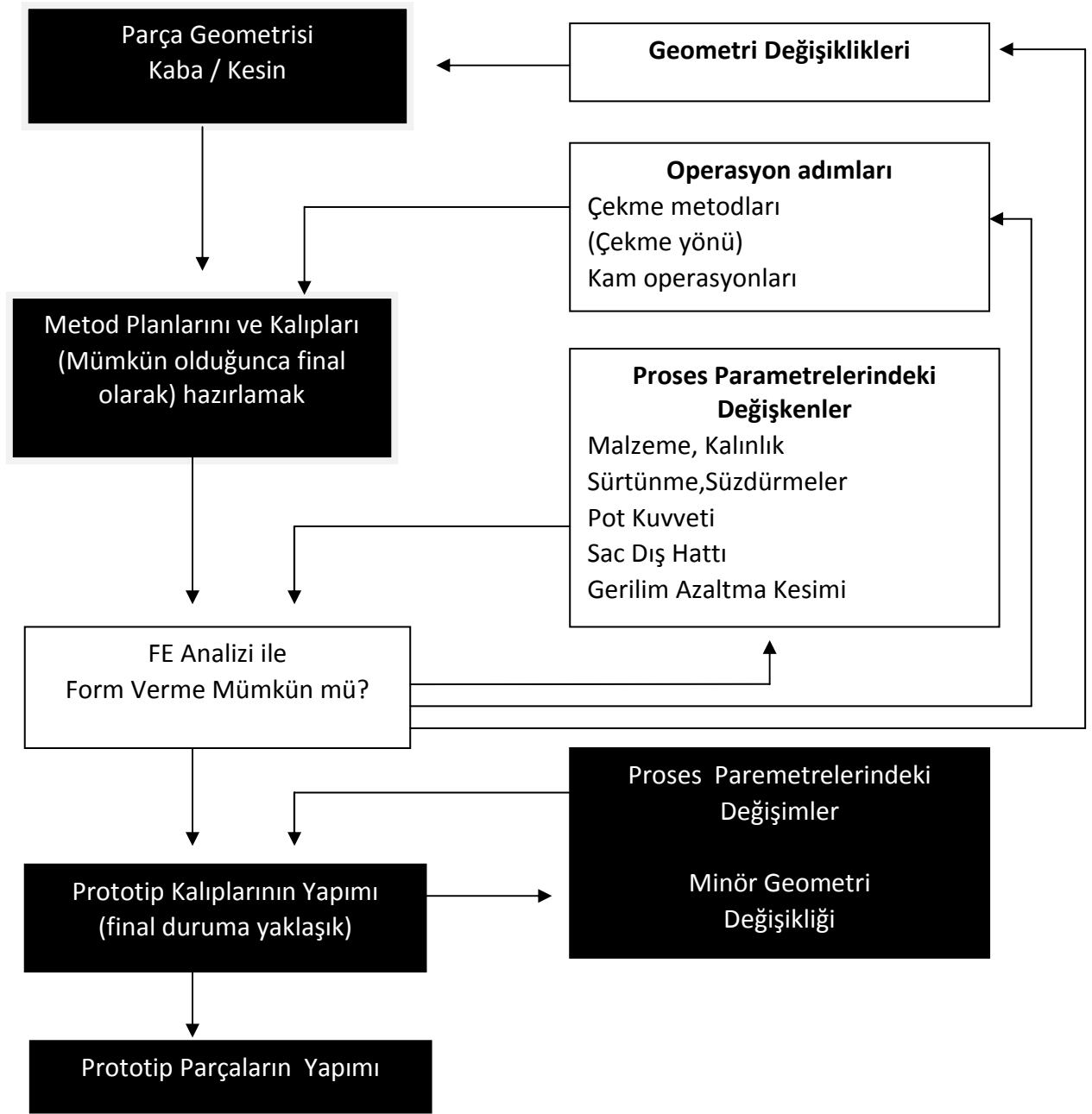
Simülasyonun kullanılmadığı durumlarda kalıp elemanları, montajından sonra ortaya çıkabilecek herhangi bir olumsuzluk neticesinde tekrardan işlenebilir. Ancak kalıp elemanları tamamlandıktan sonra parça fizibilitesi doğrulanabilir. Herhangi bir değişiklik gerektiğinde kalıp elemanlarının işlem sürecindeki evresine bağlı olarak mümkün olabilecek zahmetli bir çalışma yapılmalıdır[17].

Prototip elemanların geliştirilmesinde artımlı(incremental) simülasyon kullanılırsa zaman ve maliyet korunabilir.

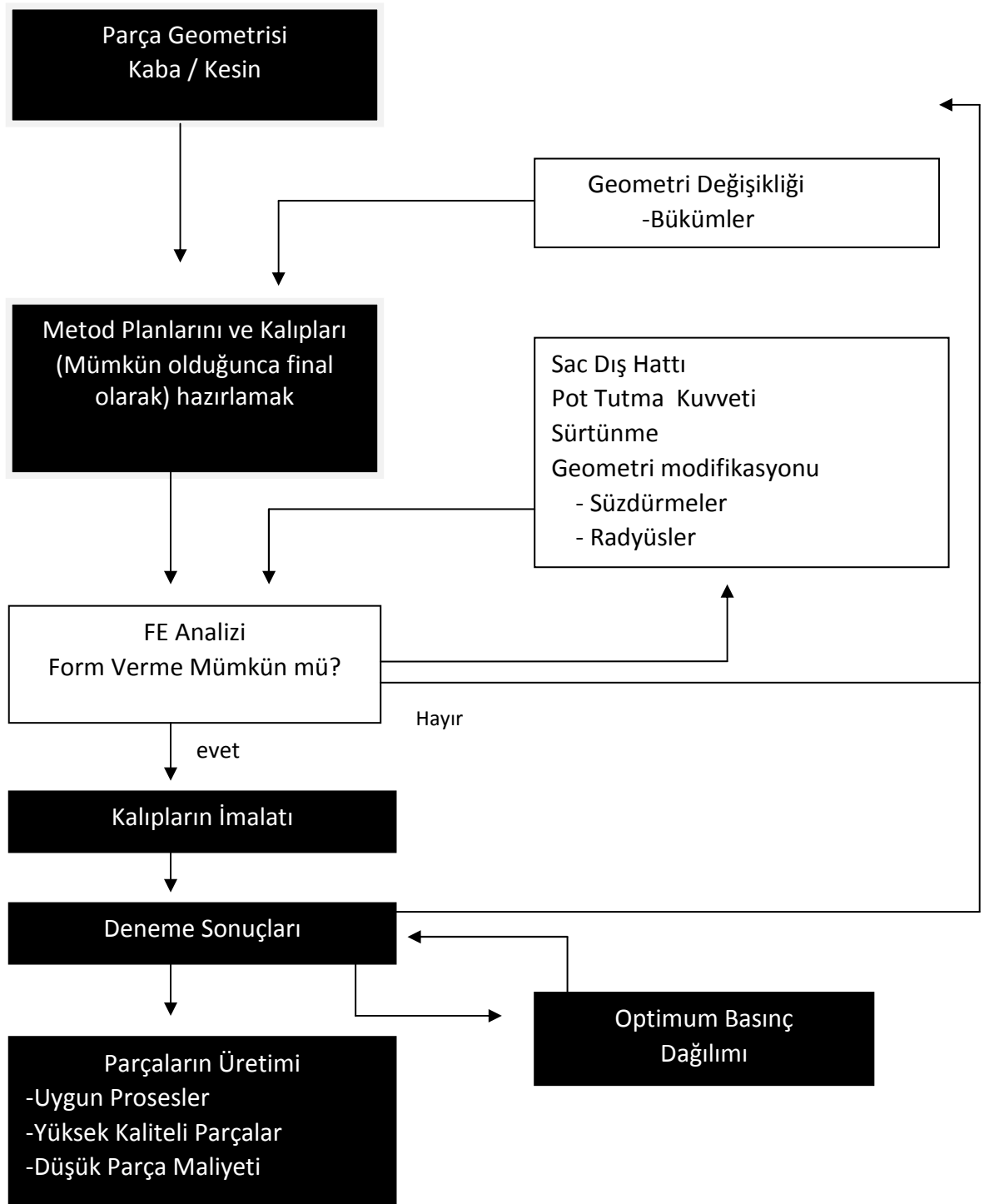
Hemen hemen CAD yüzey datalarındaki bütün öngörüler ve iyileştirmeler parça imalinden önce yapılabilir. Örneğin kalıp üreten bir firma deneme süresini 44 haftadan 20 haftaya %50 den büyük bir oranla düşürebilir.



Şekil 3.17. Incremental form similasyonu için gerekli girdi verileri [17]



Şekil 3.18. Prototip kalıpların yapılmasında Incremental form simülasyonu kullanılırsa zaman ve maliyet [17]



Şekil 3.19. Form simülasyonlarının kalıp imalatındaki konumu [17]

Bunlara ek olarak proses fizibilitelerinin limitlerinden dolayı malzeme kalitesi ve sac kalınlığı gibi proses parametrelerinin belirlenmesi ve proses güvenilirliğini belirleyen doğru bilgilerin elde edilmesine olanak sağlar [17].

BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Deney Malzemenin İncelenmesi

Bu çalışmada derin çekme yöntemi ile üretilecek olan dikdörtgen kabın çekilmesi için ERD 1314 (DIN EN 10327) kalite galvanize kaplanmış çelik sac kullanılmıştır. Bu çelikler Erdemir firmasının imalatı olup Arçelik A.Ş.(Pişirici Chazlar İşletmesi) tarafından derin çekme işlemlerinde kullanılmak üzere rulo şeklinde alınmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan ERD 1314 kalite sac'ın kimyasal analiz sonuçları Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Deney malzemesi ERD 1314 için kimyasal analiz sonuçları

Malzeme	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Al	%Nb
ERD 1314 (DIN EN 10327)	0,002	0,007	0,165	0,009	0,009	0,048	0,016

ERD 1314 sac hammadde olarak kullanılmasının sebebi düşük karbon oranına sahip olduğu için soğuk şekillendirmeye uygun, çinko kaplı ve galvanize edildiği için de korozyona dayanımının yüksek olmasıdır. Bu tip saclar genellikle korozyon dayanımı iyi olduğundan beyaz eşya sektöründe kullanılmaktadırlar. Çalışmada kullanılan sac 0.6 mm kalınlığındadır.

4.2. Çekme Deneyi Çalışmaları

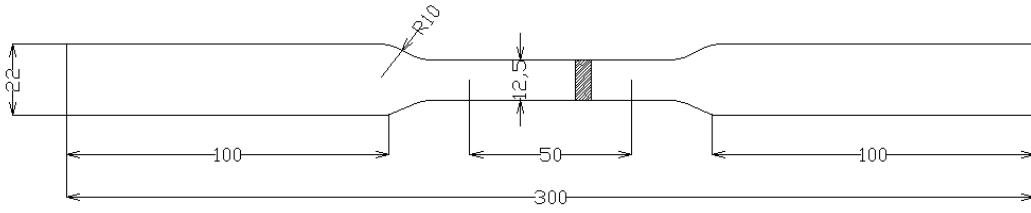
Çekme deneyi bir malzemenin çeşitli mekanik özelliklerinin saptanmasında yaygın olarak kullanılır. Bu çalışmada dynaform programı malzeme verisi olarak kullanılmak üzere malzemenin şekillendirilebilirlik parametrelerinin bulunması amacıyla çekme deneyi yapılmıştır.

Çekme deneyleri Sakarya Üniversitesi laboratuvarında bulunan ALŞA marka çekme cihazı ile (Şekil 4.1) gerçekleştirilmiştir. Kullanılan cihazın kapasitesi 40 tondur. Çekme hızı 5mm/dk olarak ve oda sıcaklığında deneyler yapılmıştır. Deney sırasında 3542-050M-100-St model 50 mm ölçüm kapasiteli eksansometre numunelere bağlanarak bilgisayar kontrollü ortamda hassas ölçümler alınmıştır. Bilgisayara eşzamanlı kaydedilen kuvvet-uzama verileriyle kuvvet-uzama eğrileri elde edilmiştir. Elde edilen kuvvet-uzama bilgileri ışığında numunelere ait nominal gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri, gerçek gerilme-gerçek birim şekil değiştirme eğrileri ve malzemelere özgü K ve n değerleri saptanmıştır. Çekme deneylerinde kullanılan numunelerin hadde yönüne göre 0° , 45° ve 90° 'de olmak üzere üç farklı yönlerde üçer adet toplamda 9 adet çekme numunesi hazırlanmıştır. Çekme numunesinin boyutları Şekil 4.2 de gösterilmiştir.

Çekme deneyinden elde edilen kuvvet-uzama, gerçek gerilme-gerçek birim şekil değiştirme ve logaritmik eğrileri grafikte işlenerek bölüm 5.1' de sunulmuştur.



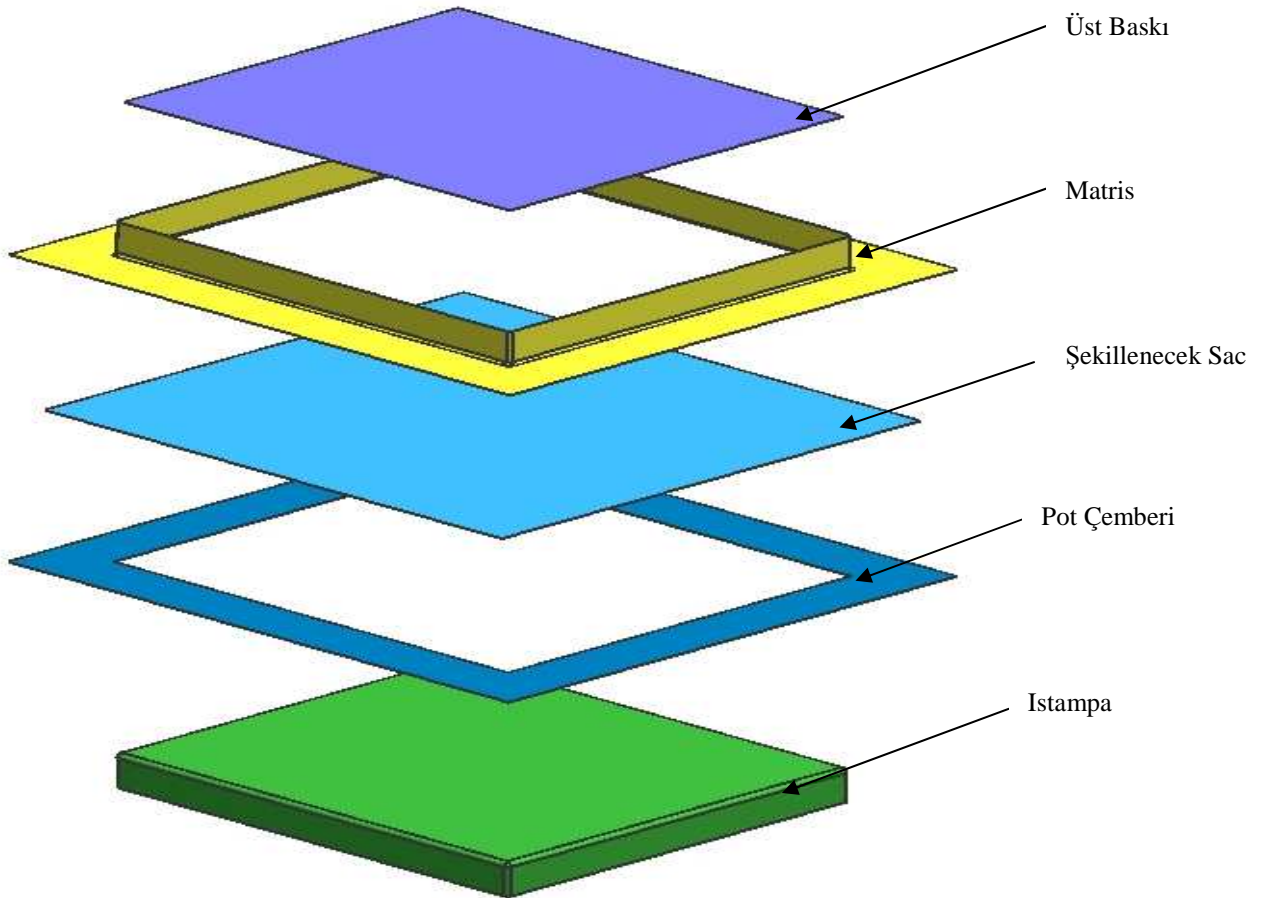
Şekil 4.1. ALŞA marka çekme cihazı



Şekil 4.2. Çekme deneyi numunesi

4.3. Kalıp Sistemi ve Çalışması

Uygulamada sistemin çalışması; ilk olarak üst baskı saca basarak ıstampa ile arasına sıkıştırırken matris aşağı yönlü hareket yaparak pot çemberiyle beraber sacı sıkıştırıp ıstampa formu üzerine sıvama işlemi işlemi ile sıvama işlemini yaparak şekillendirme işlemini tamamlar (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. Kalıp sistemi

Sonlu elemanlar analizinde sistemin sistemin simülasyonunda hareketler; saca göre diğer parçaların hareketleri aynı kalacak şekilde bazı kabullere dayanarak basitleştirilmiştir. Gerçek uygulamada olduğu gibi matris aşağı inerek sacı pot çemberi ile sıkıştırır. Ardından, sonlu elemanlar simülasyonunda tanımlanarak çözüm işlemine geçilir.

Birçok farklı yazılımda benzer yöntemler kullanılabileceği gibi farklı kalıp hareketleri de tanımlanarak uygulanabilir.

Matris, pot çemberi ve ıstampa mesh işleminde çok detaylı ağ yapısı oluşturulmuştur. Çünkü bu parçalar gerilme ve şekil değiştirme hesaplarına katılmayan rijit malzemelerden tanımlanmıştır. Bu parçalar çözüm süresini uzatmazlar. Şekillenecek parçanın ilk hali (Şekil 4.3) olarak kullanılacak ağ yapısı mümkün olan en az elemanla geometrinin son halini en iyi şekilde edebilecek şekilde yapılmış ve en tutar sonucu elde edebilmek için en çok hesap noktası içeren eleman tipi mesh işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu, parçanın eleman boyutları, sayısı ve eleman tipi çözüm süresinin belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Bizde çalışmamızda şekillenmemiş sacımızda 15 mm'lik elemanlarla mesh işlemi yapılmıştır. Diğer rijit parçalarda ise 25 mm'lik elemanlarla mesh yapılarak ağ örme işlemi tamamlanmış olur. Fakat çözüm yaptırılırken daha gerçekçi bir çözüme yaklaşmak için adaptif mesh kullanılarak çözüm yapılmıştır.

Dynaform sonlu elemanlar metodunda uygulamış olduğumuz deneylerde kullanılmış olan şekillenecek sac, pot çemberi, üst baskı, ıstampa ve matrise ait geometrik özellikler ve deneyde kullanmış olduğumuz değerler aşağıdaki tablo 4.2'de detaylı olarak gösterilmiştir.

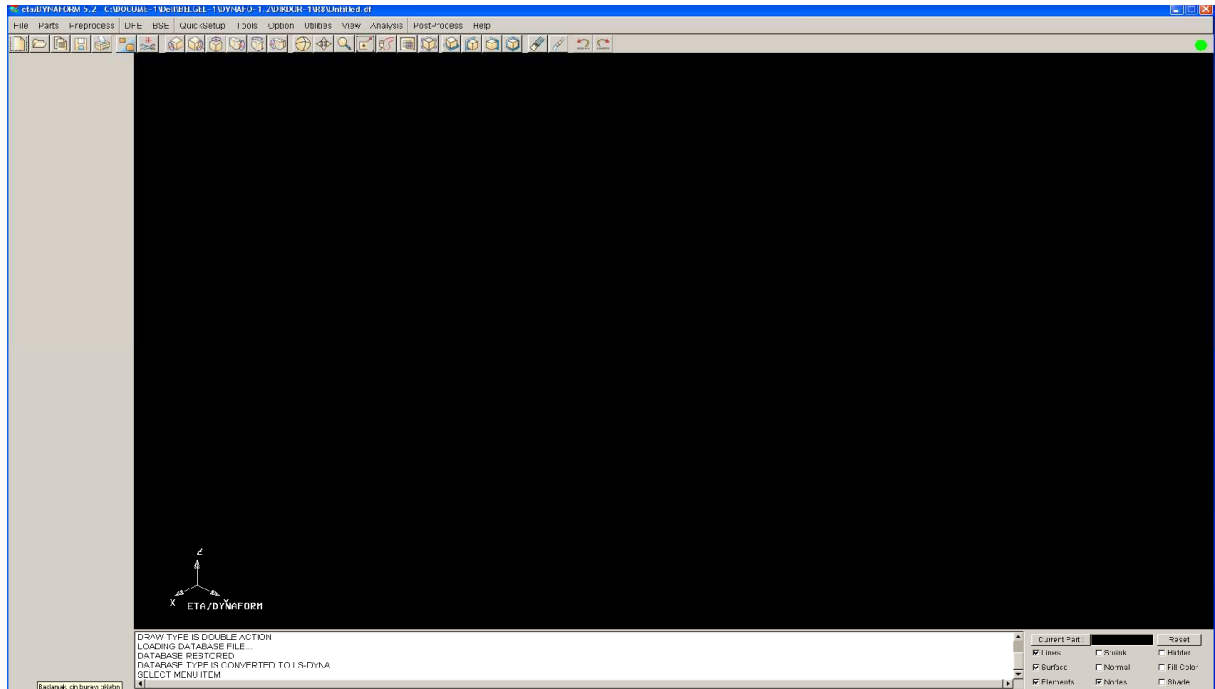
Tablo.4.2. Deney parametreleri

Derin çekme yüksekliği (mm)	43,4
Derin çekme hızı (mm/s)	10-30-50
Derin çekme boşluğu (mm)	0,76
Istampa radyüsü (mm)	4-6-8
Üst baskının ölçüleri (mm)	478 X 578
Üst baskı kuvveti (KN)	30
Pot çemberi iç ölçüleri (mm)	491,6 X 561,6
Pot çemberi kuvveti (KN)	150
Sac açınım ölçüleri (mm)	600 X 650
Sac kalınlığı (mm)	0,6
Matris radyüsü (mm)	4
Sürtünme katsayısı	0,025

4.4. Dynaform'da Sonlu Elemanlar Çalışmaları

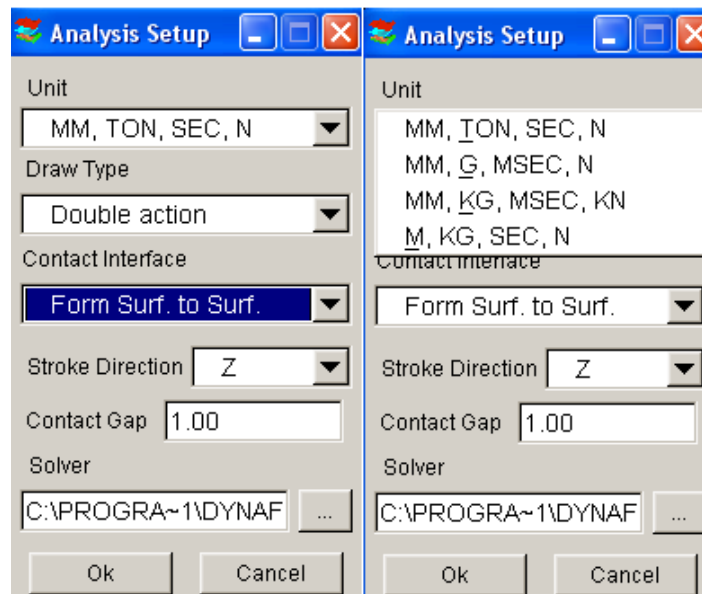
Sistemin ağ yapısının (mesh) oluşturulması Dynaform 5.2 (Eta) yazılımında gerçekleştirilmiştir. Dynaform programının genel görüntüsü şekil 4.3 de verilmiştir.

Dynaform sonlu analiz programında kullanmış olduğumuz işlem parametreleri Tablo 4.2'de verilmiştir.



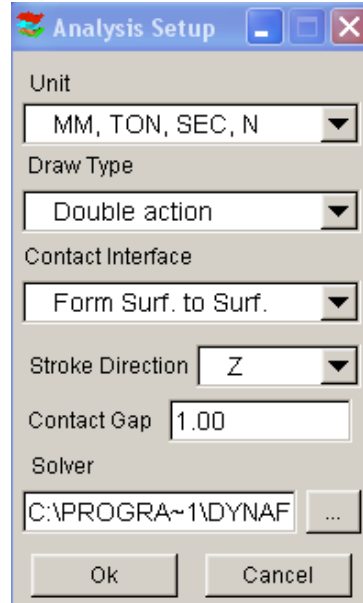
Şekil 4.4. Dynaform programının genel ekran görüntüsü

Öncelikli olarak programda analizin genel ayarlamalarını yapacağız. Bu menüden öncelikli olarak sistemin hangi birim sisteminde çalışacağına karar veriyoruz (Şekil 4.5). Bu seçime göre analiz değerlerini gireceğiz.

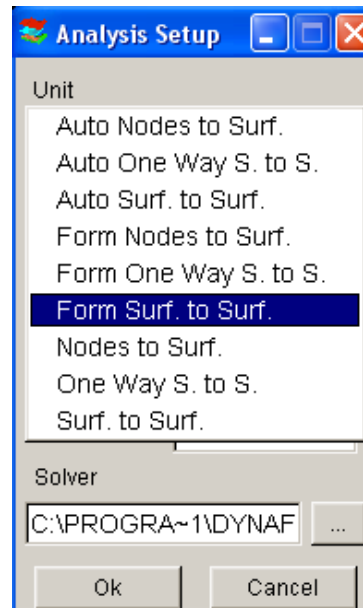


Şekil 4.5. Birim sistem menüsü

Analiz esnasında parçalarımızın hareket etme şeklini buradan ayarlıyoruz (Şekil 4.6). Gravity sac parçanın kendi ağırlığı ile yani yerçekimi ile şekillenmesi esnasındaki deformasyonunun hesaplanmasında kullanılır. Bu analizde double action kullanılmıştır. Springback ise sac parçanın geri esnemesinin hesaplanmasında kullanılır.

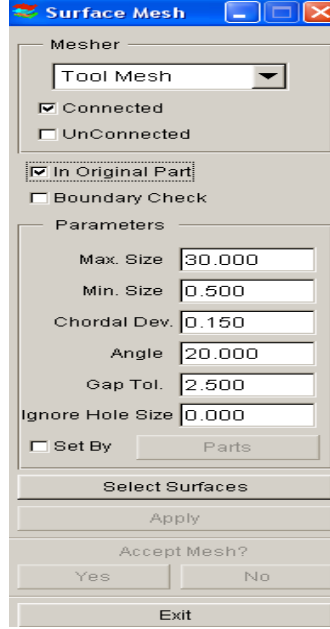


Şekil 4.6. Sistemin hareket doğrultusu



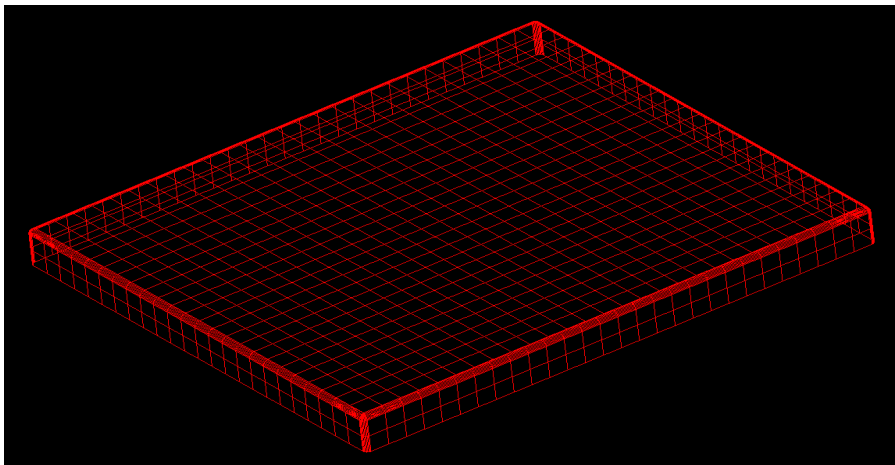
Şekil 4.7. Temas tanımlama menüsü

Import (içeriye alınan) edilen parçaların sonlu elemanlara bölünme işlemi yapılır. Bunun için, Surface Mesh menüsünden (Şekil 4.9);

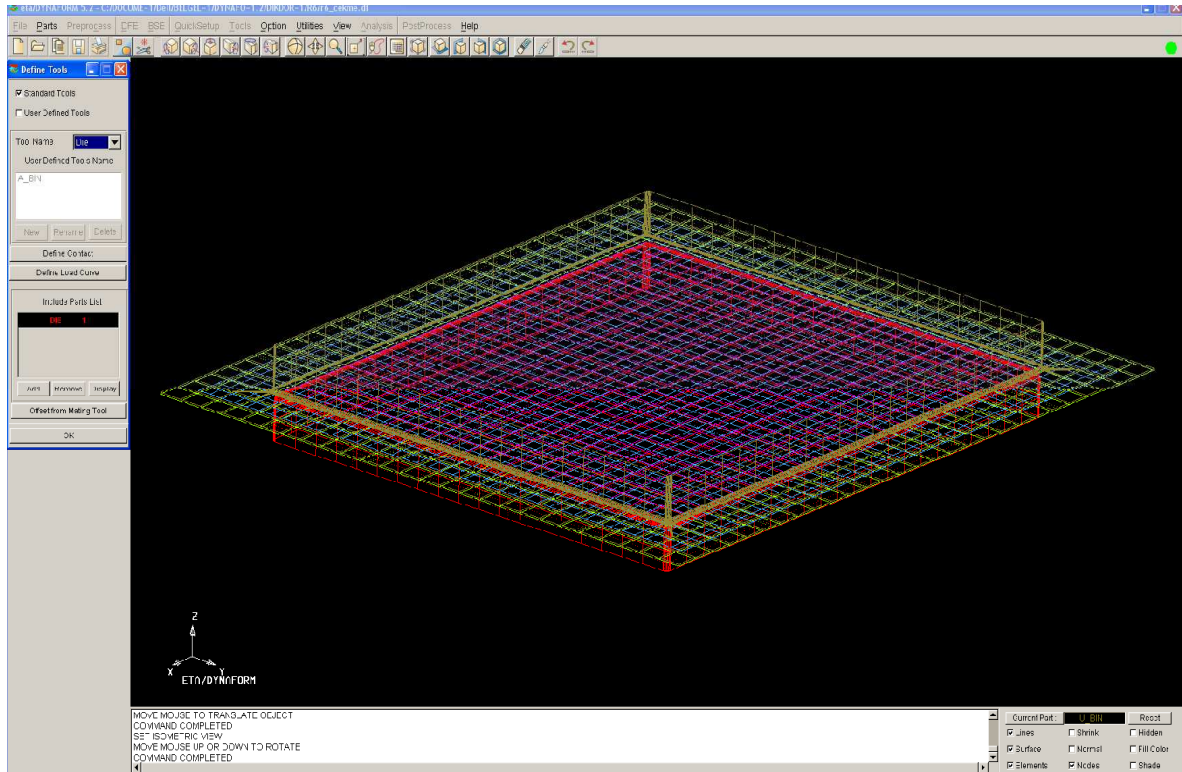


Şekil 4.9. Parçanın mesh edilmesi

Surface mesh komutu ile ekranda bulunan parçamızın sonlu elemanlara bölünmesini sağlayabiliriz. Elemanların maximum ve minimum elemanlar aralarındaki açı değerlerini belirleyebiliriz. Parça üstündeki istenmeyen delikler var ise kapatılabilir ve sonlu elemanlar işleminde açık sınırlar var ise onlarda tespit edilebilir. Bu işlem bütün parçalarımız için yapılacaktır.

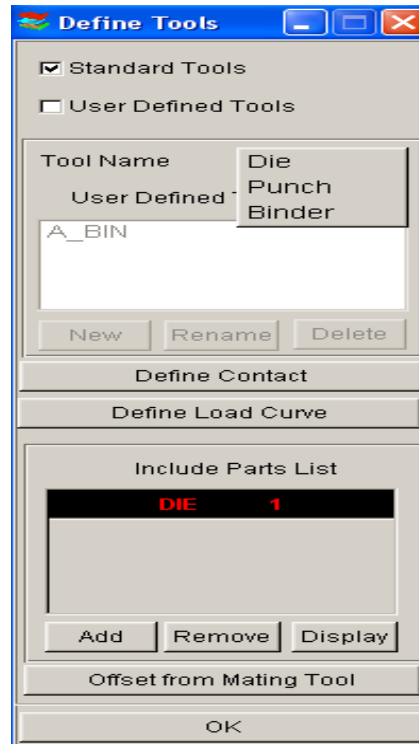


Şekil 4.10. Parçanın ağ yapısı



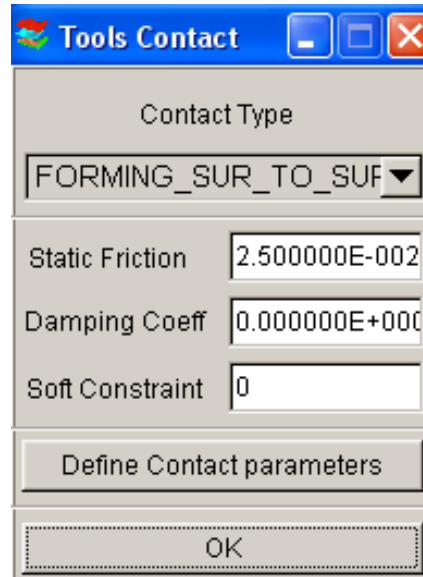
Şekil 4.11. Kalıp sisteminin ağ yapısı

Daha sonra bütün parçalarımız kalıp parçaları olarak tanımlanır (şekil 4.11).



Şekil 4.12. Matris kalıbın tanıtılması

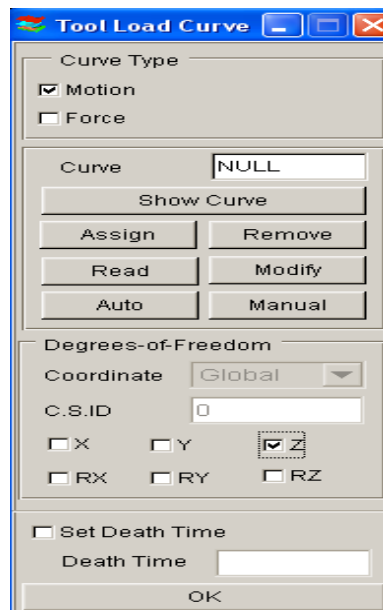
Kırmızı parça “die” yani matris olarak kalıp sistemimize tanımlanır.



Şekil 4.13. Matris kalıp temas tipi

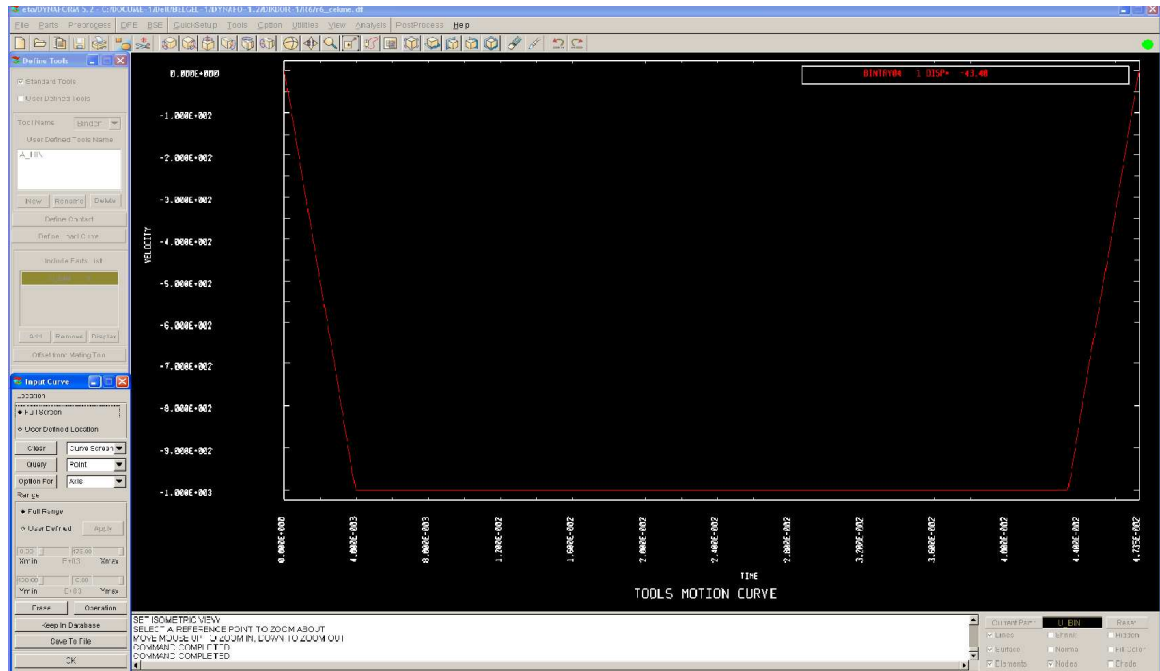
Die için kontakt tipi seçilir, statik ve dinamik sürtünme katsayıları belirlenir (Şekil 4.13).

Aynı contact işlem parametreleri punch yani erkek ıstampa içinde ve matris için hareket tanımlamaları bu kısımda yapılır.



Şekil 4.14. Hareketli (matris) kalıp temas parametreleri

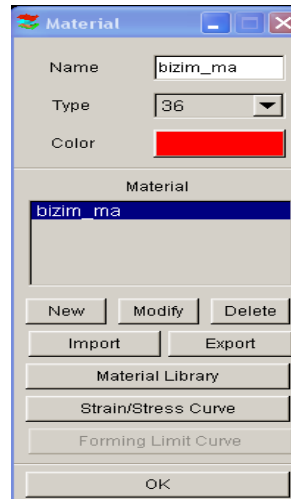
Şekil 4.14'te görüldüğü gibi matrise Z yönünde hareket verilmiştir.



Şekil 4.15. Matrisin hareket eğrisi

Dişi çeliğin hareket eğrisi yukarıdaki şekil 4.15'teki gibi tanımlanarak dynaform'da çizdirilmiştir.

Analizde sac parça dışındaki bütün parçalar rigid body olarak tanımlanacak sadece sac parçaya malzeme verilecek sadece sac parçadaki deformasyon bizi ilgilendirdiğinden dolayı bu yüzden sac parçanın malzemesini tanımlayacağız.



Şekil 4.16. Analizi yapılacak parçanın malzeme tanımlama menüsü

Blank (sac) parçasının çekme deneyinden ve Ereğli'den elde edilmiş verilerini malzeme özellikleri kısmına girerek sacımızın tanımlamasını tamamlamış oluruz. Aynı değerleri gerilme-birim şekil değiştirme eğrisini dynaform'a okutarak ta malzeme özelliklerini girebiliriz.

Property	Value
MATERIAL TITLE	bizim_ma
MASS DENSITY	7.850000E-009
YOUNGS MODULUS	2.035575E+005
POISSONS RATIO	3.150000E-001
HARDENING RULE(EXPON.)	2.000000E+000
MATERIAL PARAM P1 (K)	5.157607E+002
MATERIAL PARAM P2 (N)	2.043300E-001
EXPONENT FACE M	6.000000E+000
LANKFORD PARAM R00	2.200000E+000
LANKFORD PARAM R45	2.000000E+000
LANKFORD PARAM R90	2.410000E+000
LOAD CURVE NUMBER	0
INITIAL YIELD STRESS	0.000000E+000
INITIAL Y.STRESS(SPI)	0.000000E+000
MATERIAL AXES OPTION	2.000000E+000
VECTORS COMPONENT(A1/XP)	1.000000E+000
VECTORS COMPONENT(A2/YP)	0.000000E+000
VECTORS COMPONENT(A3/ZP)	0.000000E+000
VECTORS COMPONENT(D1/V1)	0.000000E+000
VECTORS COMPONENT(D2/V2)	1.000000E+000
VECTORS COMPONENT(D3/V3)	0.000000E+000

Buttons: OK, Regular, Default, Reset, Cancel

Şekil 4.17. Blank (sac) malzemesinin özelliklerinin girilmesi

Name: blankpro

Property: FULL INTEGRATED

Color: [Red]

Property List:

- blankpro
- PQS2**

Buttons: New, Modify, Delete, OK

Şekil 4.18. Sacın özelliğinin girilmesi

SECTION TITLE	blankpro
NO. OF INT. POINTS	5
UNIFORM THICKNESS	6.000000E-001
SHEAR FACTOR	8.330000E-001
PRINT OPTION (1-3)	1
QUADRATURE RULE (0-1)	0
<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Regular"/> <input type="button" value="Default"/> <input type="button" value="Reset"/> <input type="button" value="Cancel"/>	

Şekil 4.19. Sac kalınlığı ve kayma gerilmesi tanımlama menüsü

Bizim malzemizde sac parça kalınlığı 0.6 mm olarak buradaki pencereden girebiliriz. Ayrıca kayma vektörü ve katman sayısını yukarıdaki şekil 4.19 daki pencereden ulaşabiliriz.

Yukarıdaki bütün tanımlamalar kalıp sisteminin diğer elemanlarına da yapıp, hareket tanımlamaları da verildikten sonra LS-DYNA ile çözdürülebilmek için analiz dosyası oluşturulması sağlanır.

Analysis	
Analysis Type	
LS-Dyna Input File	
Control Parameters	
FLD Parameters	
<input type="checkbox"/>	Gravity Load
<input type="checkbox"/>	Dynain Output
<input type="checkbox"/>	Seamless
Implicit Parameters	
<input checked="" type="checkbox"/>	Adaptive Mesh
Adaptive Parameters	
<input checked="" type="checkbox"/> Defined Tools Only	
File	r6_cekme.dyn
<input type="checkbox"/>	Specify Memory
Memory(Mb)	64
Title	r6_cekme
Termination Time	0.047345
<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Cancel"/>	

Şekil 4.20. Analiz menüsü

Daha sonra analiz çalıştırılması için analysis kısmına gelinir. Bu kısımda analizdeki bazı parametreler girilir adaptive mesh gibi, ayrıca analizin kullanacağı memory belirlenir. Termination time değeri yani analizin bitme zamanı girilir. Adaptive mesh özelliği ile radyüslü bölgelerde elemanlar girdiğimiz parametre kriterlerine bağlı olarak bölünecek ve daha hassas bir sonuç elde edilecektir.

Çözümlerin görüntülenmesi ve değerlendirilmesi LS-POST programında yapılmıştır.

4.5. İncelenen Parametreler

Bu çalışmanın amacı, dikdörtgen kabın derin çekme işlemindeki işlem parametrelerinden çekme hızı ve kalıp radyüsünün hasar ve kalınlık değişimi etkilerini araştırmaktır. Çalışmanın hedefine ulaşması için tablo 4.3'deki işlem planı uygulanmıştır.

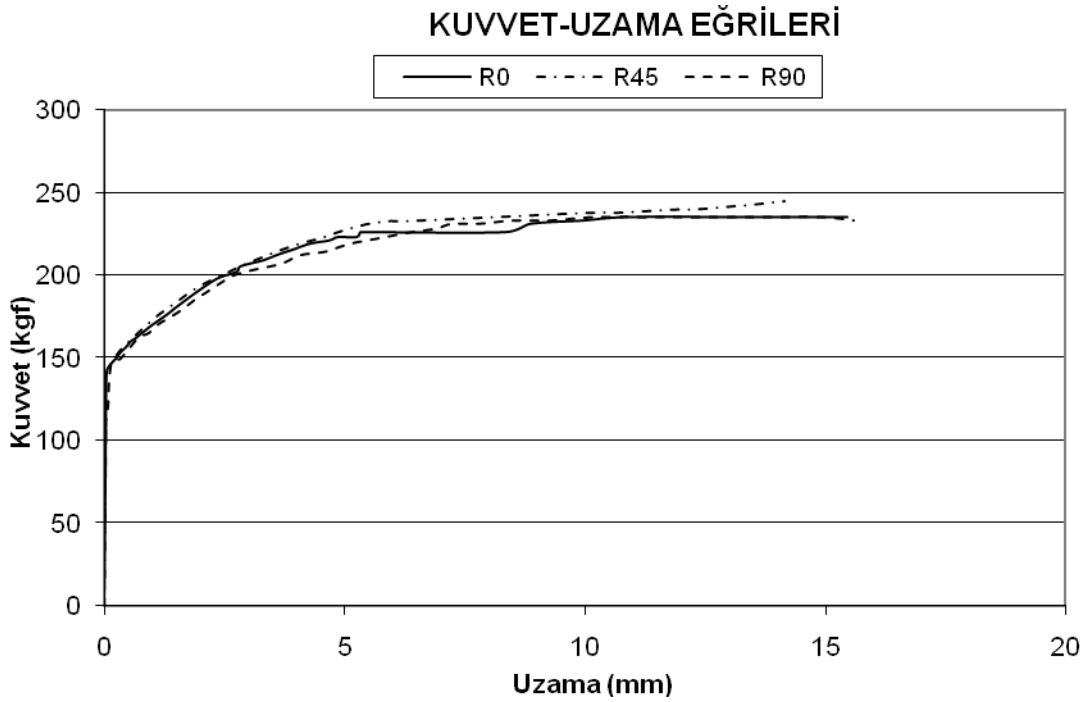
Tablo 4.3. İncelenen değişkenler

RADYUS (mm)	ÇEKME HIZI (mm/s)	YÜKSEKLİK (mm)
4	50	18,6
		31
		37,2
		43,4
	30	18,6
		31
		37,2
		43,4
	10	18,6
		31
		37,2
		43,4
6	50	18,6
		31
		37,2
		43,4
	30	18,6
		31
		37,2
		43,4
	10	18,6
		31
		37,2
		43,4
8	50	18,6
		31
		37,2
		43,4
	30	18,6
		31
		37,2
		43,4
	10	18,6
		37,2
		43,4

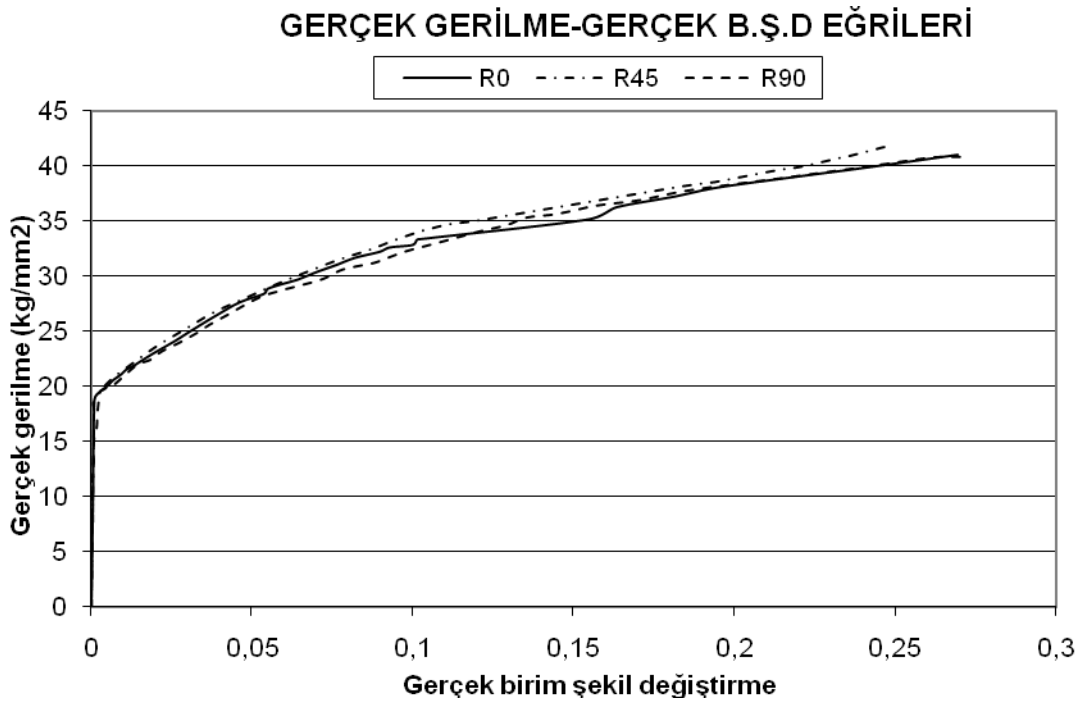
BÖLÜM 5. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

5.1. Çekme Deneyi Sonuçları

Simülasyon çalışmalarında malzemeyi tanımlayan verilerin elde edilmesi için 0,6 mm kalınlığa sahip ERD 1314 kalite sac malzemenin hadde yönü ile 0° , 45° ve 90° durumlarından elde edilen numunelere uygulanan çekme deneylerinden elde edilen verilerle hazırlanan eğriler Şekil 5.1 ve 5.2’de, malzeme özellikleri ise Tablo 5.1’de sunulmuştur.



Şekil 5.1. Kuvvet - uzama eğrisi



Şekil 5.2. Gerçek gerilme - Gerçek birim şekil değişimi eğrisi

Tablo 5.1. Çekme deneyinden elde edilen ve deneyde kullanılan malzeme özellikleri

MALZEME ÖZELLİKLERİ	Deney Numuneleri		
	R90	R45	R0
Pekleşme Üsteli (n)	0,21	0,203	0,2
Malzeme Mukavemet Katsayısı (K) (kg/mm ²)	52,5412	53,172	52,012
Akma Dayanımı (kg/mm ²)	17,85	18,2	18
Çekme Dayanımı (kg/mm ²)	31,07	32,8	30,8
Elastisite Modülü (E) (kg/mm ²)	20750	20750	20750
Poison Oranı	0,315	0,315	0,315
Yoğunluk (kg/mm ²)	0,00785	0,00785	0,00785
Anizotropi (r)	2,41	2,00	2,20

Şekil 5.1 ve 5.2 ile Tablo 5.1 incelendiğinde, kullanılan ERD 1314 kalite sac malzemenin haddeleme yönüne göre malzeme özellikleri değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Bu durum hadde yönünün derin çekme işlemini çok fazla etkilemeyeceğinin gösterir. Akma dayanımı değerlerinin 18 kg/mm^2 civarı değerlerde ve pekleşme üstelinin 0,20–0,21 arası değerlerde olması malzemenin derin çekme işlemine uygun olduğunu göstermektedir.

5.2. Sonlu Elemanlar Metodu Sonuçları

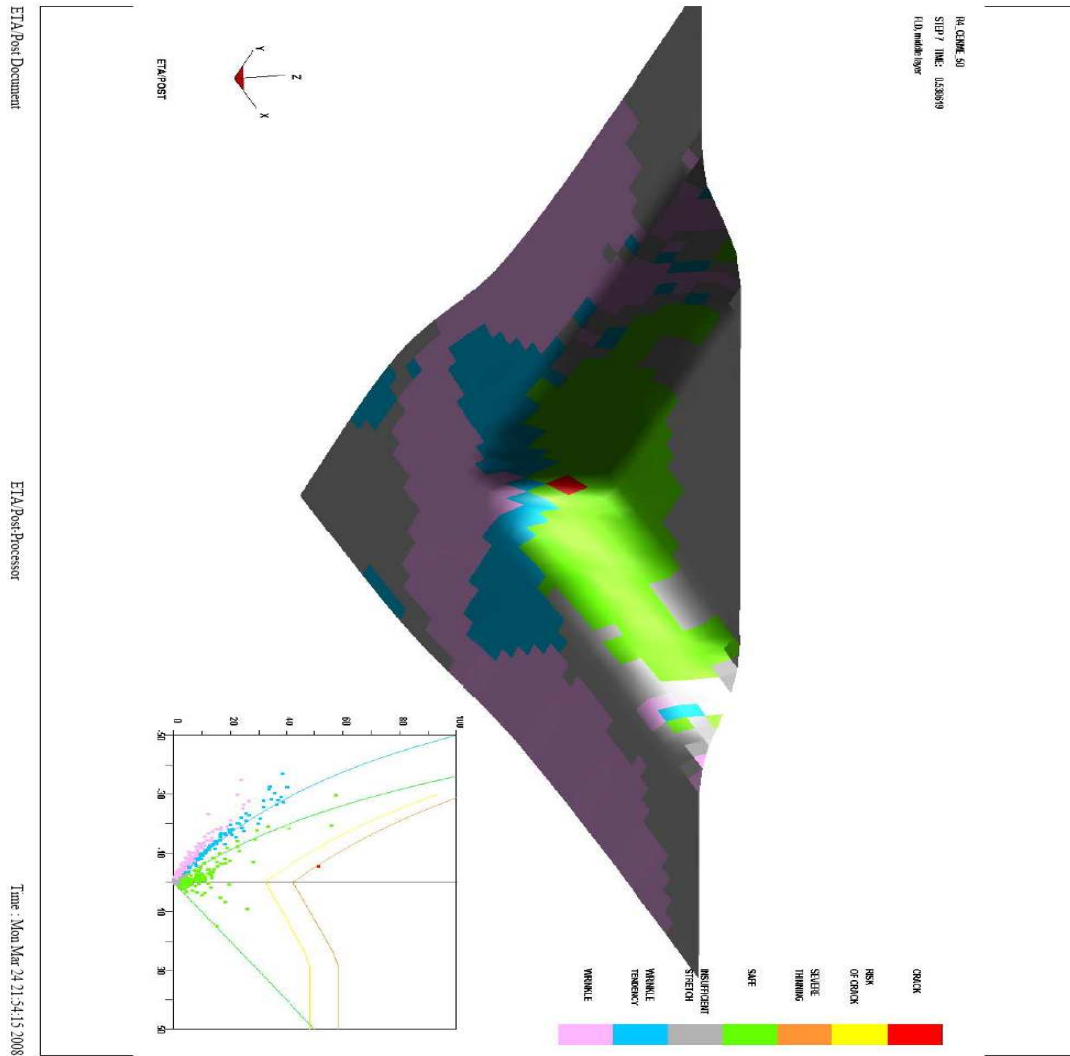
Derin çekme işleminde, iş parçasının kalıcı şekil değişimine uğraması nedeniyle üründe kalınlık değişimi meydana gelmektedir. Gerçekte sacın kalınlığının her tarafta aynı olması istenir. Bu yüzden derin çekme işleminde kalınlık değişiminin oluşması engellenemez bir dezavantajdır.

Derin çekme analizinden elde edilen sonuçlara göre sac parça üzerindeki kalınlık dağılımları, kalınlığın azalması ve artması olmak üzere 2 çeşittir [22]. Parçanın özellikle köşe kısımlarda kalınlıklarında 0.15mm incelme, diğer kısımlarda ise 0.05mm ye varan artma meydana geldiği örnek olarak şekil 5.4'de görülmüştür. Parçanın köşe kısımlarında incelme, derin çekme işlemi esnasında zorlanmanın köşelerde daha tesirli olmasından kaynaklanmaktadır.

Sacın simülasyonundan sonra elemanların şekillendirme sınır diyagramındaki görünüşleri ve hasara uğrayıp uğramadıkları sonuçlarda verilmiştir. Şekillendirme sınır diyagramındaki farklı renkli eğriler küçük uzamalara göre yırtılmadan geçebilecek maksimum uzamanın değişimini göstermektedir ve ayrıca sacın tanıtılmasında verilmesi gereken bir bilgidir. Örnek olarak Şekil 5.3'de vermiş olduğumuz hasarla ilgili bilgiler yer almaktadır. Bu grafiklerde kırmızı noktalar yırtılma bölgesine, sarı noktalar yırtılma riskinin olduğunu, yeşil renk yeterli gerilmenin bulunduğu kaliteli çekme bölgesini, mavi kırışmaya eğilimi ve mor kırışma bölgesini belirtmektedir. Mor bölgelerin negatif küçük uzama mutlak değerinin büyük uzamadan fazla olduğu görülmektedir.

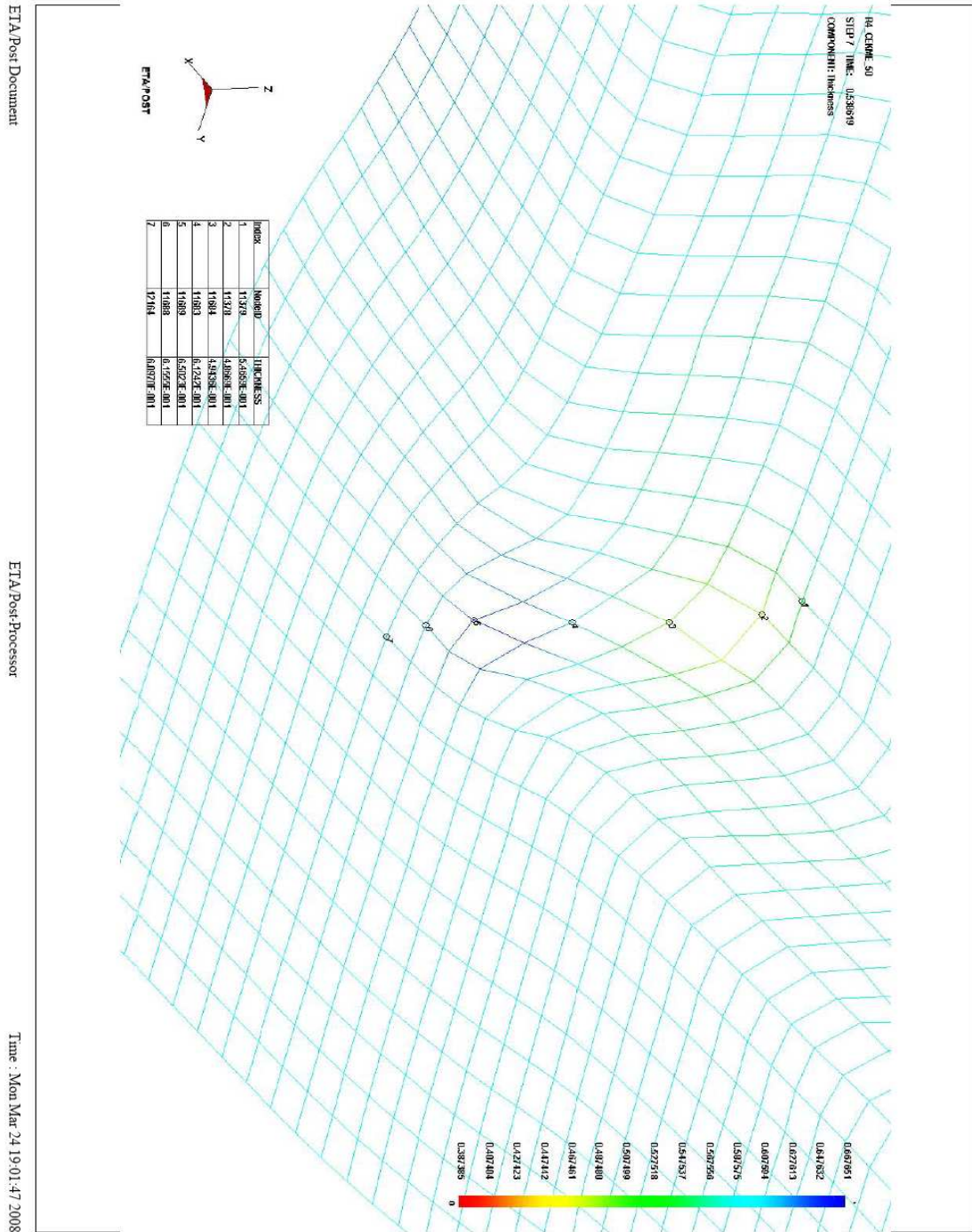
5.2.1. Hız = 50 mm/s ve radyüs = 4 mm'deki kalınlık değişimi ve hasar sonuçları

Hız=50 mm/s ve radyüs=4 mm için önce hasar durumu ve kalınlık değişimleri yüksekliğe bağlı olarak Şekil 5.3 ve 5.4'deki sunulmuştur. Şekil 5.3 deki ıstampa köşe bölgesindeki noktalar hasar ve kalınlık değişimi açısından kritik olarak görölmüş ve incelemeler bu bölęe dikkate alınarak yapılmıştır (kırmızı nokta). Hız=50 mm/s ve radyüs=4 mm Őartlarında hasar başlanığınının $h=18,7\text{mm}$ 'de başladığı simölasyon sonucu görölmüştür. Bu nedenle 18,6mm yükseklikliğindeki kalınlık değişimleri Şekil 5.4'de verilmiştir.



Şekil 5.3. Hız = 50 mm/s ve radyüs = 4 mm'deki hasar başlangıcı sonuçları ($h = 18,7\text{ mm}$)

Şekil 5.4 sac kalınlığında en fazla incelmenin 2 ve 3 nolu noktalarda olduğunu göstermektedir. 2 ve 3 nolu noktalar iki yönlü çekme ve bükme zorlanmasının etkisindeki ıstampa köşe radyüs bölgesidir. En büyük kalınlık azalması değeri 0,113mm'dir.

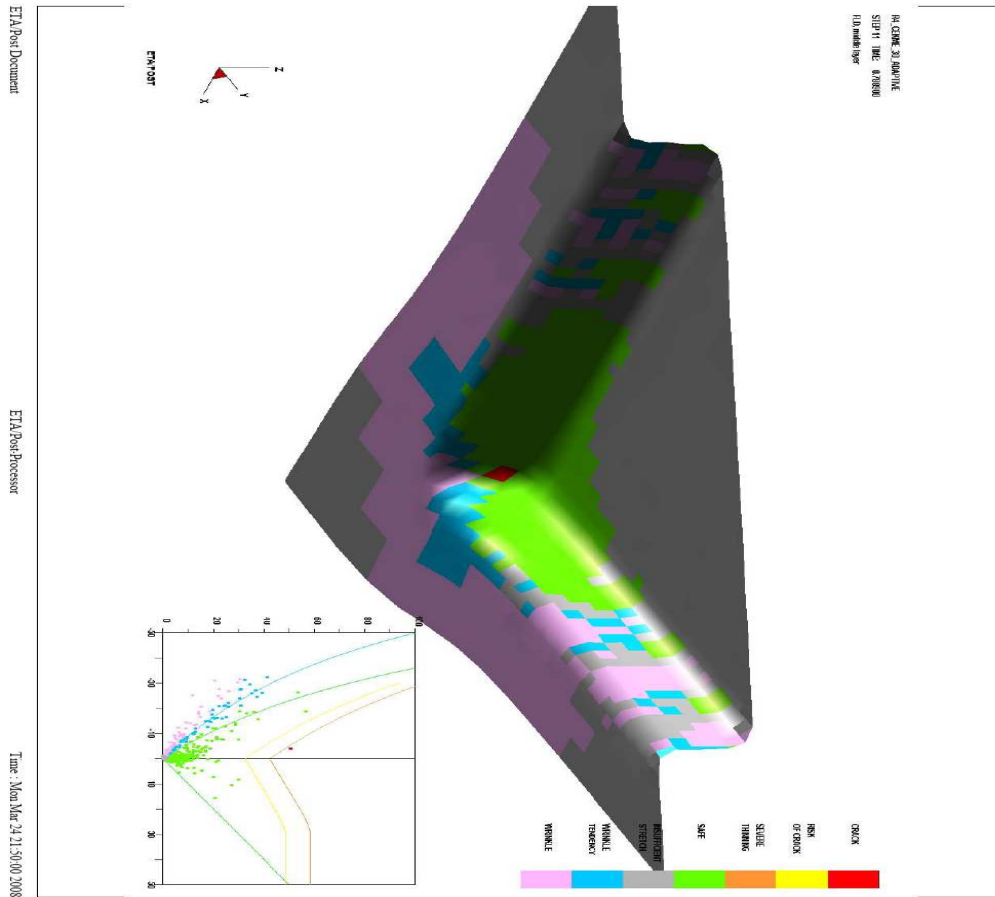


Şekil 5.4. 18,6 mm'deki kalınlık değişimi sonuçları

Şekil 5.3 ve Şekil 5.4 incelenen malzemeden bu ürünün 50 mm/s çekme hızı - 4 mm ıstampa radyüsü ile hasara uğramadan en fazla 18 mm derin çekilebileceği ve 18,6 mm derin çekme yüksekliğindeki ürünün köşe bölgesinde 0,113 mm'lik en büyük incelmeyin oluşacağı sonucunu vermektedir.

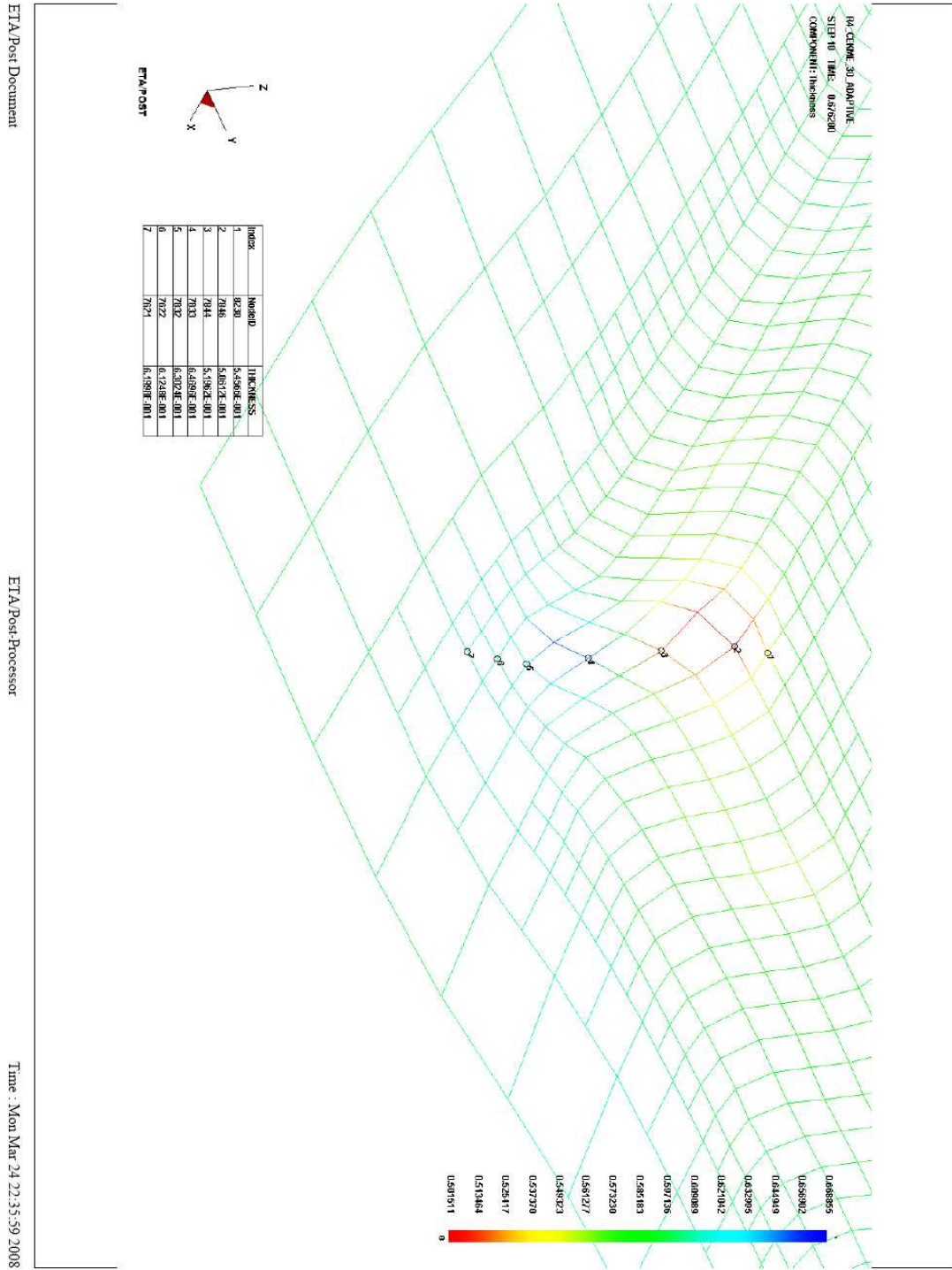
5.2.2. Hız = 30 mm/s ve radyüs = 4 mm'deki kalınlık değişimi ve hasar sonuçları

Hız=30 mm/s ve radyüs=4mm için önce hasar durumu ve sonrada kalınlık değişimleri yüksekliğe bağlı olarak Şekil 5.5 ve 5.6'deki gibidir. Şekil 5.5 de ıstampa köşe noktaları hasar ve kalınlık değişimi açısından kritik olarak görülmektedir. Bu şartlar altında hasar başlanıgıcının h=21,6mm'de başladığı simülasyon sonrasında görülmüştür (kırmızı nokta). 18,6mm yüksekliğindeki kalınlık değişimleri Şekil 5.6'de verilmiştir.



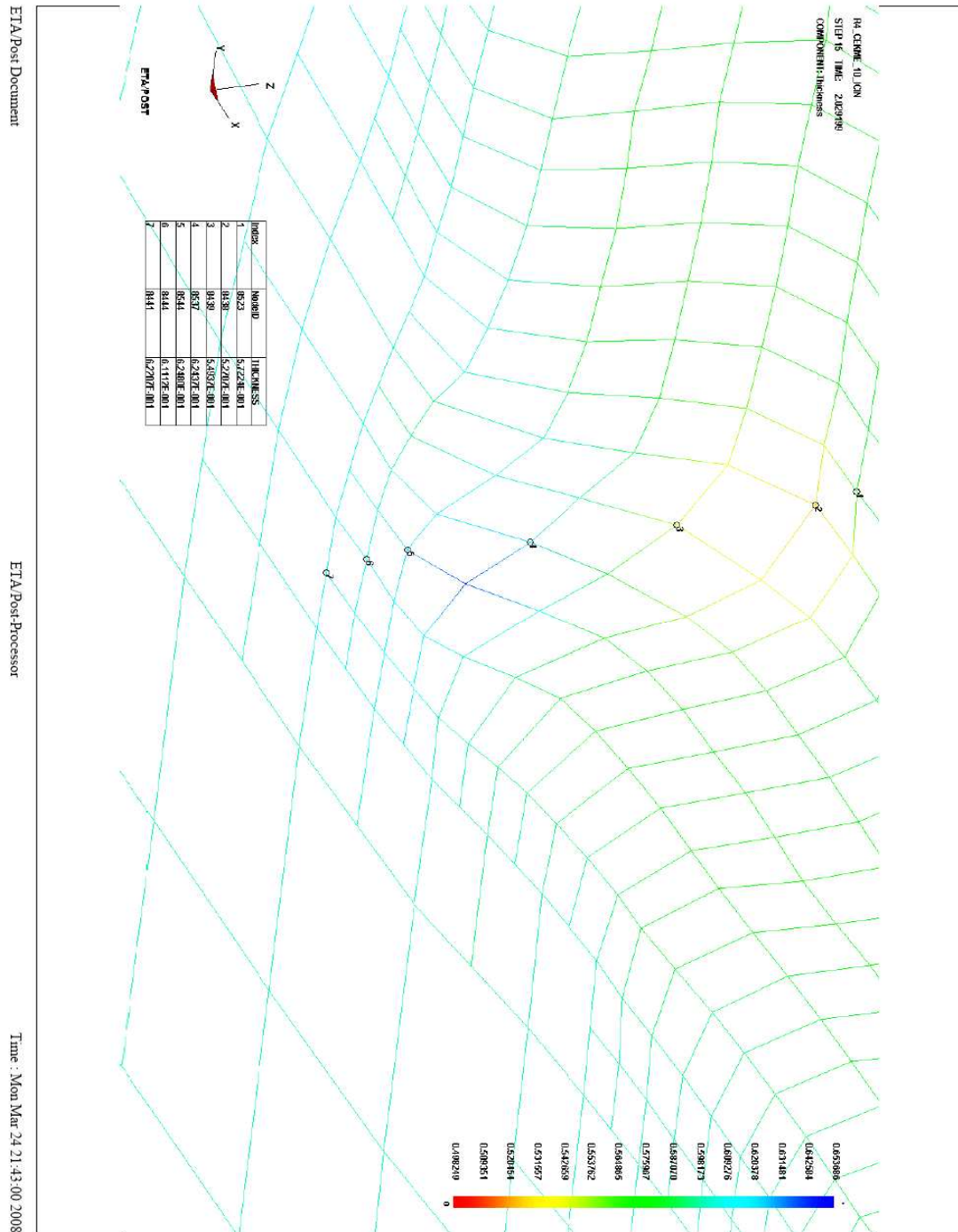
Şekil 5.5. Hız = 30 mm/s ve radyüsü = 4 mm'deki hasar başlangıcı sonuçları (h = 21,6 mm)

Şekil 5.6 en fazla incelmenin 2 nolu noktada olduğunu göstermektedir. 2 nolu nokta iki yönlü çekme ve bükme zorlanmasının etkisindeki köşe radyüs üst başlangıç bölgesidir. En büyük kalınlık azalması değeri 0,094mm'dir.



Şekil 5.6. 18,6 mm'deki kalınlık değişimi sonuçları

Şekil 5.8 en fazla incelmenin 2 nolu noktada olduğunu göstermektedir. 2 nolu nokta iki yönlü çekme ve bükme zorlanmasının etkisindeki köşe radyüs bölgesidir. En büyük kalınlık azalması değeri 0,073mm'dir.



Şekil 5.8. 18,6 mm'deki kalınlık değişimi sonuçları

Şekil 5.7 ve Şekil 5.8 incelenen malzeme ile bu ürünün 10 mm/s çekme hızı ve 4 mm ıstampa radyüsü ile hasara uğramadan en fazla 24 mm derin çekilebileceği, 18,6 mm derin çekme yüksekliğindeki ürünün ıstampa köşe bölgesinde 0,073 mm'lik en büyük incelmenin oluşacağı sonucunu vermektedir.

4 mm ıstampa radyüsü koşulları için 10–30–50 mm/s derin çekme hızları simülasyon sonuçlarından elde edilen en büyük kalınlık azalması değerleri ve hasarsız en büyük derin çekme yükseklik değerleri Tablo 5.2 de sunulmuştur.

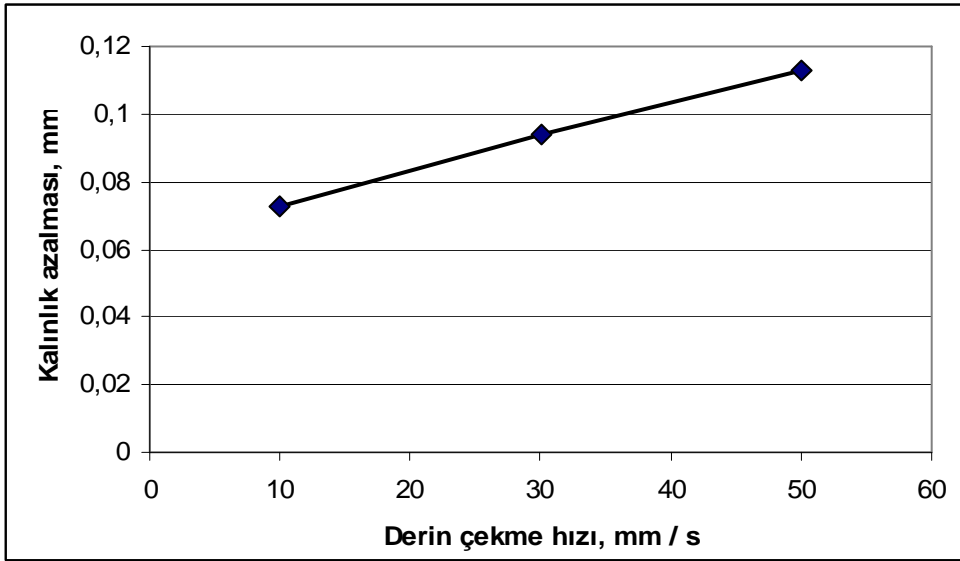
Tablo 5.2 4 mm ıstampa radyüsü - 10–30–50 mm/s derin çekme hızları en büyük kalınlık azalması değerleri ve hasarsız en büyük derin çekme yükseklik değerleri sonuçları

Derin çekme hızı (mm/s)	En büyük kalınlık azalması (mm)	Hasarsız en büyük derin çekme yüksekliği (mm)
10	0,073	24
30	0,094	21
50	0,113	18

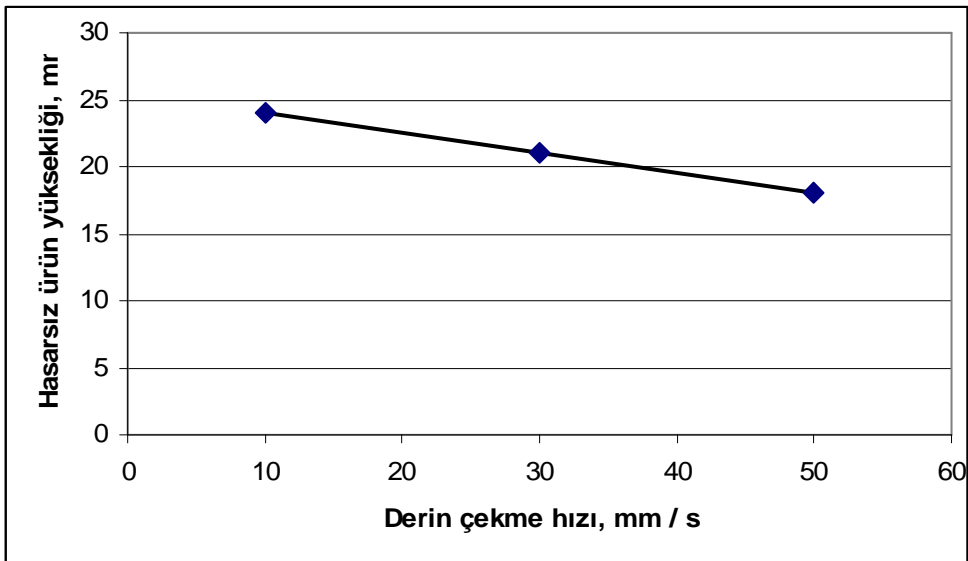
Tablo 5.2 deki değerler ile araştırmada kullanılan ERD 1314 (DIN EN 10327) kalite galvanize kaplanmış çelik sac için derin çekme hızının en büyük kalınlık azalmasına etkisi Şekil 5.9 da, derin çekme hızının hasarsız en büyük derin çekme yüksekliğine etkisi Şekil 5.10 da grafik olarak sunulmuştur.

Şekil 5.9 derin çekme hızı artışı ile kalınlıktaki incelme miktarlarının arttığını göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, derin çekme hızı artışı ile ıstampa radyüs bölgesinde ürünün sac kalınlığı doğrultusunda daha fazla şekil değişimine zorlandığını göstermektedir.

Şekil 5.10 derin çekme hızındaki değer artışının hasarsız elde edilebilecek ürün yüksekliği değerlerini azalttığını göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, derin çekme hızı artışı ile ıstampa radyüs bölgesinde ürünün sac kalınlığı doğrultusunda daha fazla şekil değişimine zorlandığı sonuçlarına uygundur. Şekil değişimi kabiliyeti şekil değişimi hızı artışı ile azalır [26]. Bu nedenle, elde edilen sonuçlar literatüre uygun sonuçlardır.



Şekil 5.9 Derin çekme hızının en büyük kalınlık azalmasına etkisi



Şekil 5.10 Derin çekme hızının hasarsız en büyük derin çekme yüksekliğine etkisi

4 mm kalıp ıstampa radyüsü koşullarında elde edilen sonuçlardan ERD 1314 kalite galvanize kaplanmış çelik sac için en büyük kalınlık azalması miktarının (Δh_{\max}) derin çekme hızı (v) ile 10 – 50 mm / s derin çekme hızı aralığında değişimi:

$$\Delta h_{\max} = 0,001 \cdot v + 0,0633$$

eşitliği şeklindedir. Bu eşitlikte, birimler Δh_{\max} (mm) ve v (mm / s) dir.

4 mm kalıp ıstampa radyüsü koşullarında elde edilen sonuçlardan ERD 1314 kalite galvanize kaplanmış çelik sac için en büyük ürün kalınlığı miktarının (H) derin çekme hızı (v) ile 10 – 50 mm / s derin çekme hızı aralığında değişimi ise,

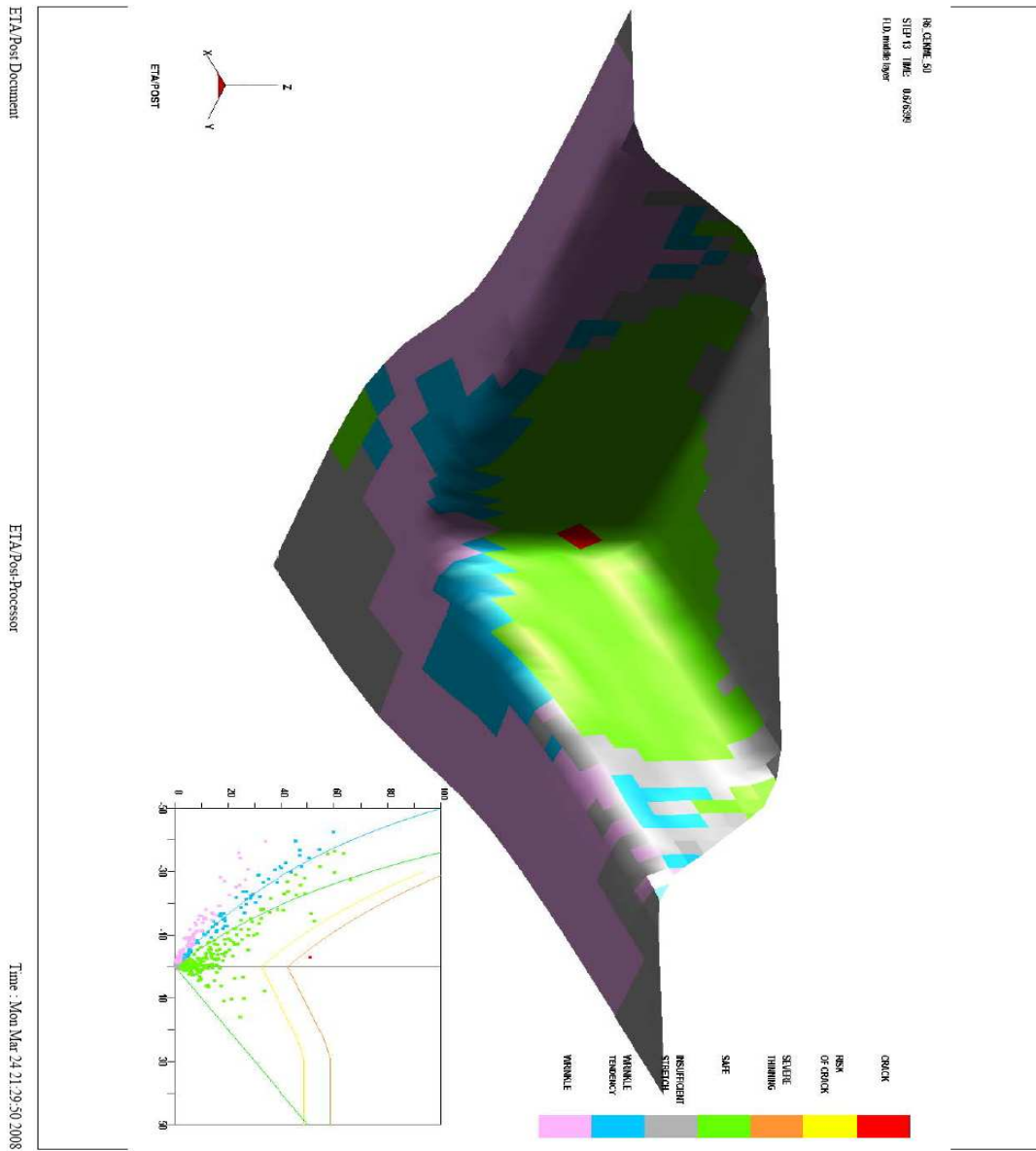
$$H = (- 0,15). v + 25,5$$

eşitliği şeklindedir. Bu eşitlikte, birimler H (mm) ve v (mm / s) dir.

5.2.4. Hız = 50 mm/s ve radyüs = 6 mm'deki kalınlık değişimi ve hasar sonuçları

Hız=50 mm/s ve radyüs=6mm için önce hasar durumu ve kalınlık değişimleri yüksekliğe bağlı olarak Şekil 5.11, Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'deki gibidir.

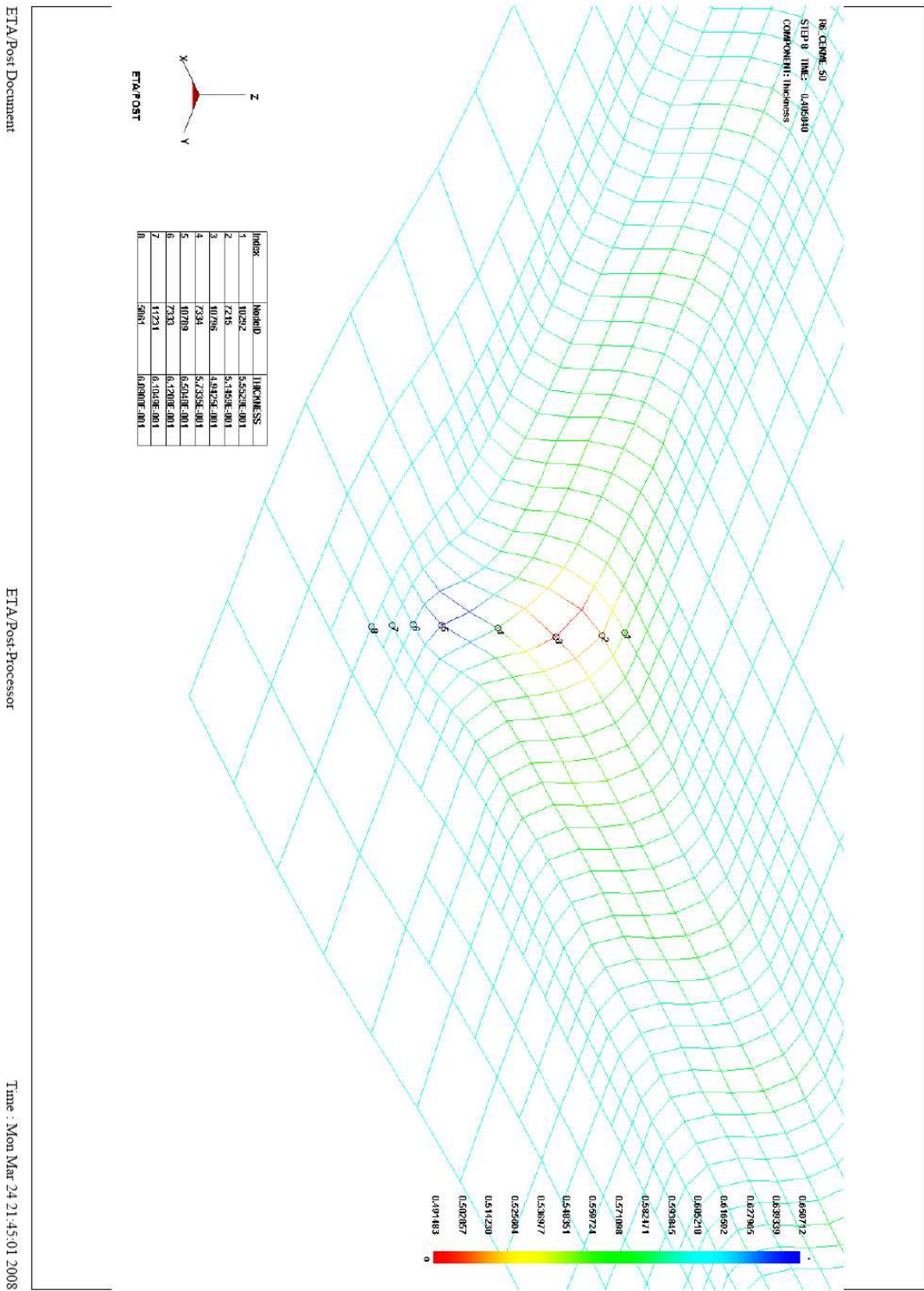
Şekil 5.11 deki ıstampa köşe noktaları hasar ve kalınlık değişimi açısından kritik olarak görülmektedir. Bu nedenle, incelemelerin bu bölgede yapması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Şekil 5.11 de bu şartlar altında hasar başlanıncının $h=31\text{mm}$ 'de başladığı simülasyon sonrasında görülmüştür (kırmızı nokta). 18,6 mm ve 31mm yüksekliğindeki kalınlık değişimleri Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'de verilmiştir.



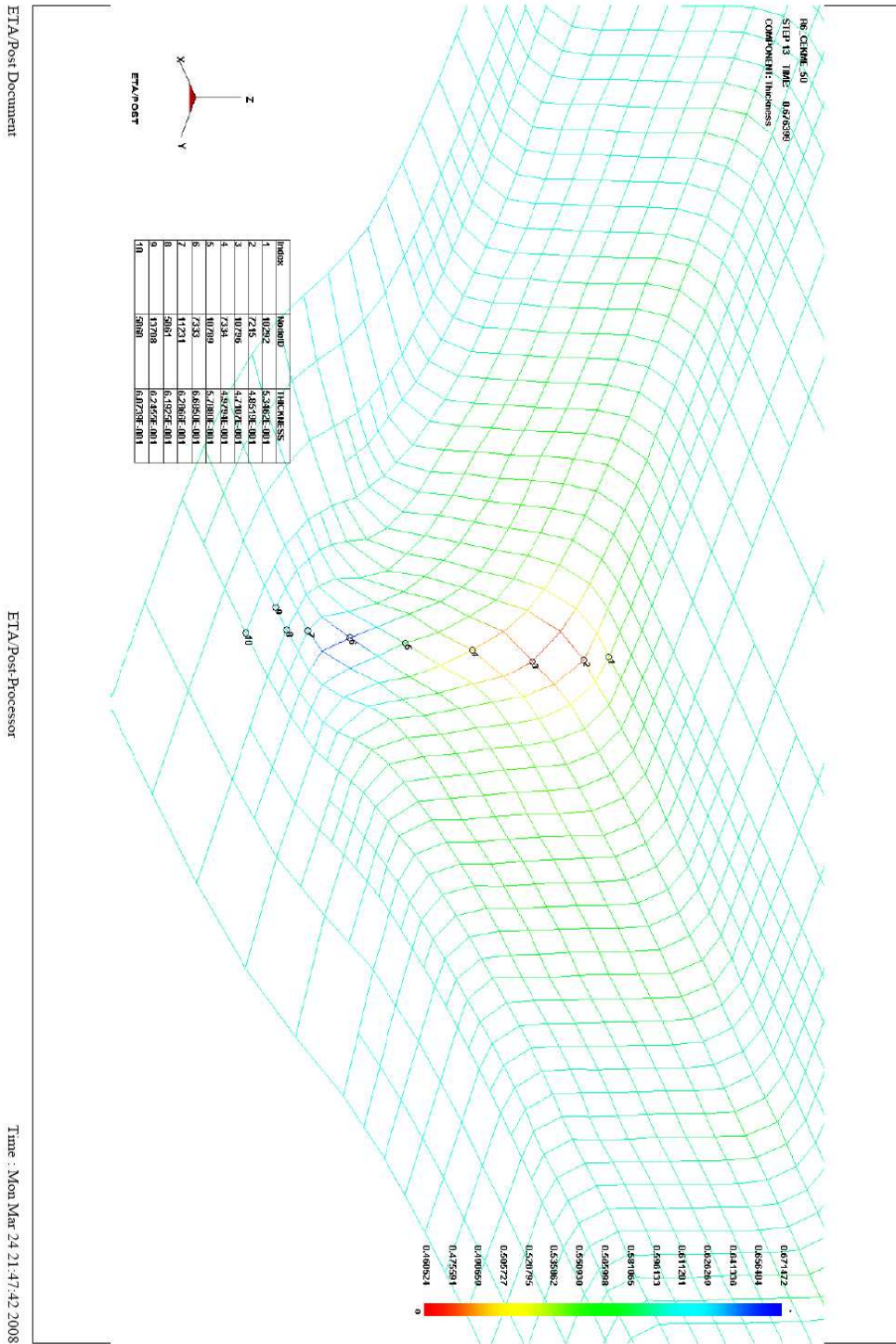
Şekil 5.11. Hız = 50 mm/s ve radyüs = 6 mm'deki hasar başlangıcı sonuçları (h = 31 mm)

Şekil 5.12'den 18,6 mm ürün yüksekliği için en fazla incelmenin 3 nolu noktada olduğunu görülmektedir. 3 nolu nokta iki yönlü çekme ve bükme zorlanmasının etkisindeki köşe radyüs bölgesidir. En büyük kalınlık azalması değeri 0,106mm'dir.

Şekil 5.13 ise 31mm ürün yüksekliği için en fazla incelmenin yine 3 nolu noktada olduğu görülmekte ve en büyük kalınlık azalması değeri 0,129mm'dir.



Şekil 5.12. 18,6 mm'deki kalınlık değişimi sonuçları



Şekil 5.13. 31 mm'deki kalınlık değişimi sonuçları

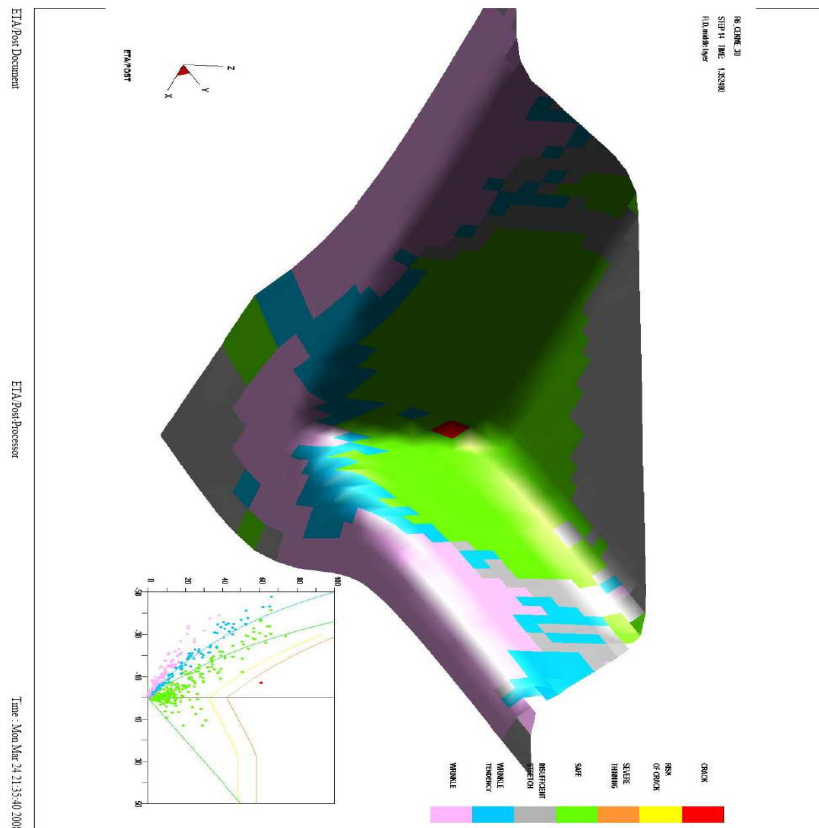
Şekil 5.11, Şekil 5.12 ve Şekil 5.13 incelemelerde kullanılan ERD 1314 kalite galvanize kaplanmış çelik sac ile bu ürünün 50 mm/s çekme hızı ile 6 mm ıstampa radyüs koşulları ile hasara uğramadan en fazla 30 mm derin çekilebileceği ve

18,6 mm derin çekme yükseklik değerinde 0,106 mm, 31 mm derin çekme yükseklik değerinde 0,129 mm kalınlık azalması göstereceği sonucunu vermiştir.

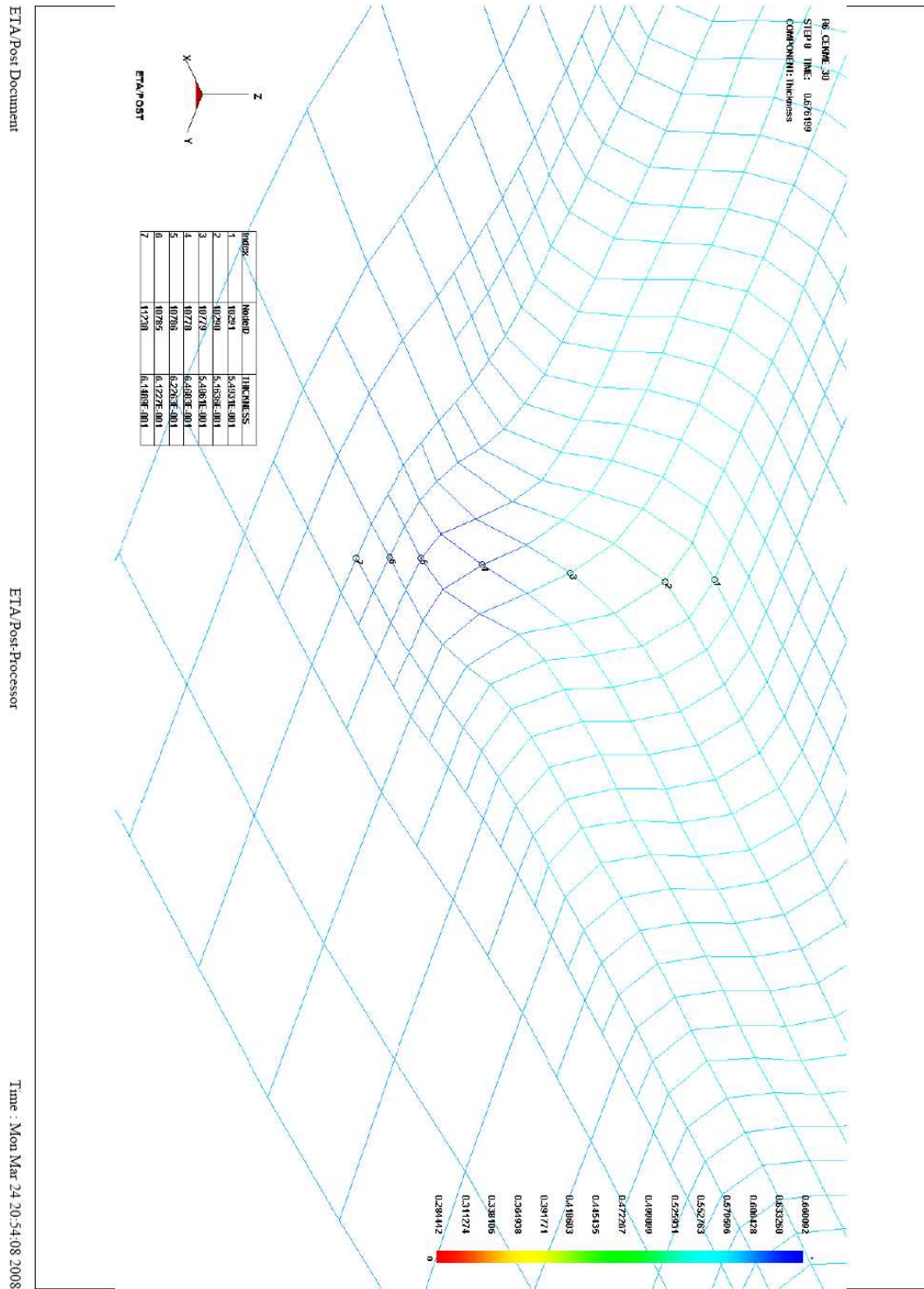
5.2.5. Hız = 30 mm/s ve radyüs = 6 mm'deki kalınlık değişimi ve hasar sonuçları

Hız=30 mm/s ve radyüs=6mm için önce hasar durumu ve sonrada kalınlık değişimleri yüksekliğe bağlı olarak Şekil 5.14, Şekil 5.15, Şekil 5.16 ve Şekil 5.17'deki gibidir.

Şekil 5.14'de ıstampa köşe noktaları hasar ve kalınlık değişimi açısından kritik olarak görülmekte ve incelemelerin bu bölgede yapılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Şekil 5.14'de bu şartlar altında hasarın $h=37,1\text{mm}$ 'de başladığı simülasyon sonrasında görülmüştür (kırmızı nokta). 18,6 mm, 31 mm ve 37,2mm yüksekliğindeki kalınlık değişimleri sırasıyla Şekil 5.15, Şekil 5.16 ve Şekil 5.17'de verilmiştir.

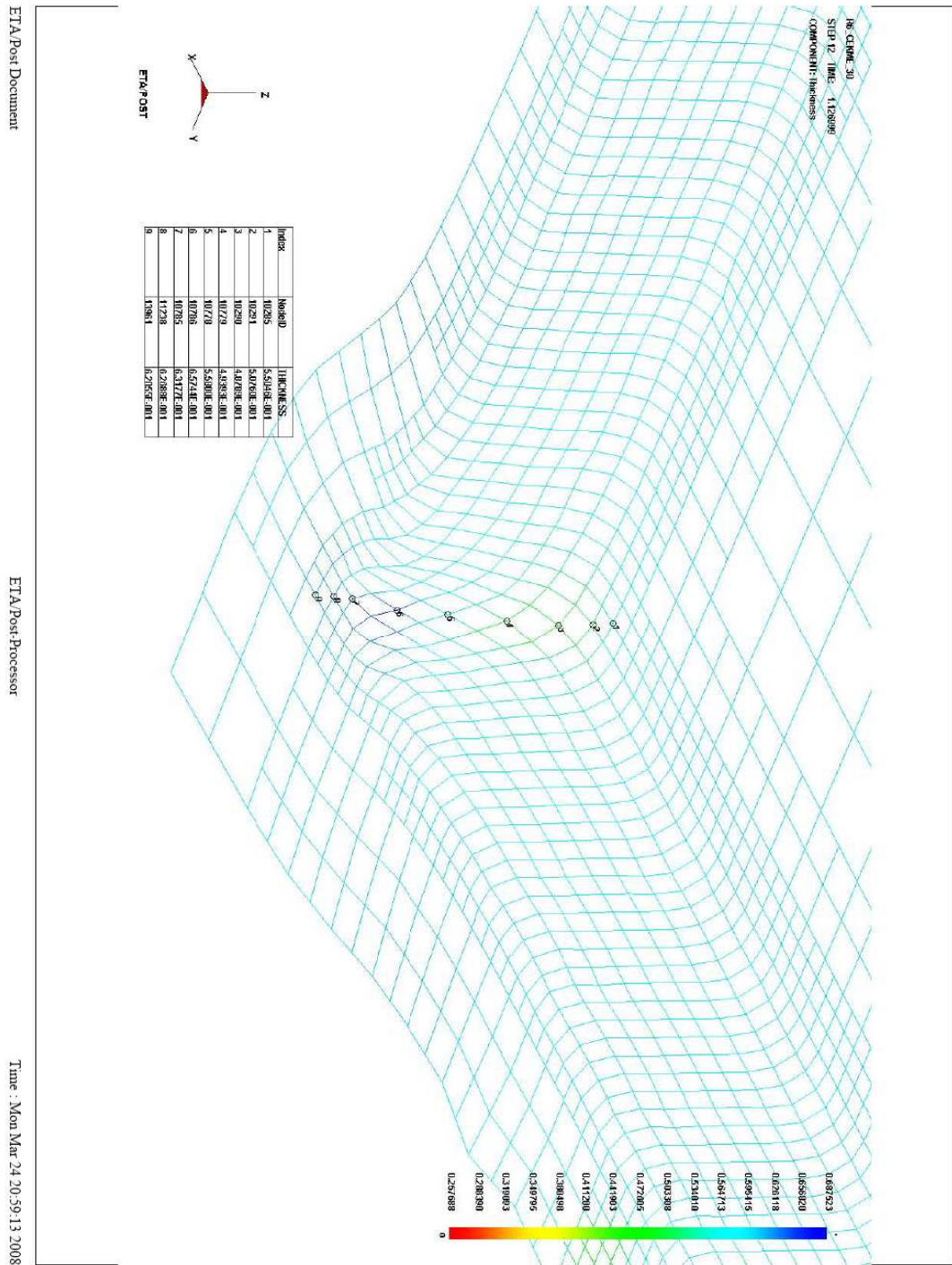


Şekil 5.14. Hız = 30 mm/s ve radyüs = 6 mm'deki hasar başlangıcı sonuçları ($h = 37,1\text{ mm}$)



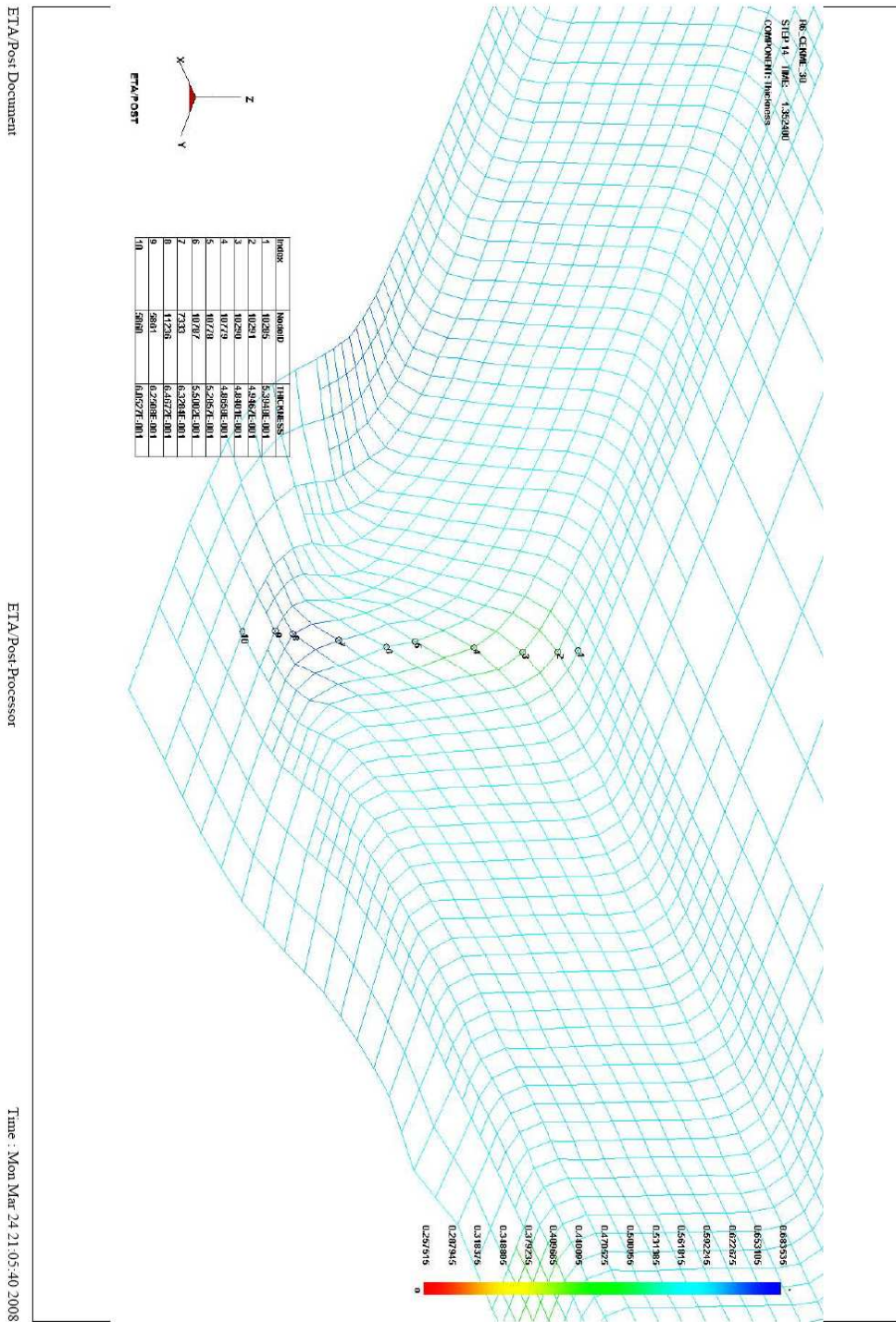
Şekil 5.15. 18,6 mm'deki kalınlık değişimi sonuçları

Şekil 5.15 en fazla incelmenin 2 nolu noktada olduğunu göstermektedir. 2 nolu nokta iki yönlü çekme ve bükme zorlanmasının etkisindeki köşe radyüs bölgesidir. En büyük kalınlık azalması değeri 0,084mm'dir.



Şekil 5.16. 31 mm'deki kalınlık değişimi sonuçları

Şekil 5.16 en fazla incelmenin 3 nolu noktada olduğunu göstermektedir. 3 nolu nokta iki yönlü çekme ve bükme zorlanmasının etkisindeki köşe radyüs bölgesidir. En büyük kalınlık azalması değeri 0,112mm'dir.



Şekil 5.17. 37,2 mm'deki kalınlık değişimi sonuçları

Şekil 5.17 37,2 mm ürün yüksekliği için en fazla incelmeyi 3 nolu noktada göstermektedir. İncelenen koşulda hasar başlangıç değeri 37,1 mm ise de kalınlık azalması ölçümleri için simülasyon programının step koşullarından dolayı

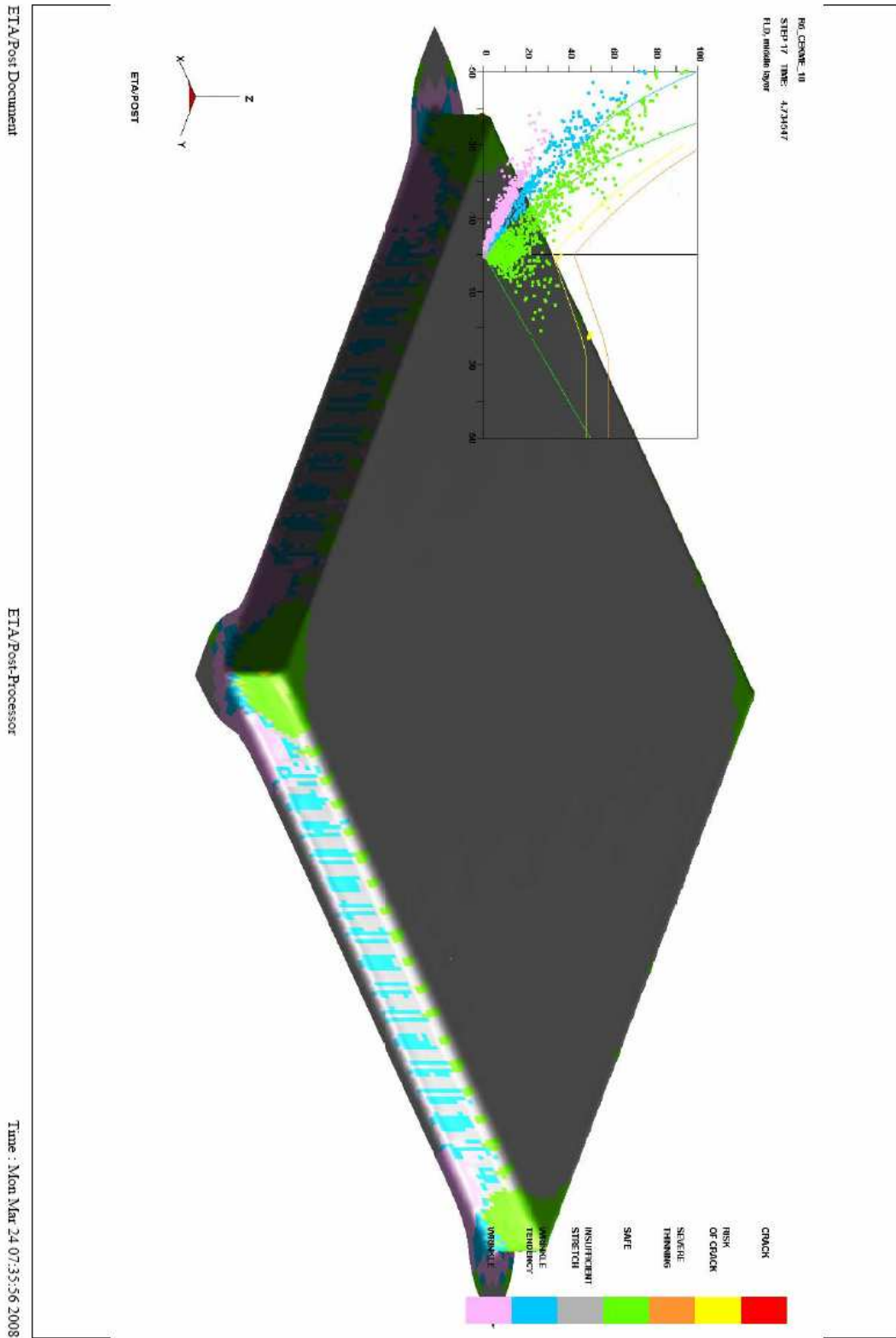
kabul edilebilir deęerler elde edilebileceęi dūřünūlen 37,2 mm den alınmıřtır. Buradaki en bŸyŸk kalınlık azalması deęeri 0,116mm'dir.

şekil 5.14 incelenen malzeme ile bu ŸrŸnŸn 30 mm/s çekme hızı ve 6 mm ıstampa radyŸsŸ ile hasara uğramadan en fazla 37 mm derin çekilebileceği sonucunu vermektedir.

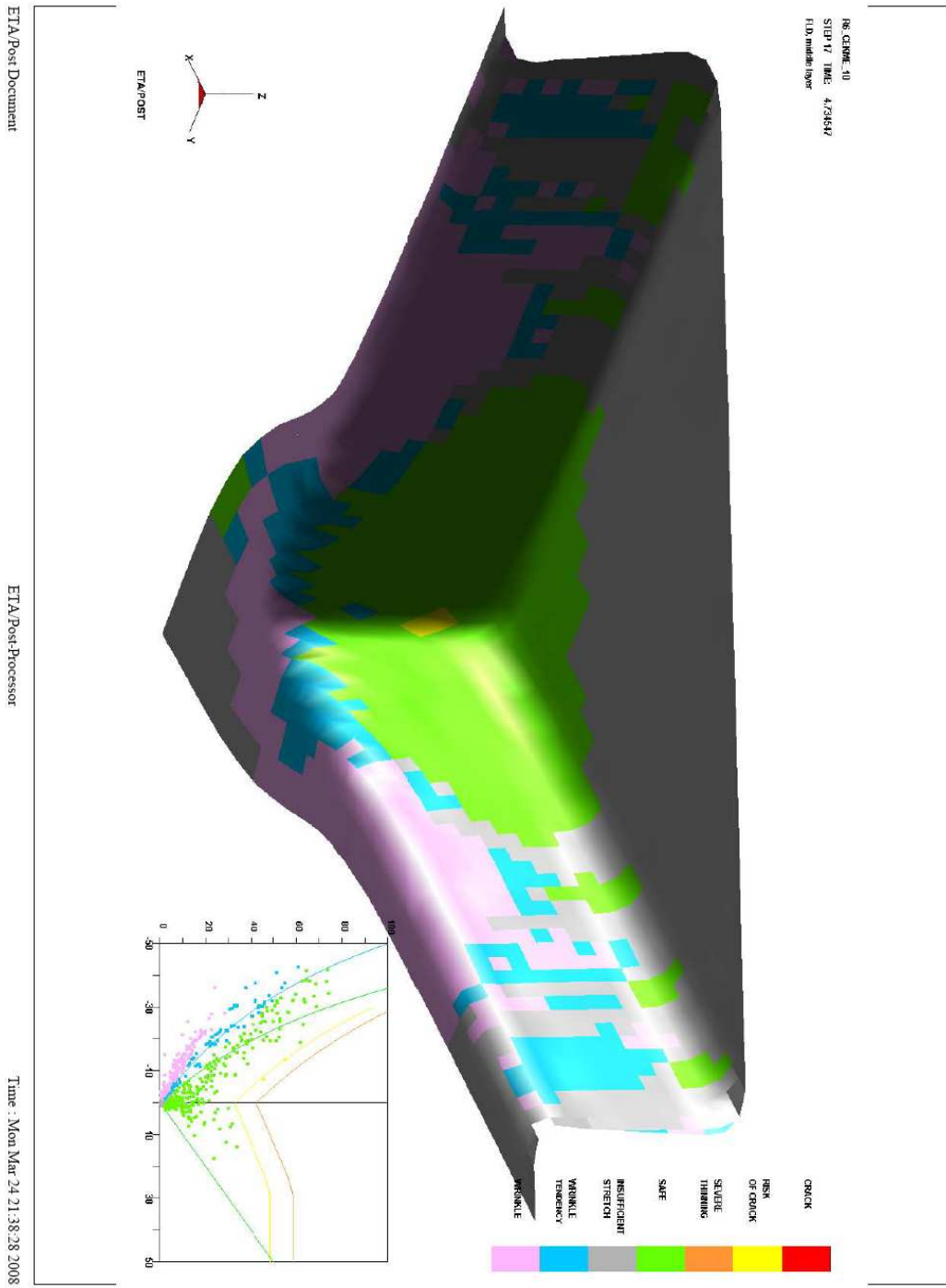
5.2.6. Hız = 10 mm/s ve radyŸs = 6 mm'deki kalınlık değişimi ve hasar sonuçları

Hız=10 mm/s ve radyŸs=6mm için Ÿnce hasar durumu ve sonra kalınlık değişimleri yŸkseklięe bağlı olarak şekil 5.18, şekil 5.19, şekil 5.20, şekil 5.21, şekil 5.22 ve şekil 5.23'deki gibidir.

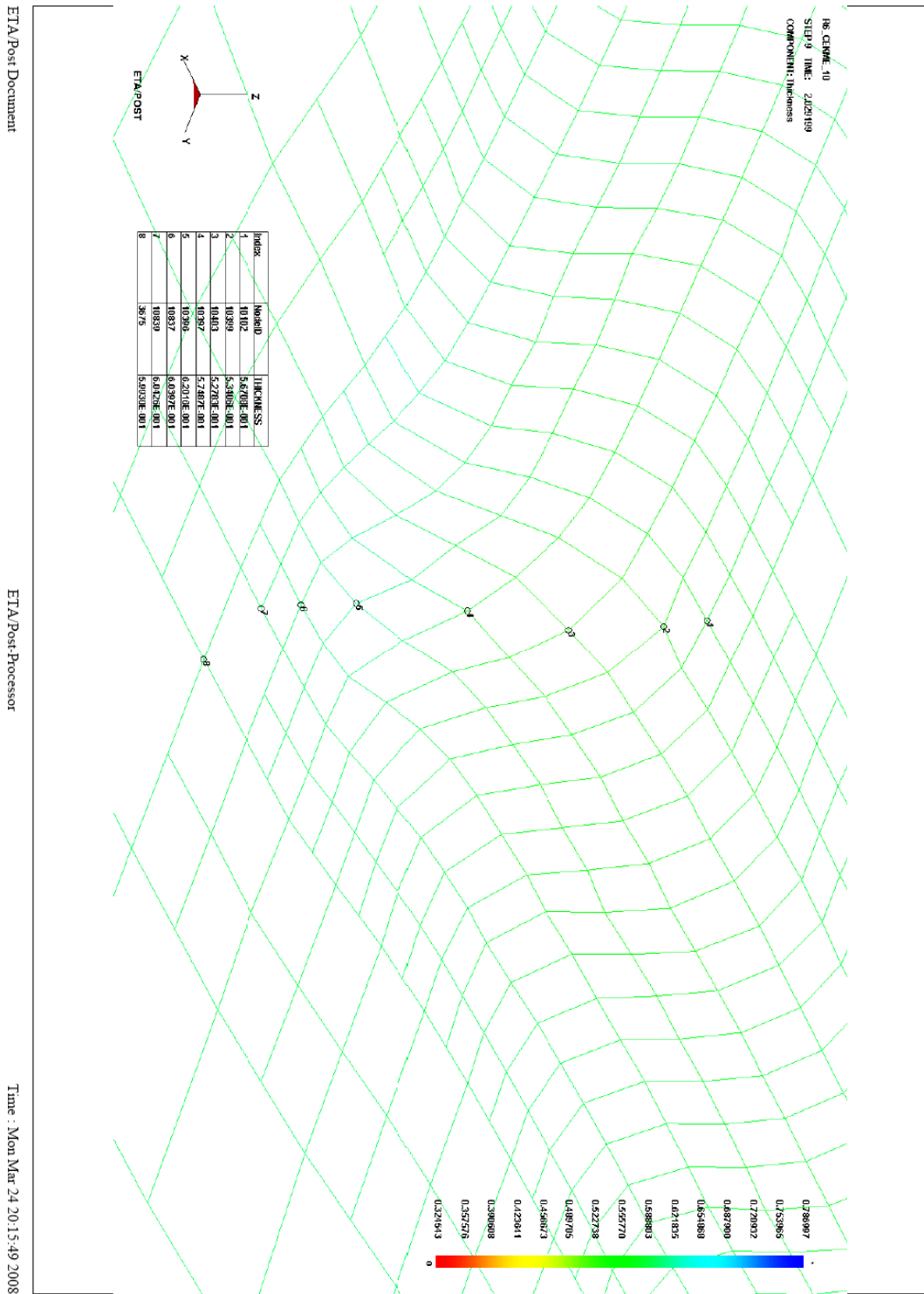
şekil 5.18 ve şekil 19'da ıstampa kŸře noktaları hasar ve kalınlık değişimi açısından kritik olarak gŸrŸlmekte ve incelemelerin bu bŸlgede yapılması gerekliliği ortaya çıkmıştır. şekil 5.19'de bu şartlar altında 43,4mm derin çekme yŸkseklięinde hasarın olmadığı simŸlasyon sonrasında gŸrŸlmŸřtŸr. Bu durum aynı koşullarda yapılan deneysel çalışmada da gŸzlenmiřtir. 18,6 mm, 31 mm, 37,2 mm ve 43,4 mm yŸkseklięindeki kalınlık değişimleri sırasıyla şekil 5.20, şekil 5.21, şekil 5.22 ve şekil 5.23'de verilmiştir.



Şekil 5.18. Hız = 10 mm/s ve radyüs = 6 mm'deki hasar durumu sonuçları (h = 43,4 mm)

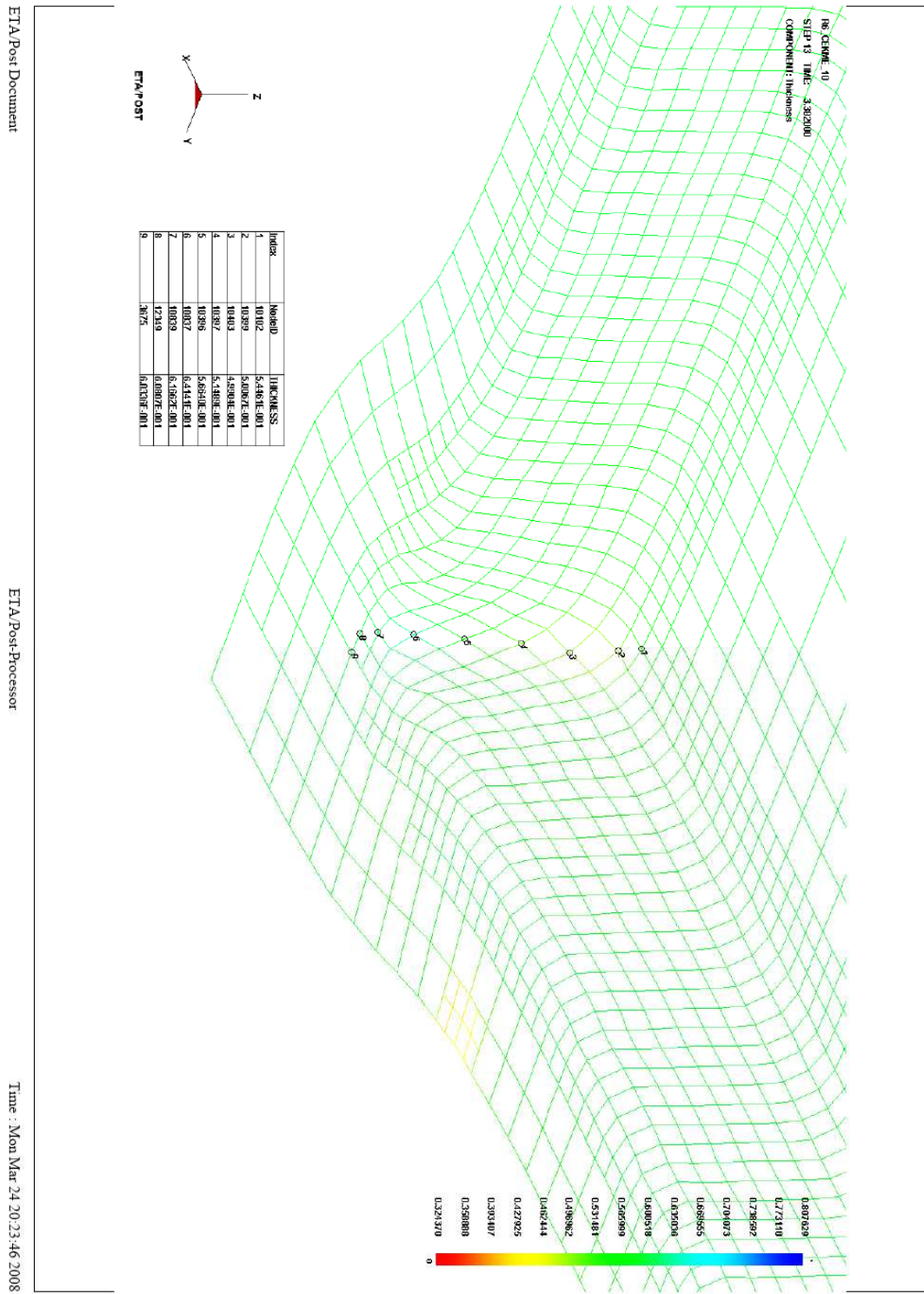


Şekil 5.19. Hız = 10 mm/s ve radyüs = 6 mm'de hasar yoktur.



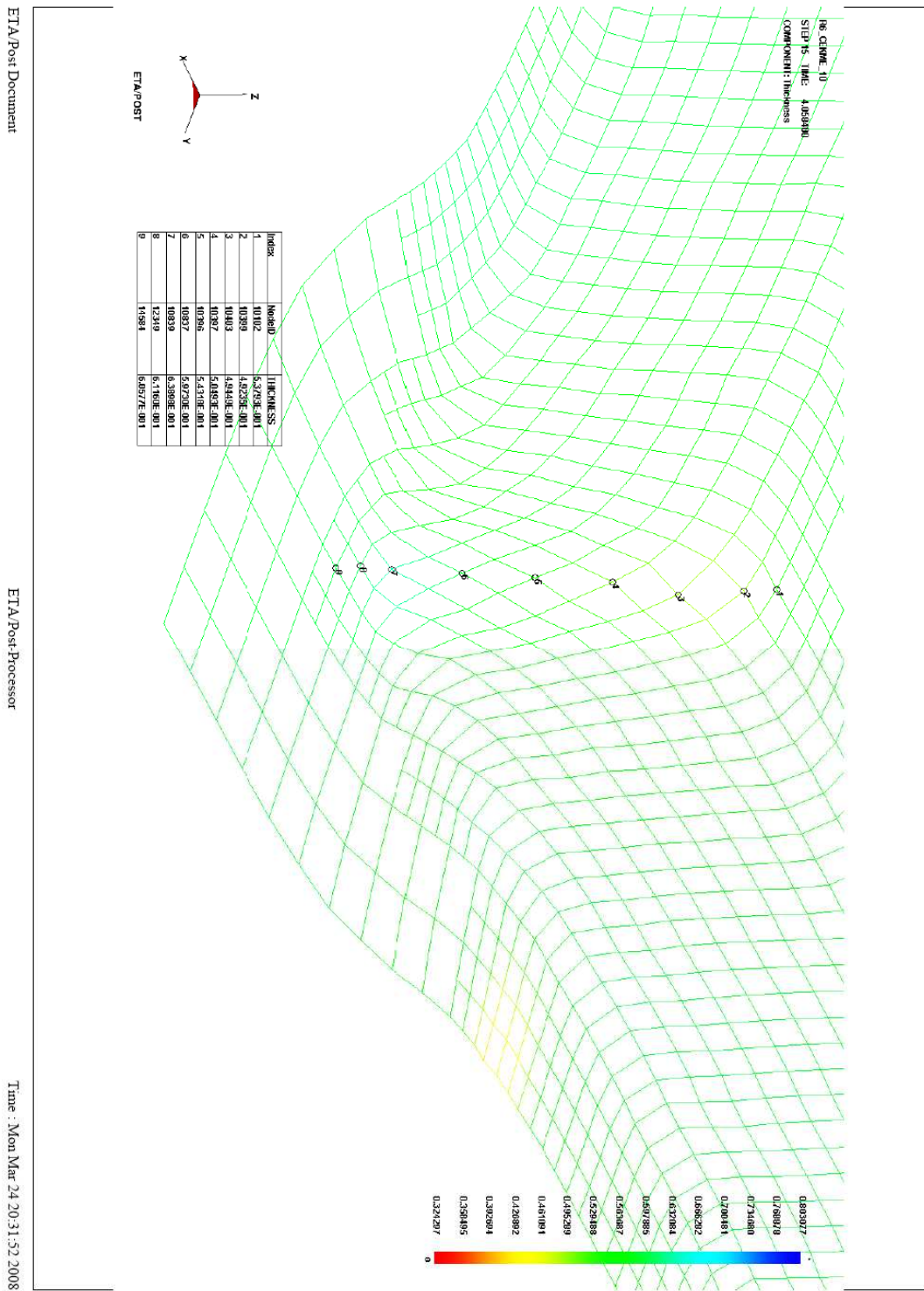
Şekil 5.20. 18,6 mm'deki kalınlık değişimi sonuçları

Şekil 5.20'den en fazla incelmenin 3 nolu noktada olduğu görülmekte ve 3 nolu nokta iki yönlü çekme ve bükme zorlanmasının etkisindeki köşe radyüs bölgesidir. Bu noktadaki en büyük kalınlık azalması değeri 0,072mm olarak tespit edilmiştir.



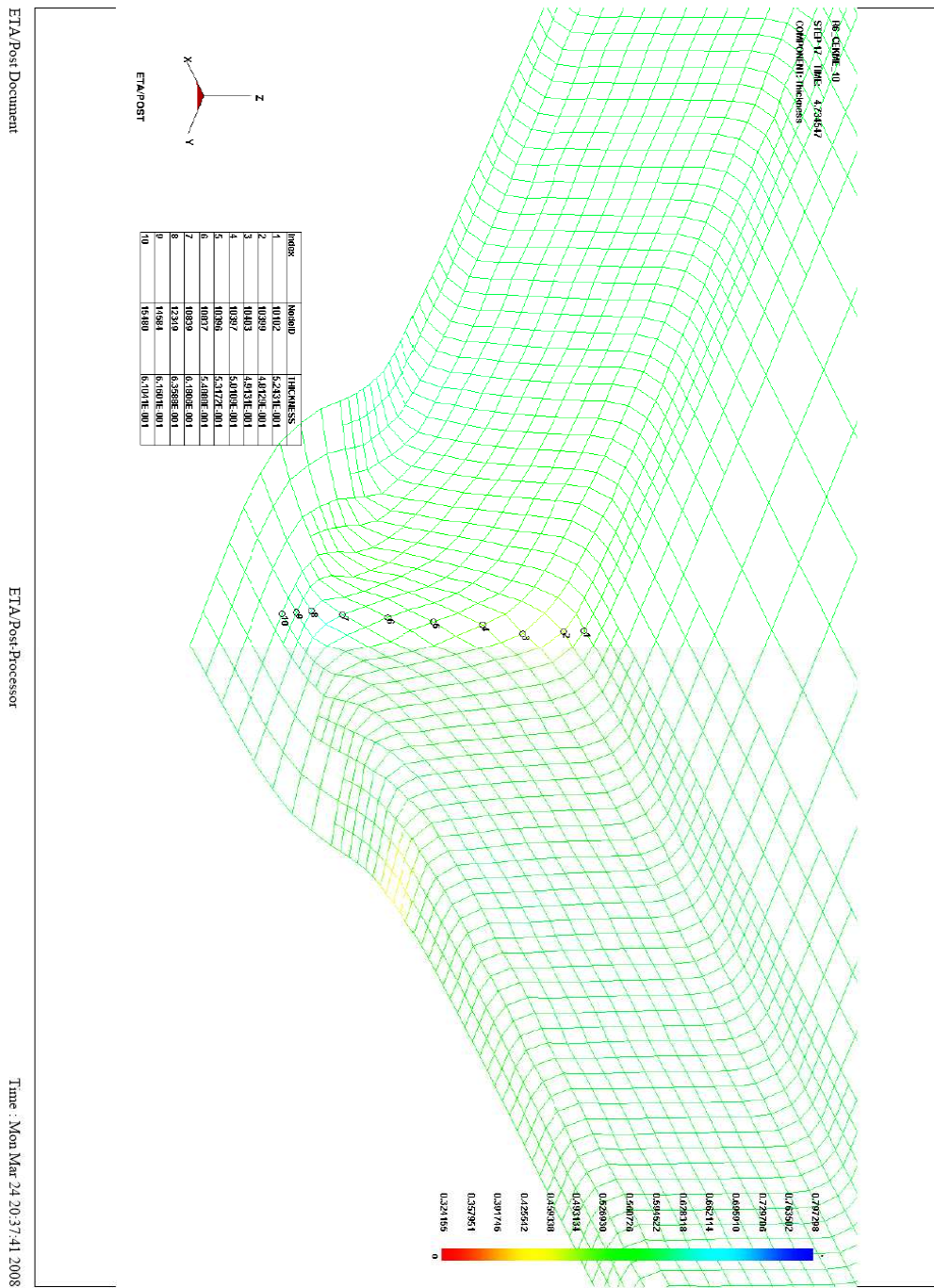
Şekil 5.21. 31 mm'deki kalınlık değişimi sonuçları

Şekil 5.21 en fazla incelmeyi 3 noktasında göstermekte ve bu noktada en büyük kalınlık azalması değeri 0,101mm olarak görülmektedir.



Şekil 5.22. 37,2 mm'deki kalınlık değişimi sonuçları

Şekil 5.22 ise en fazla incelmenin 2 nolu noktada olduğunu ve 2 nolu noktada en büyük kalınlık azalması değeri 0,108mm olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.23. 43,4 mm'deki kalınlık değişimi sonuçları

Şekil 5.23'den en fazla incelmenin 2 nolu noktada olduğu görülmektedir. 2 nolu noktadaki en büyük kalınlık azalması değeri ise 0,119mm'dir.

Şekil 5.18 ve Şekil 5.19 göstermiştir ki; incelenen malzeme ile bu ürünün 10 mm/s çekme hızı ve 6 mm ıstampa radyüsü ile 43,4 mm derin çekmeye yüksekliğine sahip bu ürünün emniyetli bir şekilde üretilebileceği sonucunu vermiştir.

6 mm ıstampa radyüs değeri için 10–30–50 mm/s derin çekme hızları simülasyon sonuçlarından elde edilen en büyük kalınlık azalması değeri ve hasarsız en büyük derin çekme yükseklik değeri Tablo 5.3’de sunulmuştur.

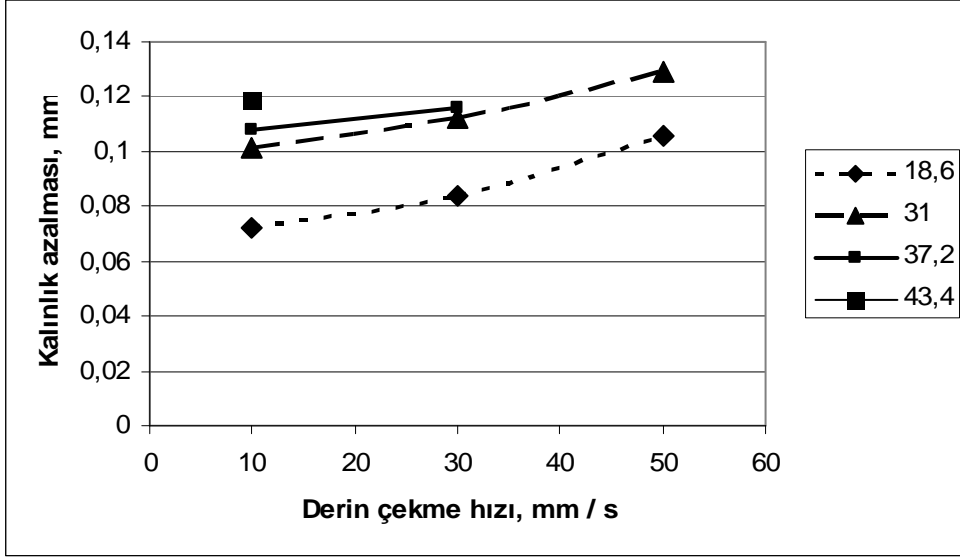
Tablo 5.3 6 mm ıstampa radyüsü - 10–30–50 mm/s derin çekme hızları ve farklı ürün yükseklikleri için en büyük kalınlık azalması değeri ve hasarsız en büyük derin çekme yükseklik değeri sonuçları

Derin çekme hızı (mm/s)	Derin çekme yüksekliği (mm)	En büyük kalınlık azalması (mm)	Hasarsız en büyük derin çekme yüksekliği (mm)
10	18,6	0,072	43,4 en büyük inceleme yüksekliğinde hasar oluşmamıştır
	31	0,101	
	37,2	0,108	
	43,4	0,119	
30	18,6	0,084	37
	31	0,112	
	37,2	0,116	
50	18,6	0,106	30
	31	0,129	

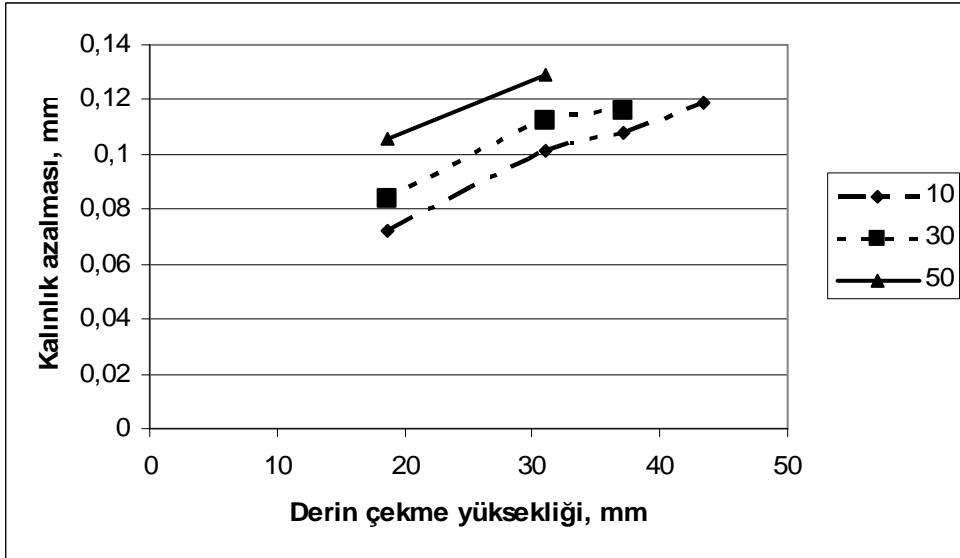
Tablo 5.3’deki değerler ile araştırmada kullanılan ERD 1314 kalite galvenize kaplanmış çelik sac için derin çekme hızının en büyük kalınlık azalmasına etkisi Şekil 5.24’de, derin çekme yüksekliğinin en büyük kalınlık azalması değişimine etkisi Şekil 5.25’de ve derin çekme hızının hasarsız en büyük derin çekme hızına etkisi Şekil 5.26’da verilmiştir.

Şekil 5.24 derin çekme hızı artışı ile kalınlıktaki incelme miktarlarının arttığını göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, derin çekme hızı artışı ile ıstampa radyüs bölgesinde ürünün sac kalınlığı doğrultusunda daha fazla şekil değişimine zorlandığını göstermektedir. Şekil 5.25 derin çekme yüksekliği artışı ile inceleme

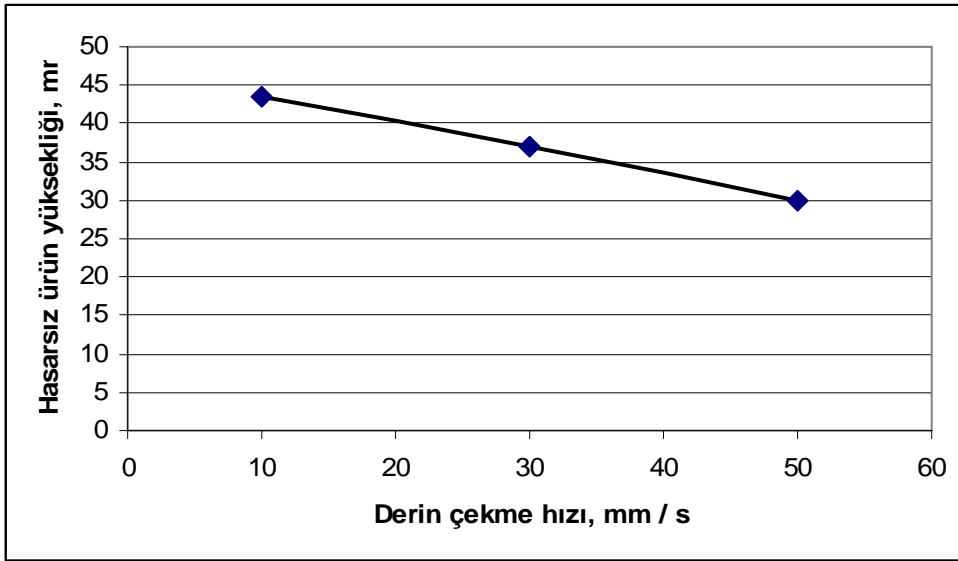
koşulları için ürün yüksekliği değeri artışı süresince kalınlık azalması değişiminin doğrusal kabul edilebilecek şekilde artarak değiştiğini göstermektedir.



Şekil 5.24 Derin çekme hızının en büyük kalınlık azalmasına etkisi



Şekil 5.25 Derin çekme yüksekliğinin en büyük kalınlık azalması değişimi



Şekil 5.26 Derin çekme hızının hasarsız en büyük derin çekme yüksekliğine etkisi

Şekil 5.26 derin çekme hızındaki değer artışının hasarsız elde edilebilecek ürün yüksekliği değerlerini azalttığını göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, derin çekme hızı artışı ile ıstampa radyüs bölgesinde ürünün sac kalınlığı doğrultusunda daha fazla şekil değişimine zorlandığı sonuçlarına uygundur. Grafikte, çalışmada en büyük ürün yüksekliği olarak 43,4 mm planlanması nedeniyle derin çekme hızı 10 mm / s için hasar oluşmamış ve en büyük hasarsız ürün yükseklik değeri elde edilememiştir. Bununla beraber, 4 mm ıstampa radyüsü verileri ve 6 mm ıstampa radyüsü 30–50 mm / s verilerinden bu parametrelerde hasarın 45 mm ürün yüksekliği değerinde oluşacağı tahmin edilmektedir.

6 mm kalıp ıstampa radyüsü koşullarında elde edilen sonuçlardan ERD 1314 kalite galvanize kaplanmış çelik sac için en büyük kalınlık azalması miktarının (Δh_{\max}) derin çekme hızı (v) ile 10 – 50 mm / s derin çekme hızı aralığında değişimi:

$$\Delta h_{\max} = 0,0008 \cdot v + 0,0618 \text{ (18,6 mm için)}$$

$$\Delta h_{\max} = 0,0007 \cdot v + 0,0930 \text{ (31 mm için)}$$

$$\Delta h_{\max} = 0,0004 \cdot v + 0,1040 \text{ (37,2 mm için)}$$

eşitlikleri şeklindedir. Bu eşitlikte, birimler Δh_{\max} (mm) ve v (mm / s) dir.

6 mm kalıp ıstampaya radyüsü koşullarında elde edilen sonuçlardan ERD 1314 kalite galvanize kaplanmış çelik sac için en büyük ürün kalınlığı miktarının (H) derin çekme hızı (v) ile 10 – 50 mm / s derin çekme hızı aralığında değişimi ise,

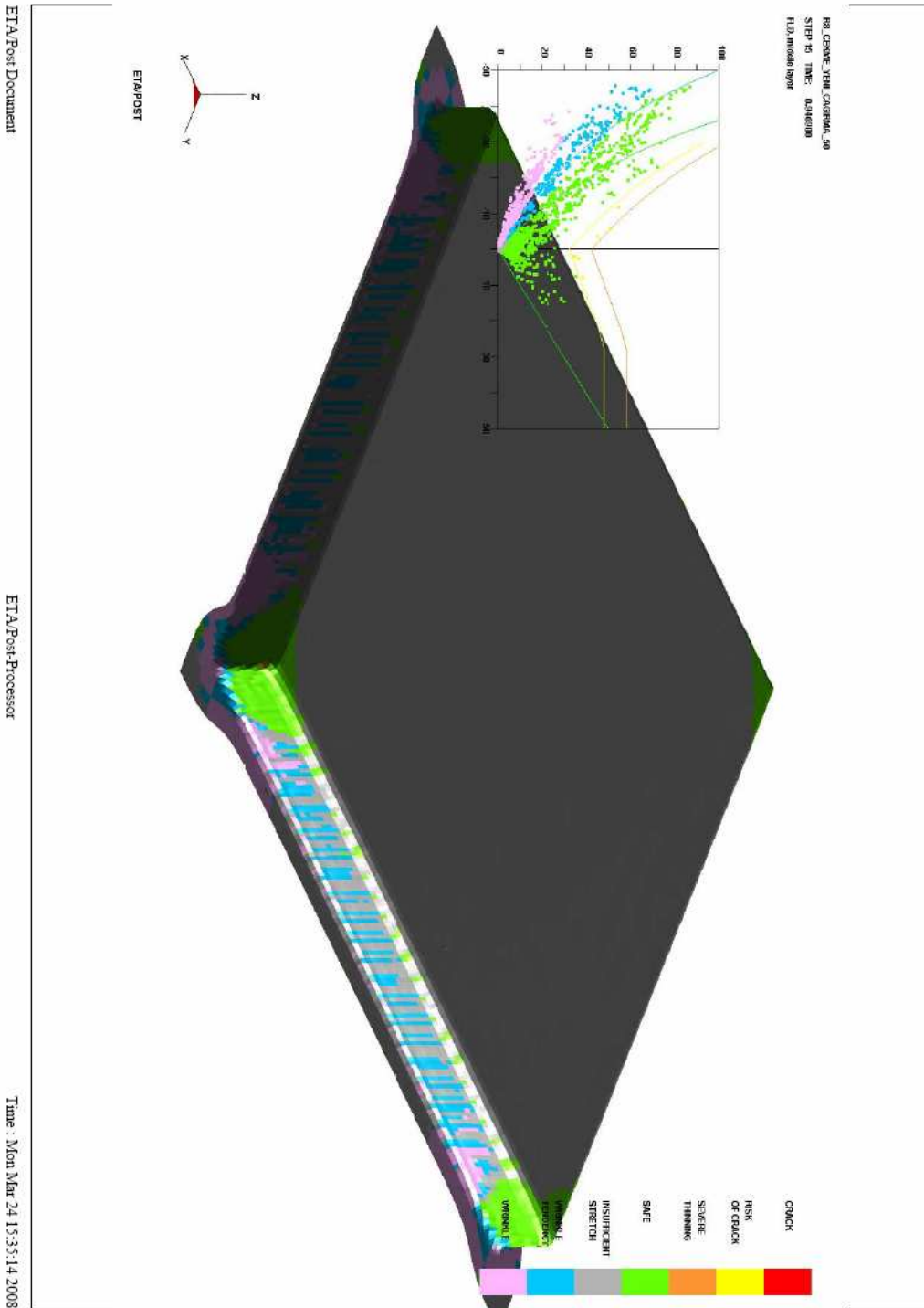
$$H = (- 0,35). v + 47,5$$

eşitliği şeklindedir. Bu eşitlikte, birimler H (mm) ve v (mm / s) dir.

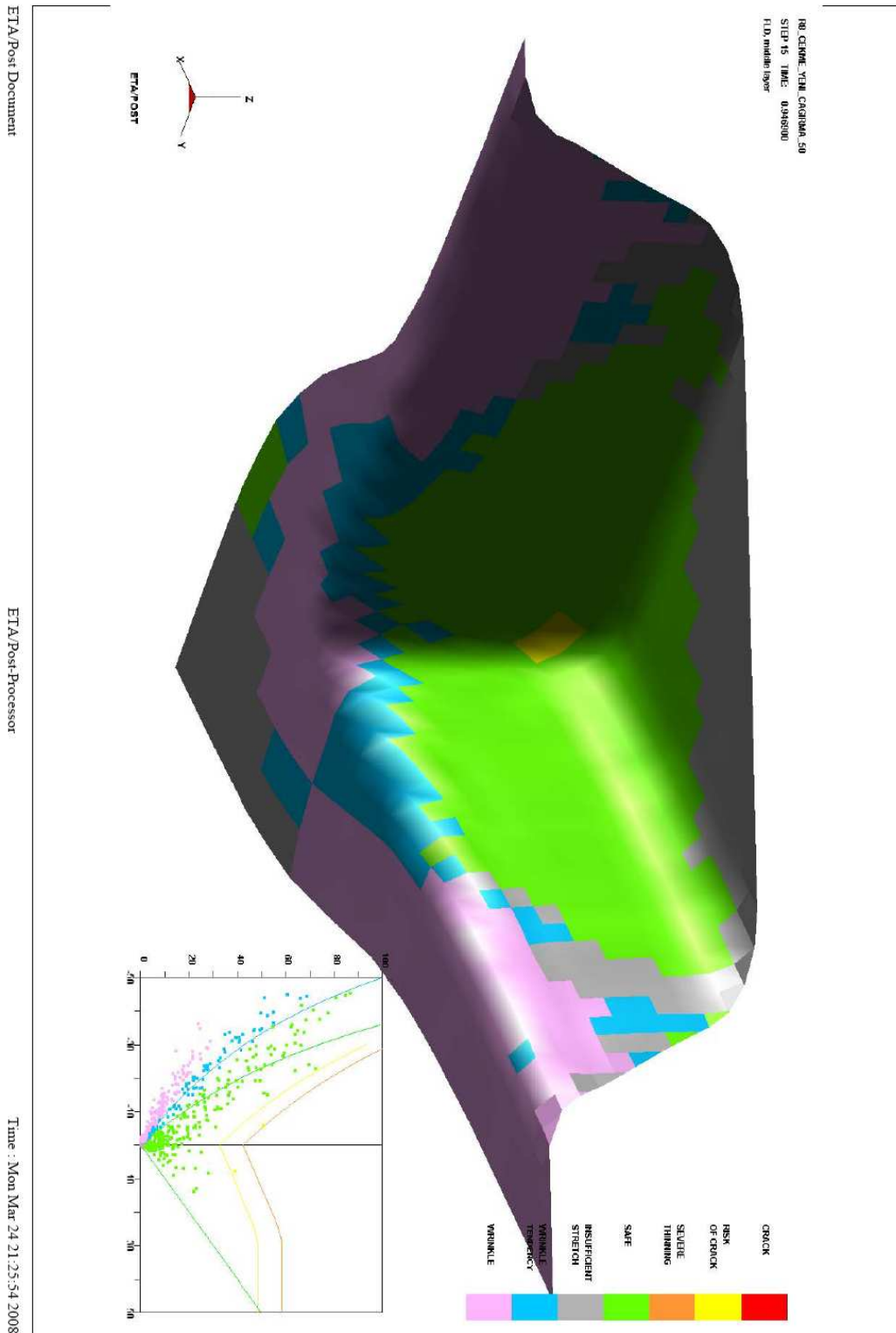
5.2.7. Hız = 50 mm/s ve radyüs = 8 mm'deki kalınlık değişimi ve hasar sonuçları

Hız=50 mm/s ve radyüs=8mm için önce hasar durumu ve sonrada kalınlık değişimleri yüksekliğe bağlı olarak Şekil 5.27, Şekil 5.28, Şekil 5.29, Şekil 5.30, Şekil 5.31 ve Şekil 5.32'deki gibidir.

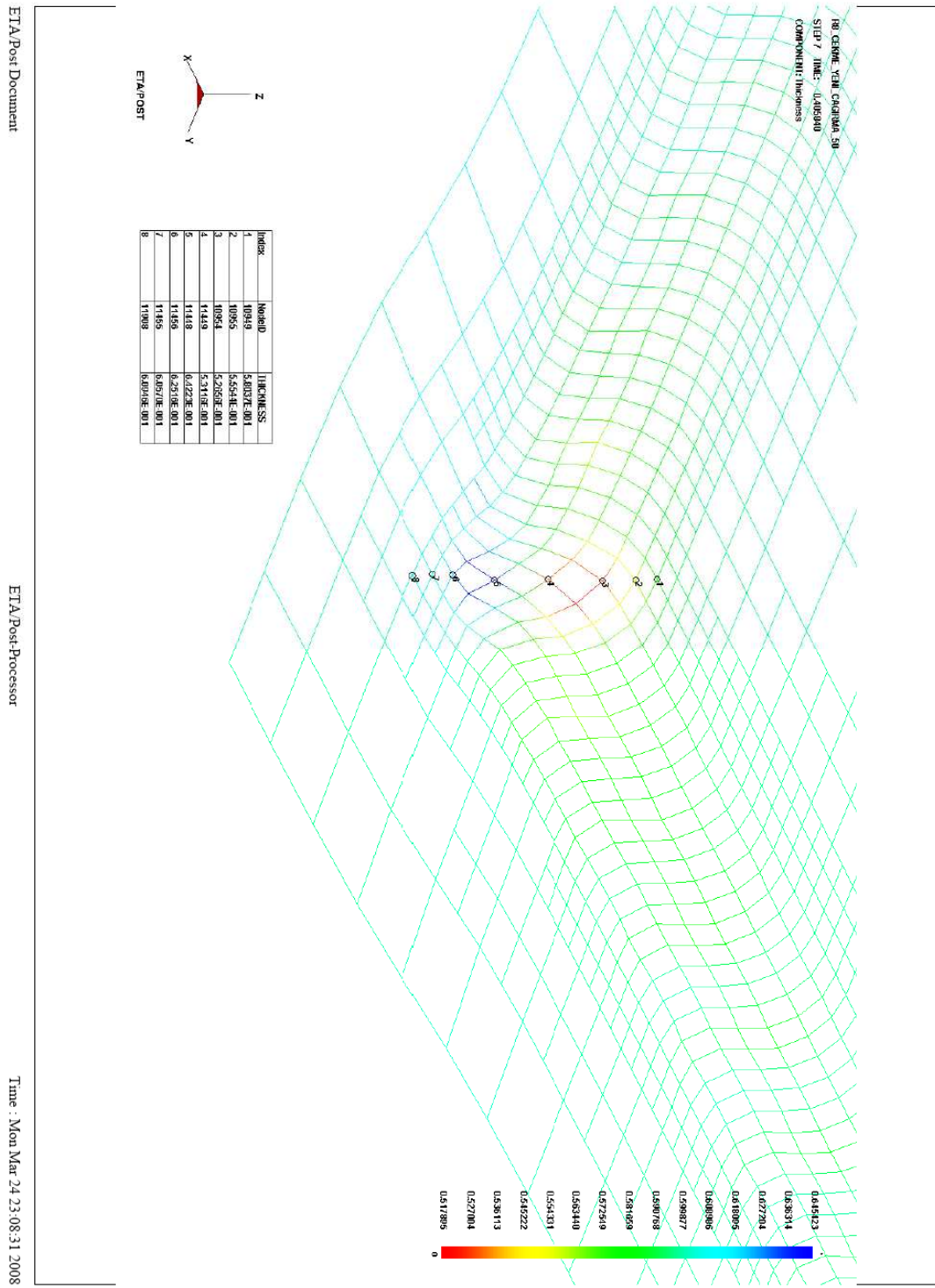
Şekil 5.27–5.28'de bu şartlar altında planlanan en büyük derin çekme yüksekliği olan 43,4mm'de hasarın olmadığı simülasyon sonuçlarında görülmektedir. 18,6 mm, 31 mm, 37,2 mm ve 43,4 mm yüksekliğindeki kalınlık değişimleri sırasıyla Şekil 5.29, Şekil 5.30, Şekil 5.31 ve Şekil 5.32'de verilmiştir.



Şekil 5.27. Hız = 50 mm/s ve radyüs = 8 mm'deki hasar durumu sonuçları (h = 43,4 mm)



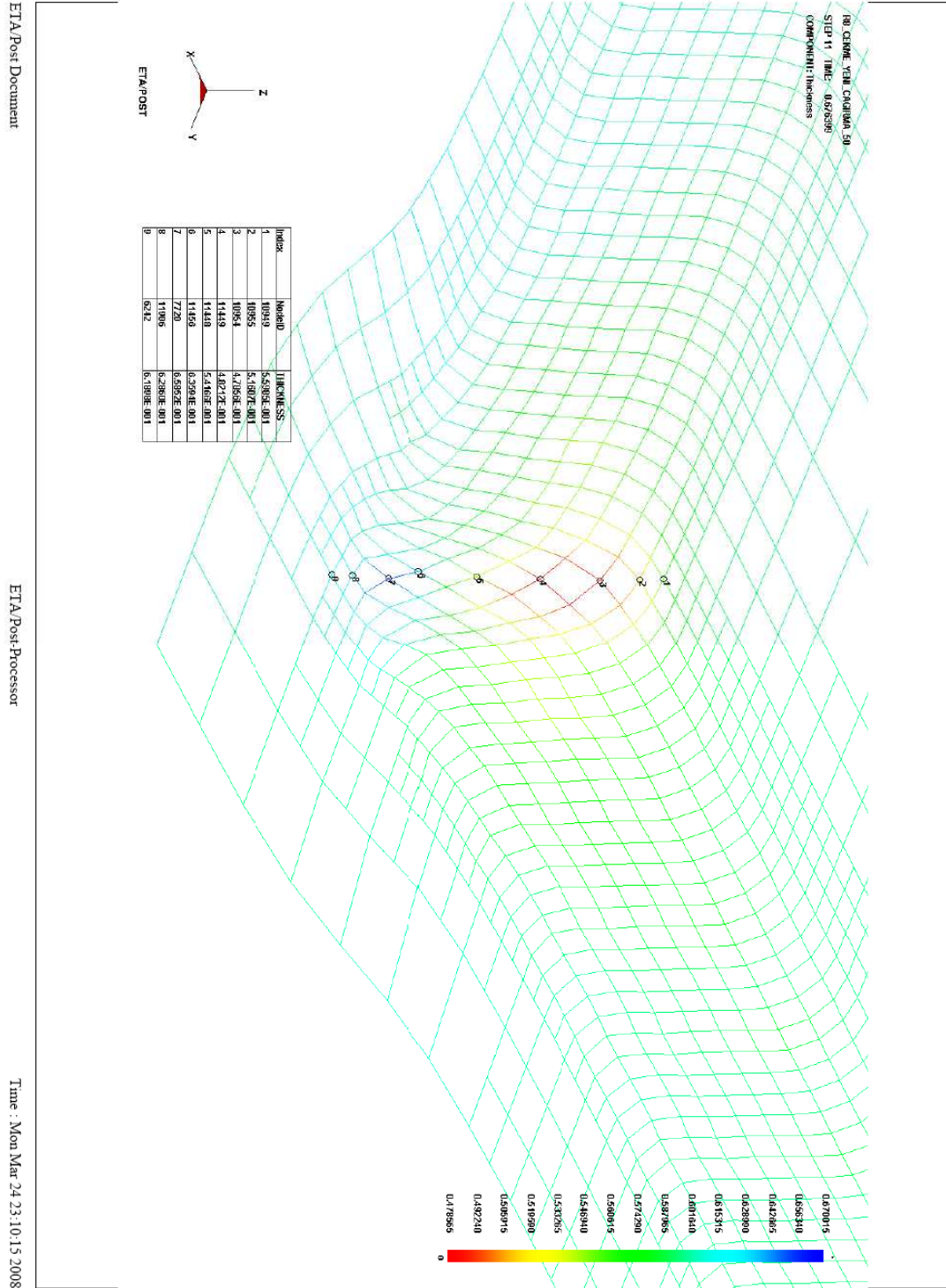
Şekil 5.28. Hız = 50 mm/s ve radyüs = 8 mm'de hasar yoktur.



Şekil 5.29. 18,6 mm'deki kalınlık değişimi sonuçları

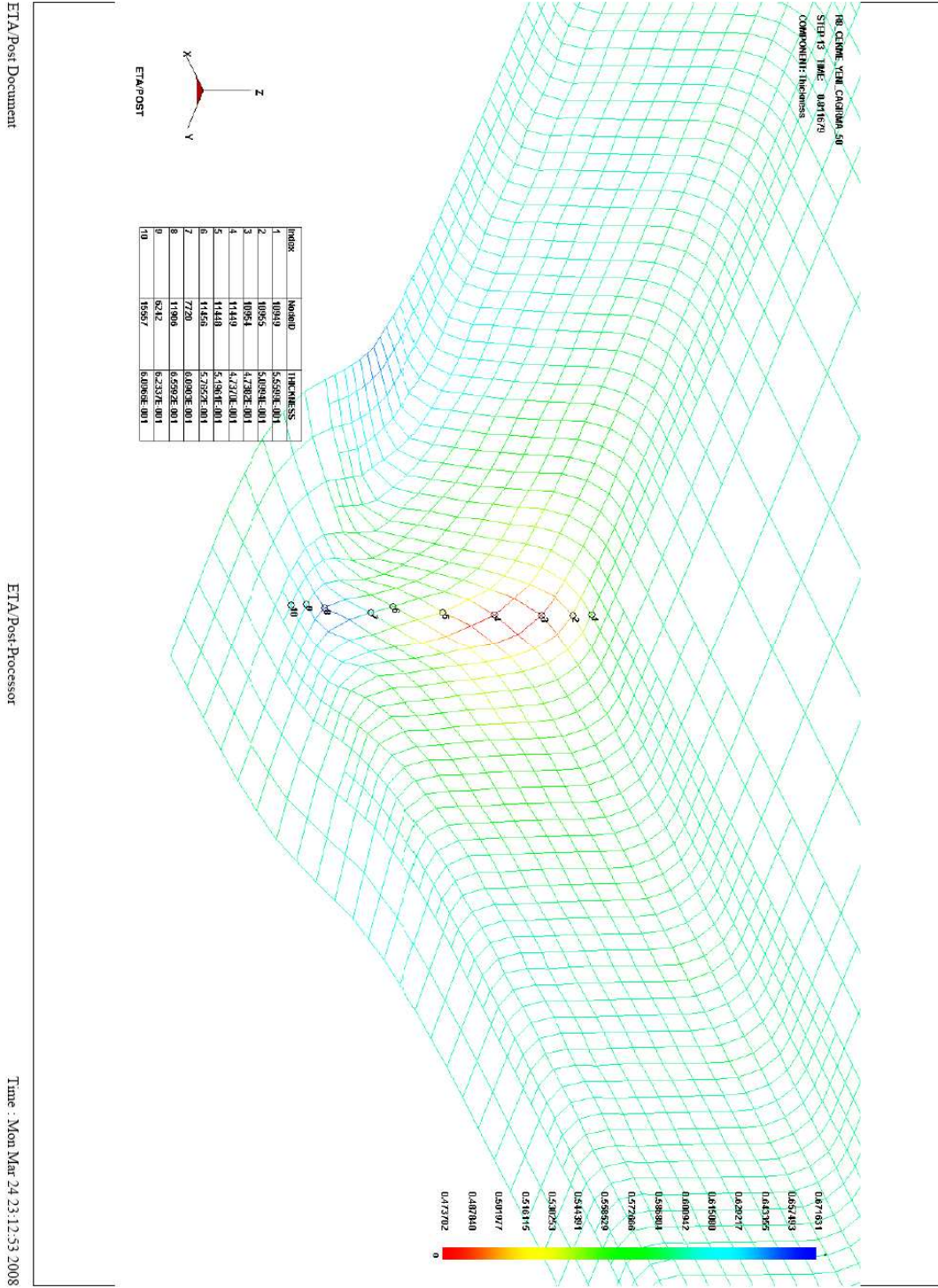
Şekil 5.29 18,6 mm ürün yüksekliği için en fazla incelmeyi 3 nolu noktada göstermektedir. 3 nolu nokta iki yönlü çekme ve bükme zorlanmasının

etkisindeki ıstampa köşe radyüs üst bölgesidir. En büyük kalınlık azalması değeri 0,074mm'dir.



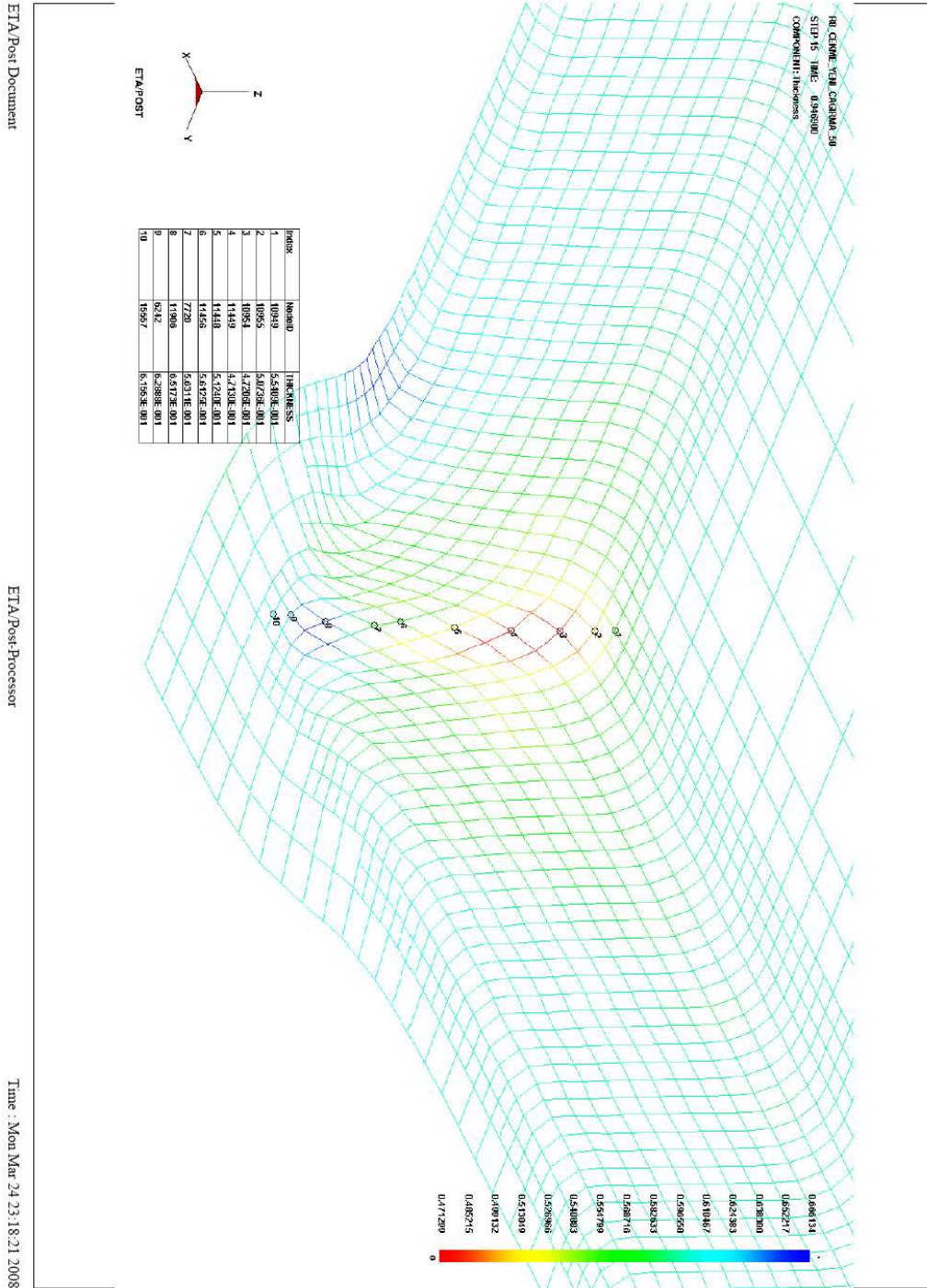
Şekil 5.30. 31 mm'deki kalınlık değişimi sonuçları

Şekil 5.30 31 mm ürün yüksekliği için en fazla incelmeyi 3 nolu noktada olduğunu göstermektedir. 3 nolu nokta iki yönlü çekme ve bükme zorlanmasının etkisindeki köşe radyüs bölgesidir. En büyük kalınlık azalması değeri 0,122mm'dir.



Şekil 5.31. 37,2 mm'deki kalınlık değişimi sonuçları

Şekil 5.31 37,2 mm ürün yüksekliği için en fazla incelmenin 3 ve 4 nolu noktalarda olduğunu göstermektedir. 3 ve 4 nolu noktalar iki yönlü çekme ve bükme zorlanmasının etkisindeki ıstampa köşe radyüs bölgesidir. En büyük kalınlık azalması değeri 0,127mm'dir.



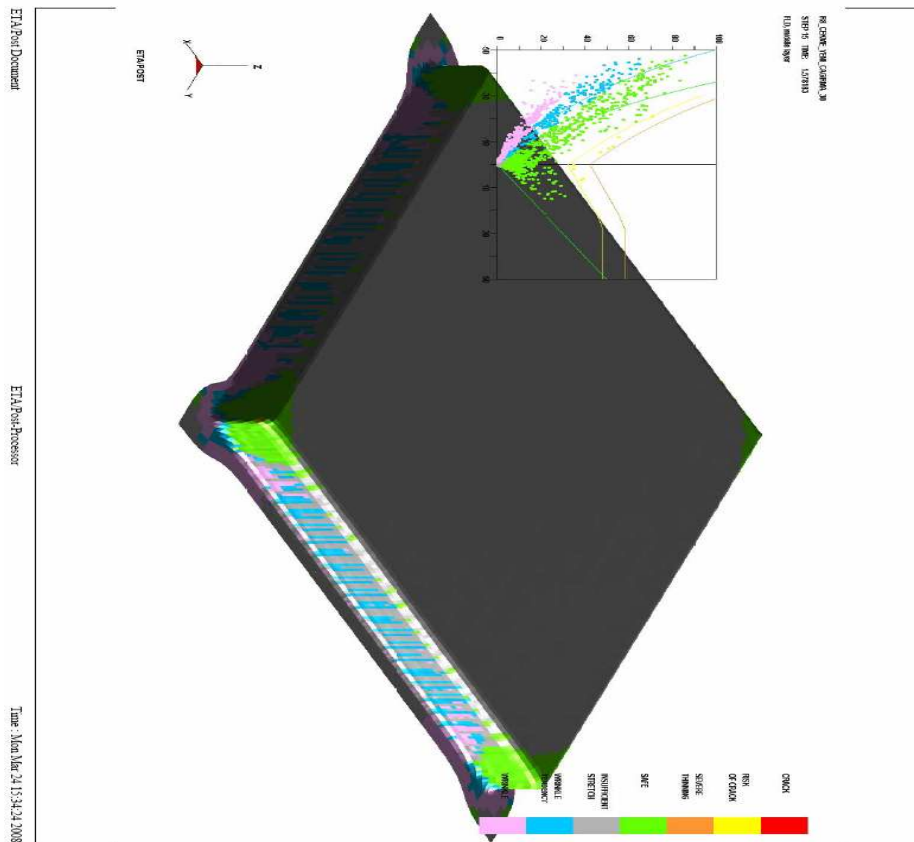
Şekil 5.32. 43,4 mm'deki kalınlık değişim sonuçları

Şekil 5.32 43,4 mm ürün yüksekliği için en fazla incelmenin 4 nolu noktada olduğunu göstermektedir. 4 nolu nokta iki yönlü çekme ve bükme zorlanmasının etkisindeki ıstampa köşe radyüsü alt bölgesidir. En büyük kalınlık azalması değeri 0,129mm'dir.

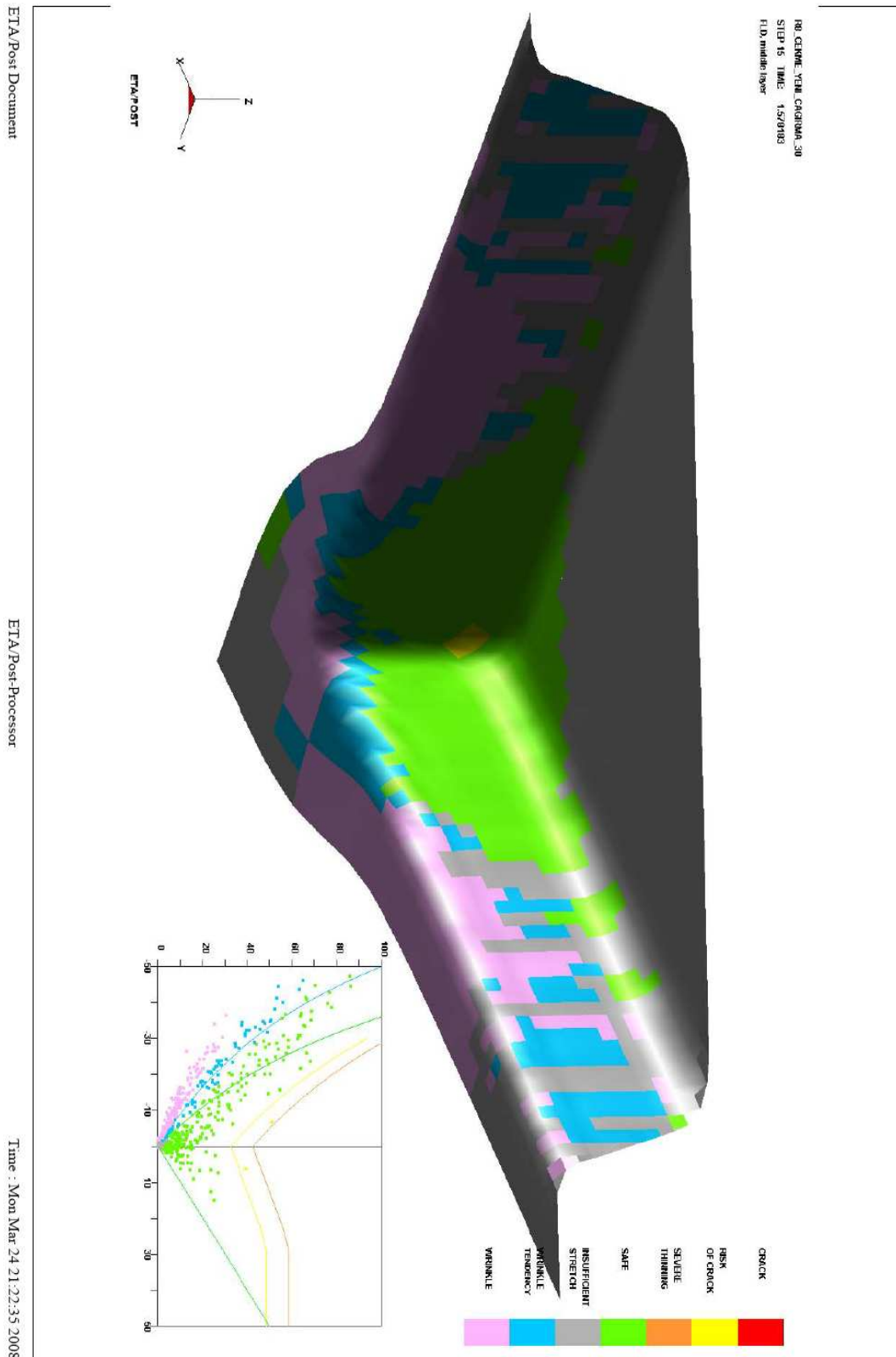
5.2.8. Hız = 30 mm/s ve radyüs = 8 mm'deki kalınlık değişimi ve hasar sonuçları

Hız=30 mm/s ve radyüs=8mm için önce hasar durumu ve sonrada kalınlık değişimleri yüksekliğe bağlı olarak Şekil 5.33, Şekil 5.34, Şekil 5.35, Şekil 5.36, Şekil 5.37 ve Şekil 5.38'deki gibidir.

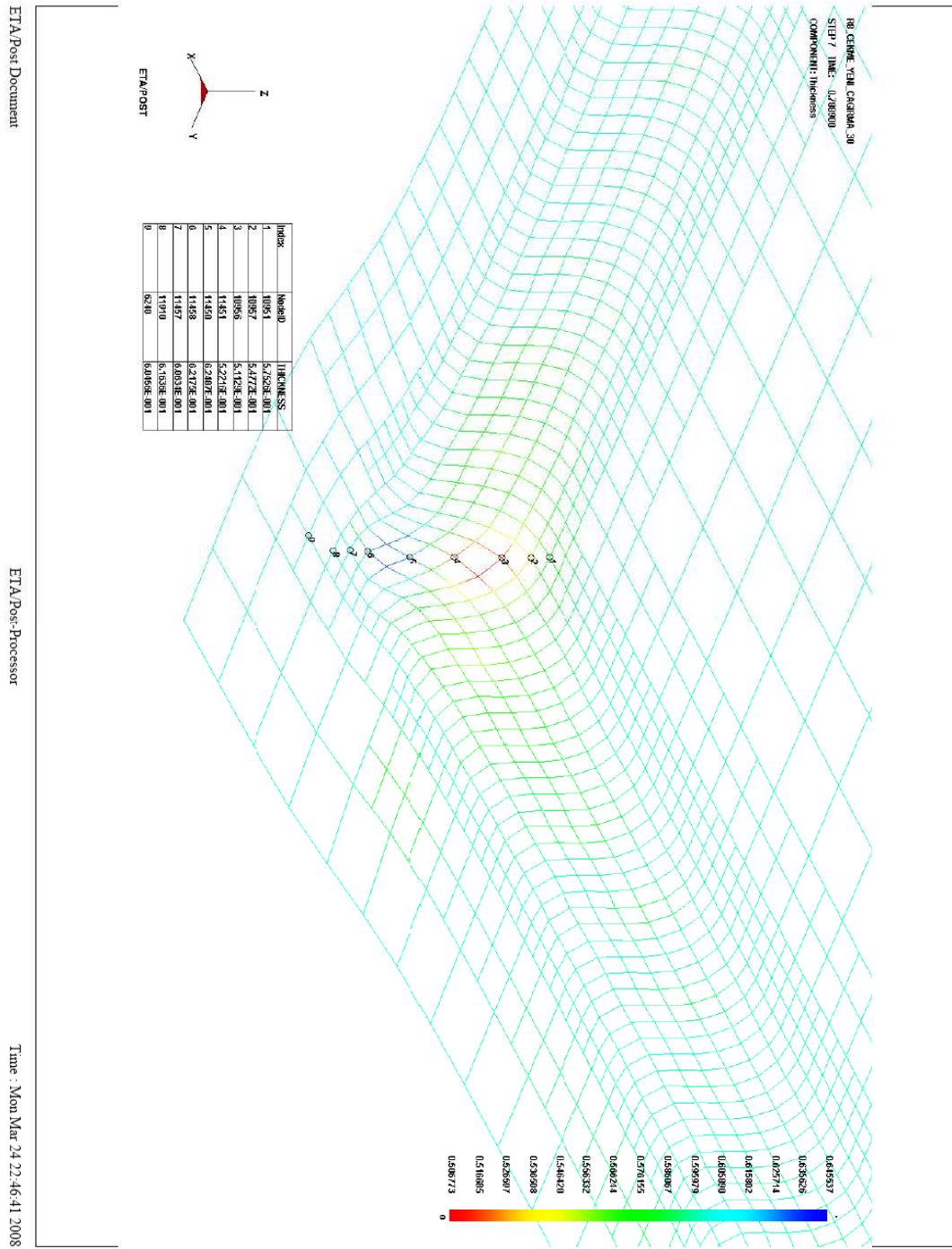
Şekil 5.33–5.34'de bu şartlar altında planlanan en büyük derin çekme yüksekliği olan 43,4mm'de hasarın olmadığı simülasyon sonuçlarında görülmektedir. 18,6 mm, 31 mm, 37,2 mm ve 43,4 mm yüksekliğindeki kalınlık değişimleri sırasıyla Şekil 5.35, Şekil 5.36, Şekil 5.37 ve Şekil 5.38'de verilmiştir.



Şekil 5.33. Hız = 30 mm/s ve radyüs = 8 mm'deki hasar durumu sonuçları (h = 43,4 mm)

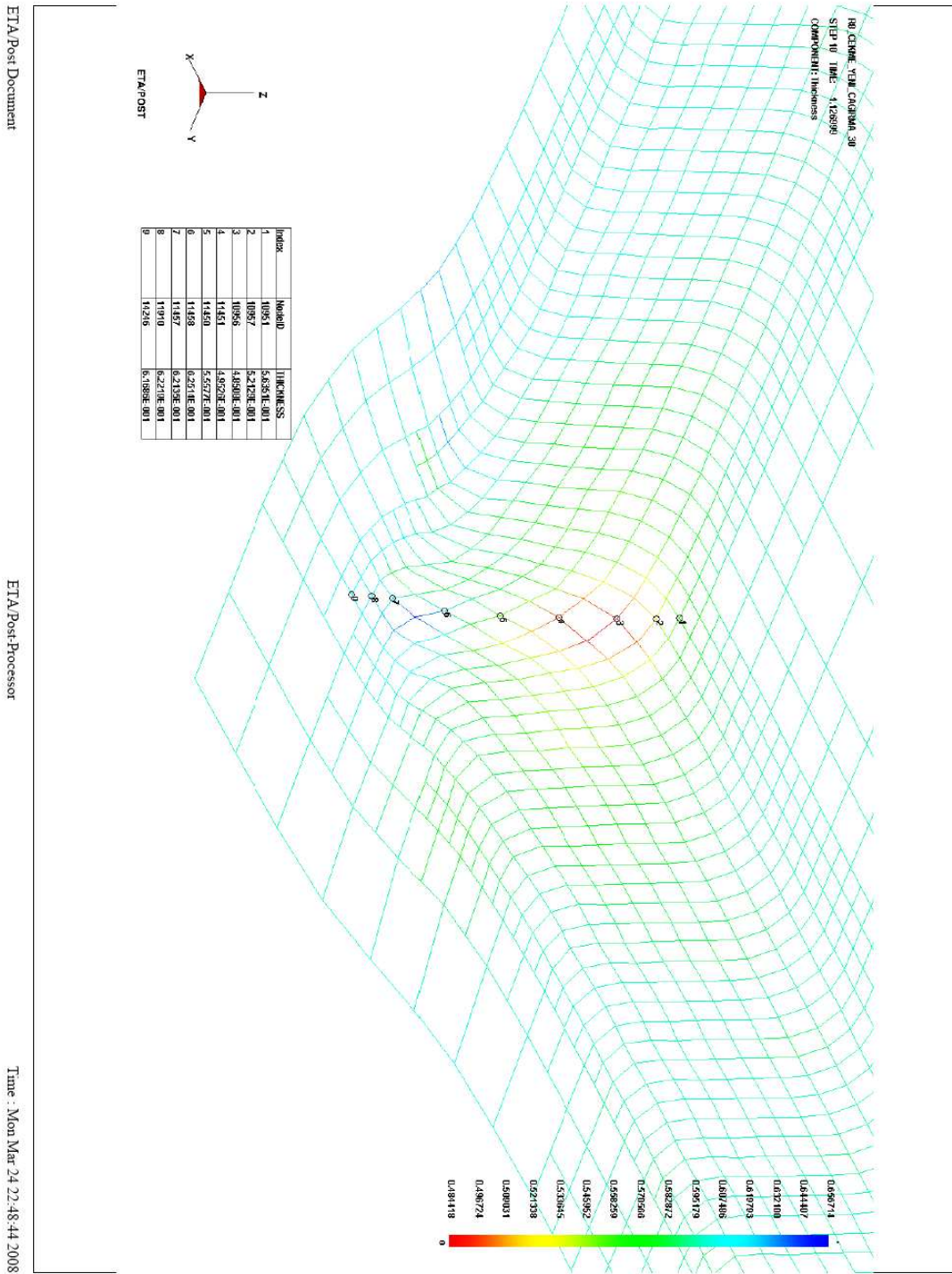


Şekil 5.34. Hız = 30 mm/s ve radyüs = 8 mm'de hasar yoktur.



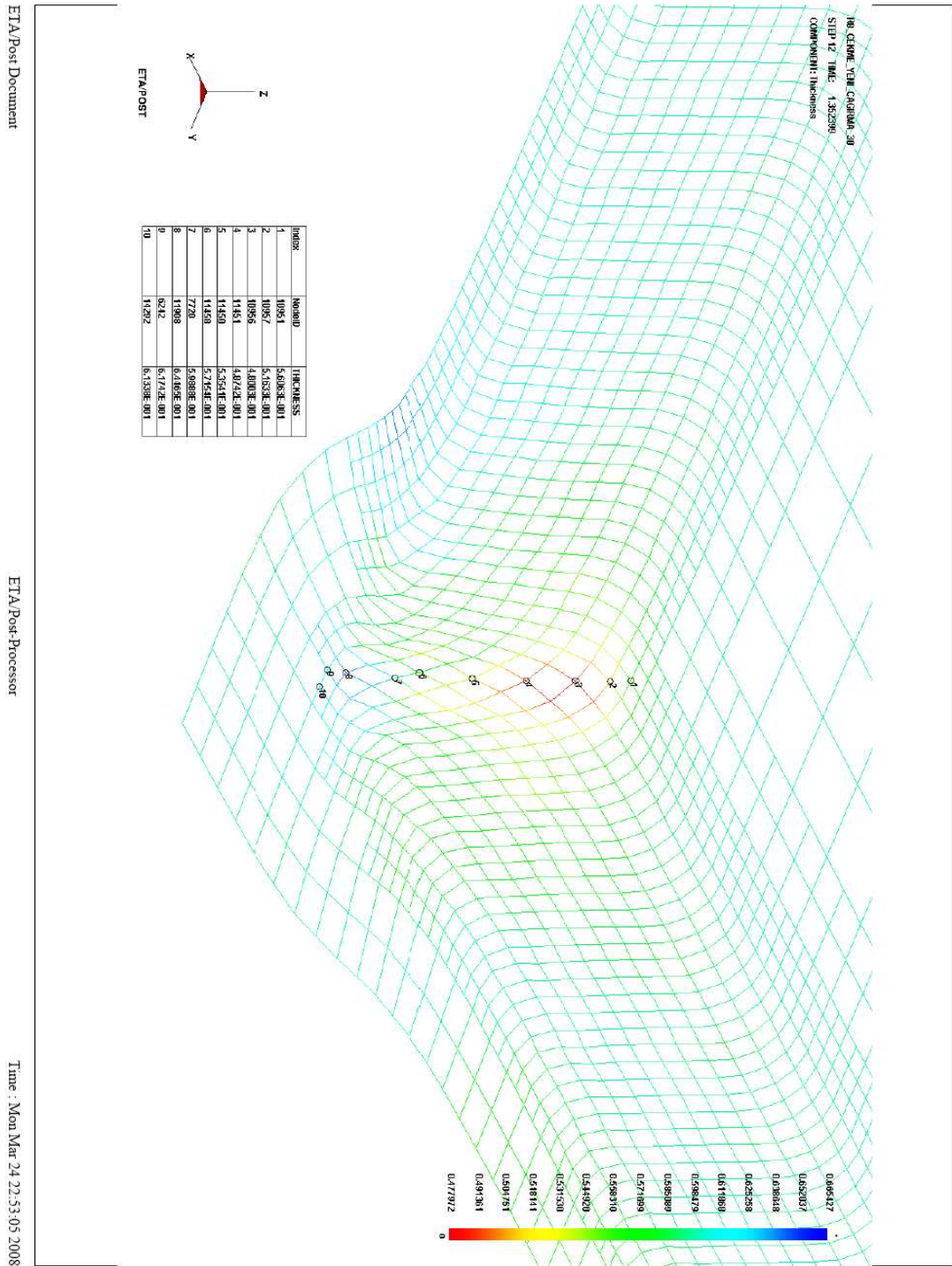
Şekil 5.35. 18,6 mm'deki kalınlık değişimi sonuçları

Şekil 5.35 18,6 mm ürün yüksekliği için en fazla incelmenin 3 nolu noktada olduğunu göstermektedir. 3 nolu nokta iki yönlü çekme ve bükme zorlanmasının etkisindeki ıstampa köşe radyüs bölgesidir. En büyük kalınlık azalması değeri 0,089mm'dir.



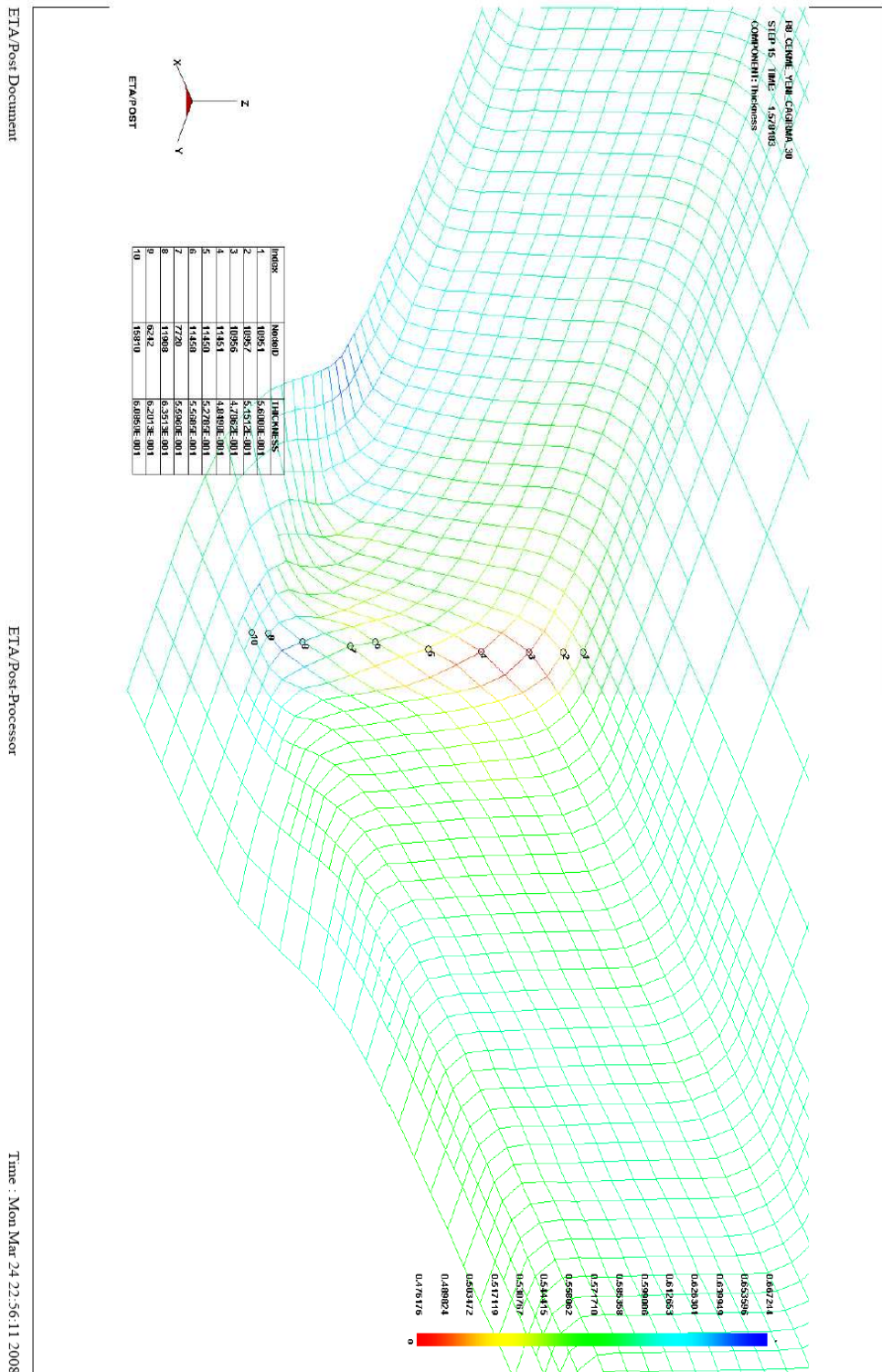
Şekil 5.36. 31 mm'deki kalınlık değişimi sonuçları

Şekil 5.36'dan en fazla incelmenin 3 nolu noktada olduğunu görülmektedir. 3 nolu nokta iki yönlü çekme ve bükme zorlanmasının etkisindeki köşe radyüs bölgesidir. En büyük kalınlık azalması değeri 0,115mm'dir.



Şekil 5.37. 37,6 mm'deki kalınlık değişimi sonuçları

Şekil 5.37 en fazla incelmenin 3 nolu noktada olduğunu göstermekte ve en büyük kalınlık azalması değeri 0,120mm'dir.



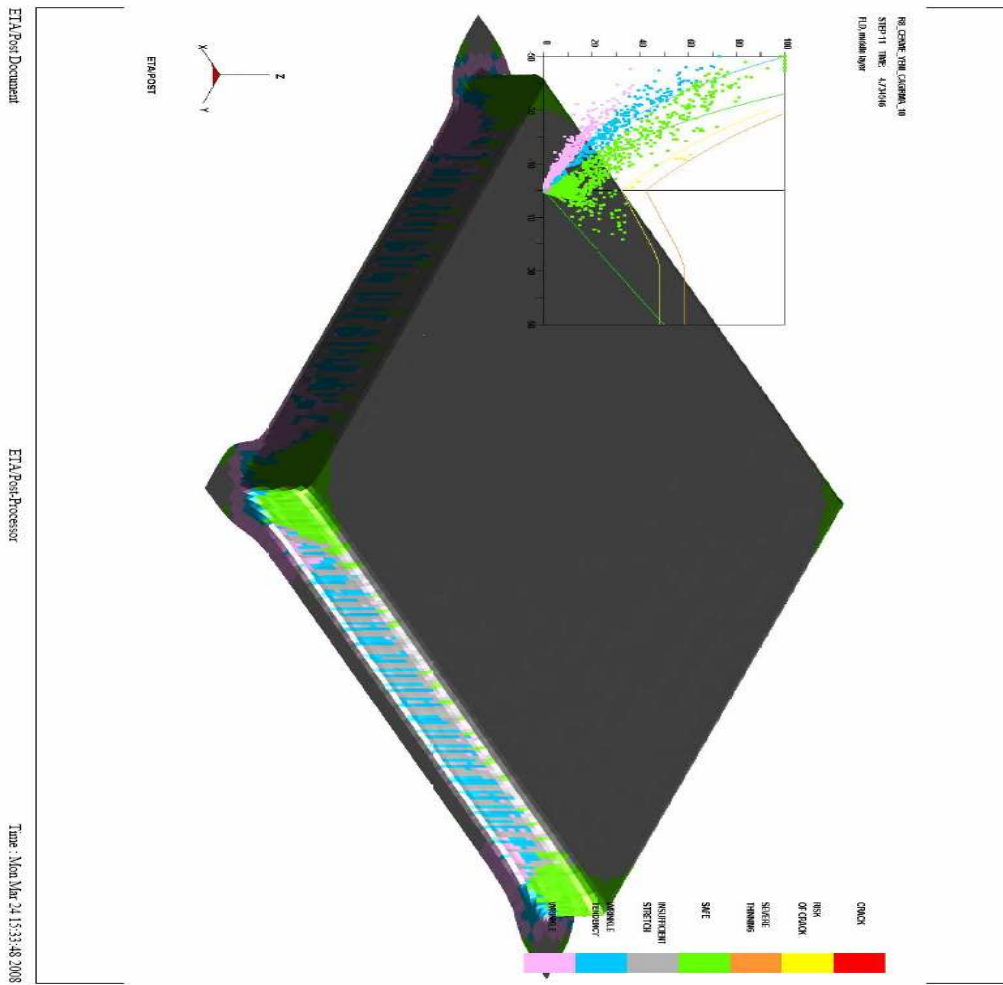
Şekil 5.38. 43,4 mm'deki kalınlık değişimi sonuçları

Şekil 5.38 en fazla incelmenin 3 nolu noktada olduğunu göstermekte ve en büyük kalınlık azalması değeri 0,121mm'dir.

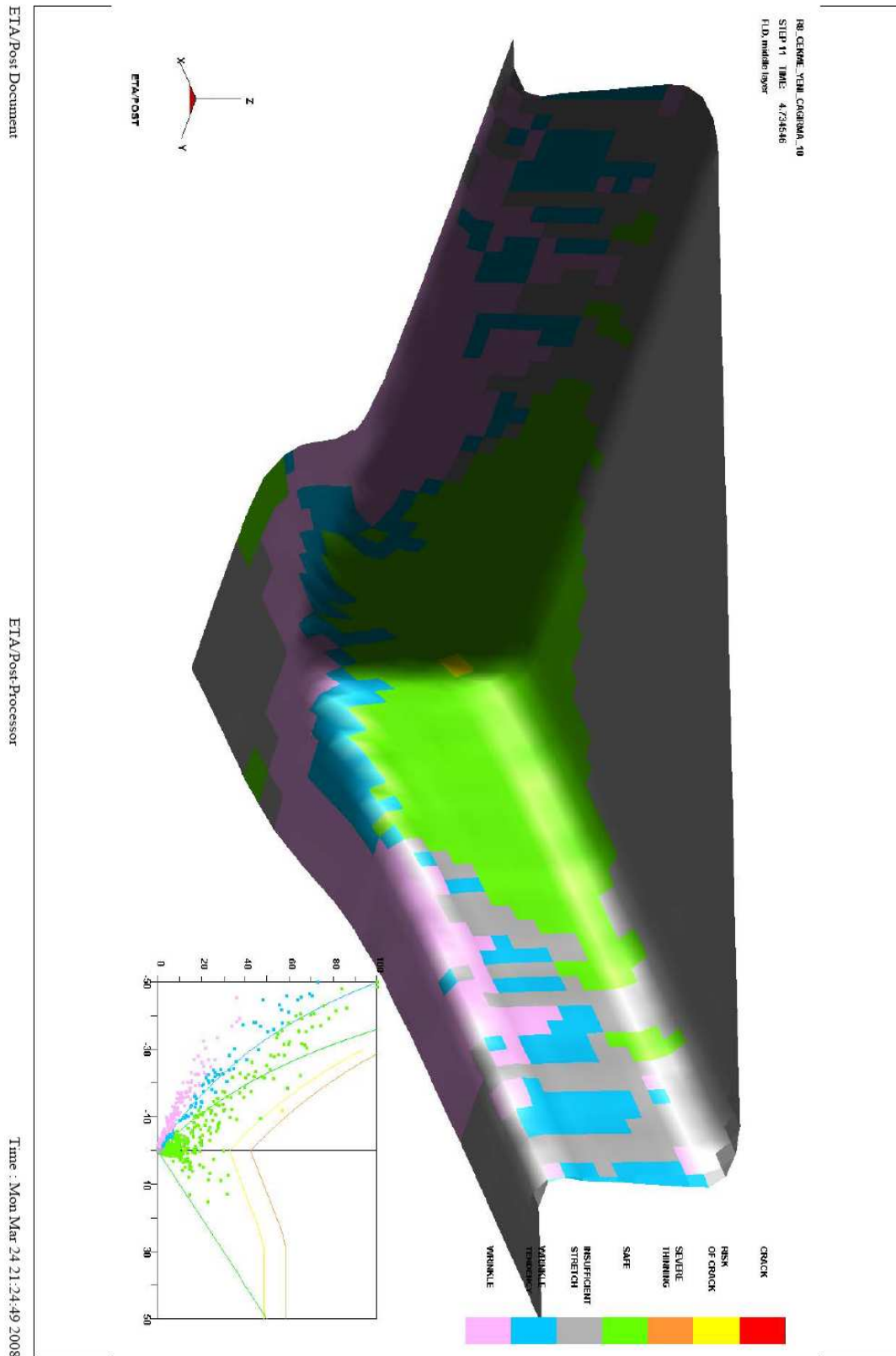
5.2.9. Hız = 10 mm/s ve radyüs = 8 mm'deki kalınlık değişimi sonuçları ve hasar sonuçları

Hız=10 mm/s ve radyüs=8mm için önce hasar durumu ve sonrada kalınlık değişimleri yüksekliğe bağlı olarak Şekil 5.39, Şekil 5.40, Şekil 5.41, Şekil 5.42ve Şekil 5.43'deki gibidir.

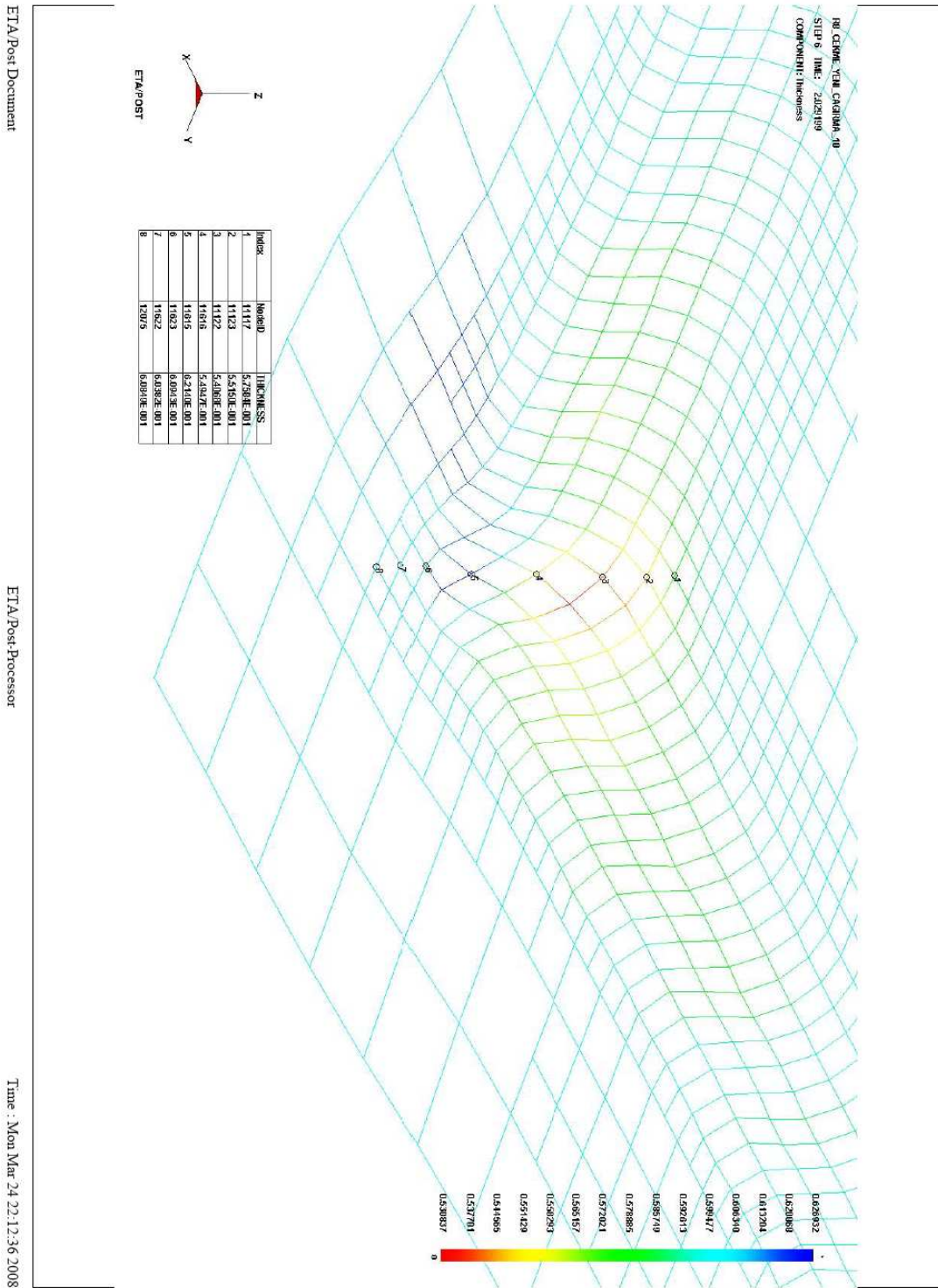
Şekil 5.39–5.40 bu Şartlar altında planlanan en büyük derin çekme yüksekliği olan 43,4 mm'de hasarın olmadığı simülasyon sonuçlarında görülmektedir. 18,6 mm, 37,2 mm ve 43,4 mm yüksekliğindeki kalınlık değişimleri sırasıyla Şekil 5.41, Şekil 5.42 ve Şekil 5.43'de verilmiştir.



Şekil 5.39. Hız = 10 mm/s ve radyüs = 8 mm'deki hasar durumu (h = 43,4 mm)

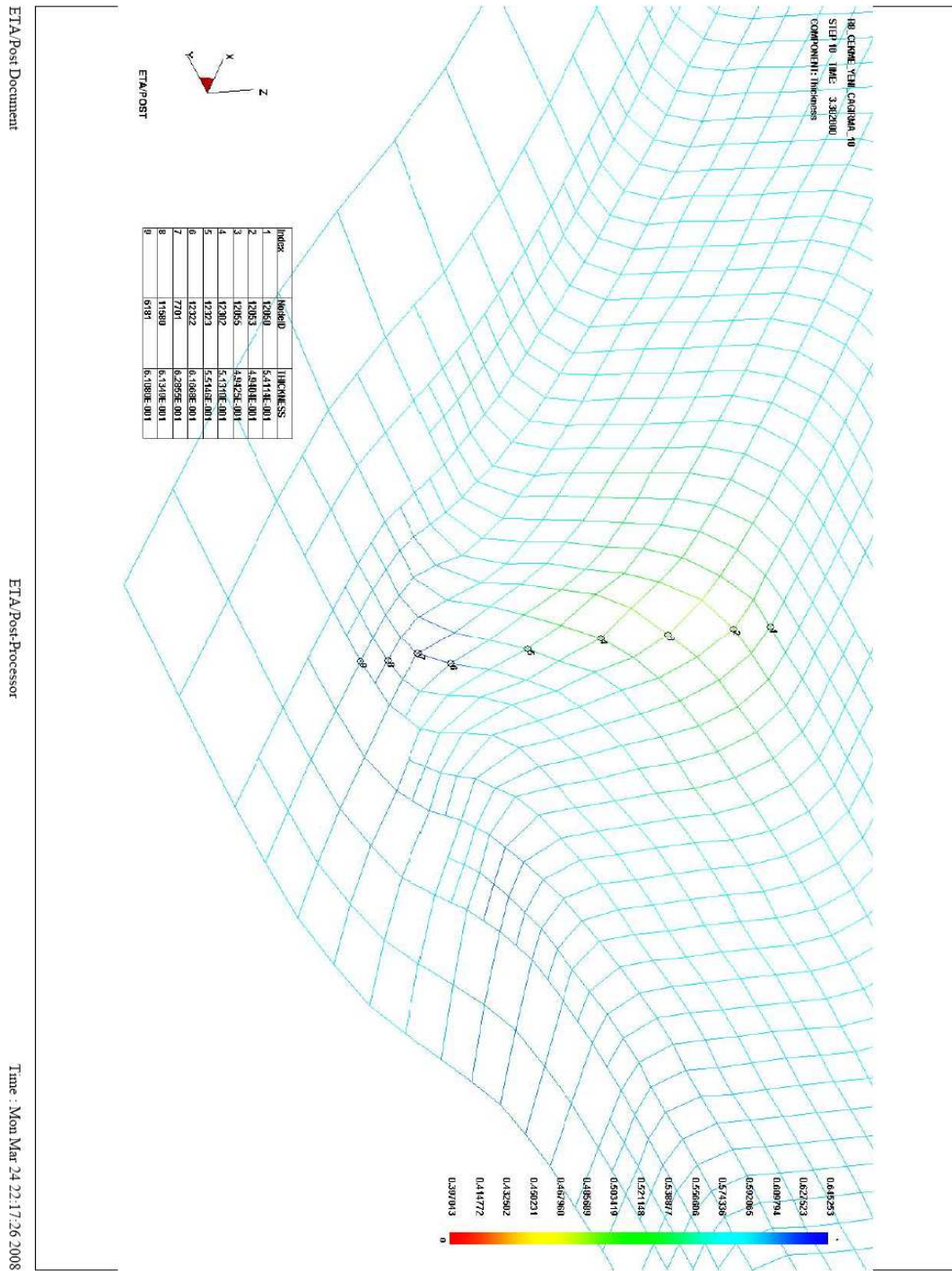


Şekil 5.40. Hız = 10 mm/s ve radyüs = 8 mm'de hasar yoktur.



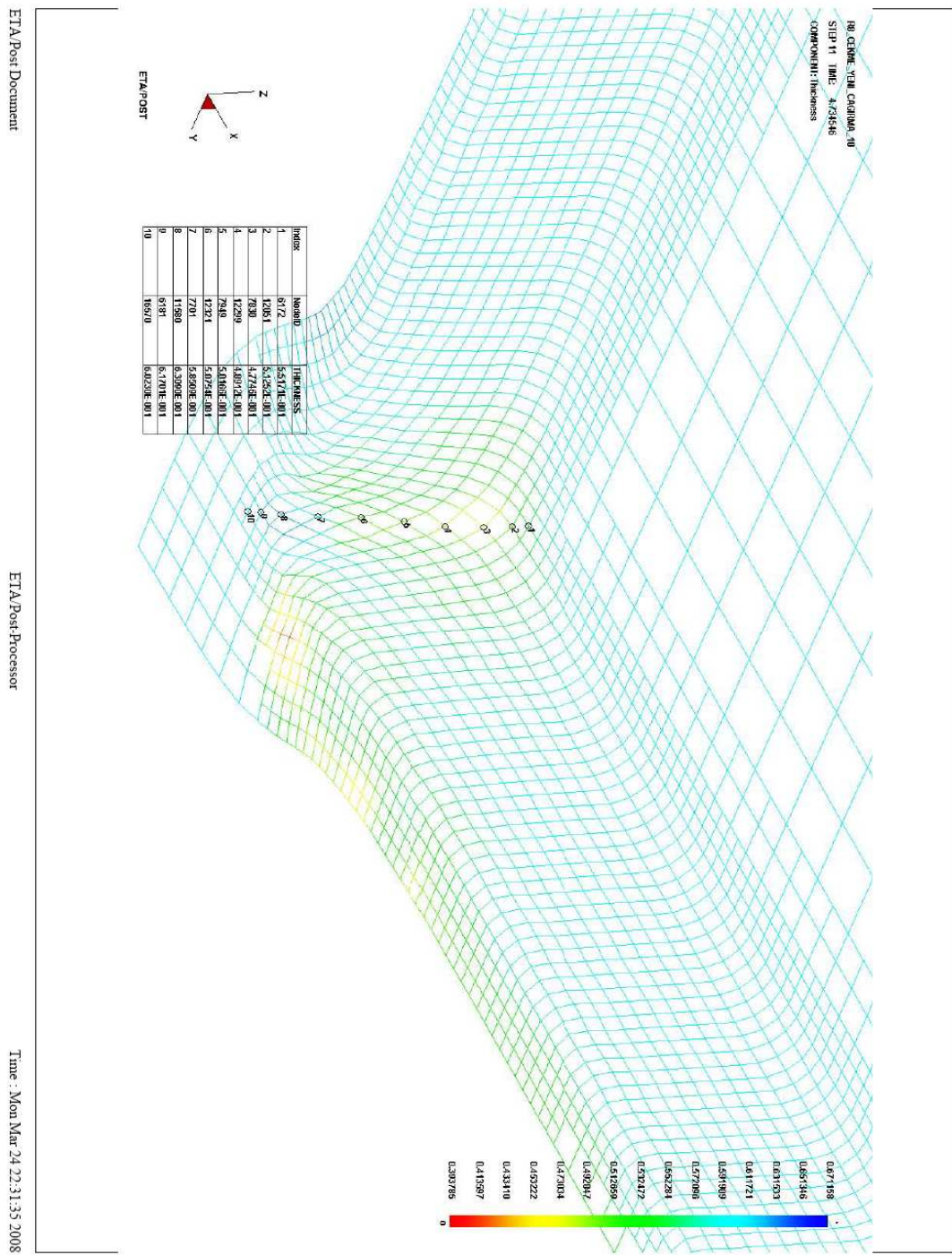
Şekil 5.41. 18,6 mm'deki kalınlıkdeğişimi sonuçları

Şekil 5.36'dan en fazla incelmenin 3 nolu noktada olduğunu göstermekte ve en büyük kalınlık azalması değeri 0,059mm'dir.



Şekil 5.42. 37,2 mm'deki kalınlık değişimi sonuçları

Şekil 5.42 37,2 mm ürün yüksekliği için en fazla incelmenin 2 ve 3 nolu noktalarda olduğunu göstermekte ve en büyük kalınlık azalması değeri 0,106mm'dir.



Şekil 5.43. 43,4 mm'deki kalınlık değişimi sonuçları

Şekil 5.43 en fazla incelmenin 3 noktada olduğunu göstermektedir. 3 ve 4 nolu noktalar iki yönlü çekme ve bükme zorlanmasının etkisindeki köşe radyüs bölgesidir. En büyük kalınlık azalması değeri 0,123mm'dir.

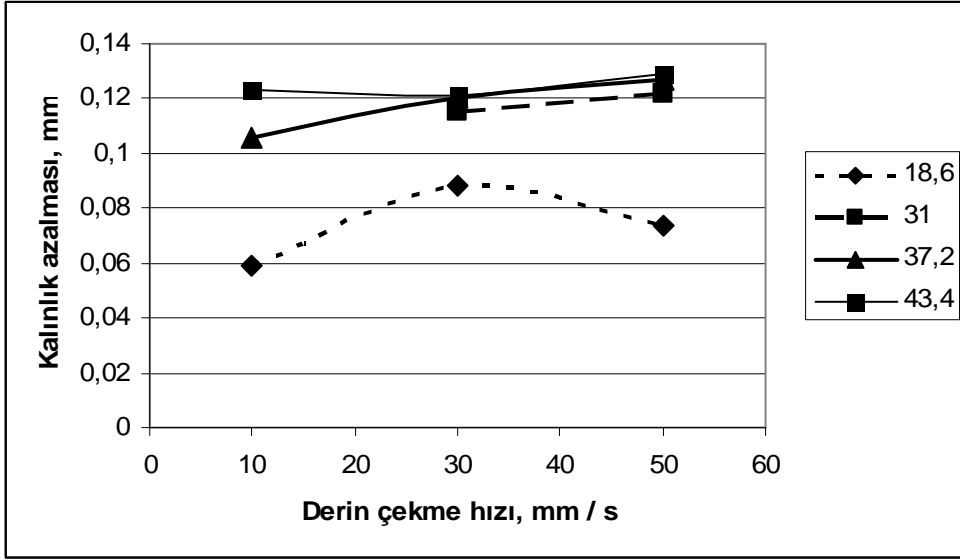
8 mm ıstampa radyüs değeri için 10–30–50 mm/s derin çekme hızları simülasyon sonuçlarından elde edilen en büyük kalınlık azalması değeri Tablo 5.4’de sunulmuştur.

Tablo 5.4 8 mm ıstampa radyüsü - 10–30–50 mm/s derin çekme hızları ve farklı ürün yüksekliği için en büyük kalınlık azalması değeri sonuçları

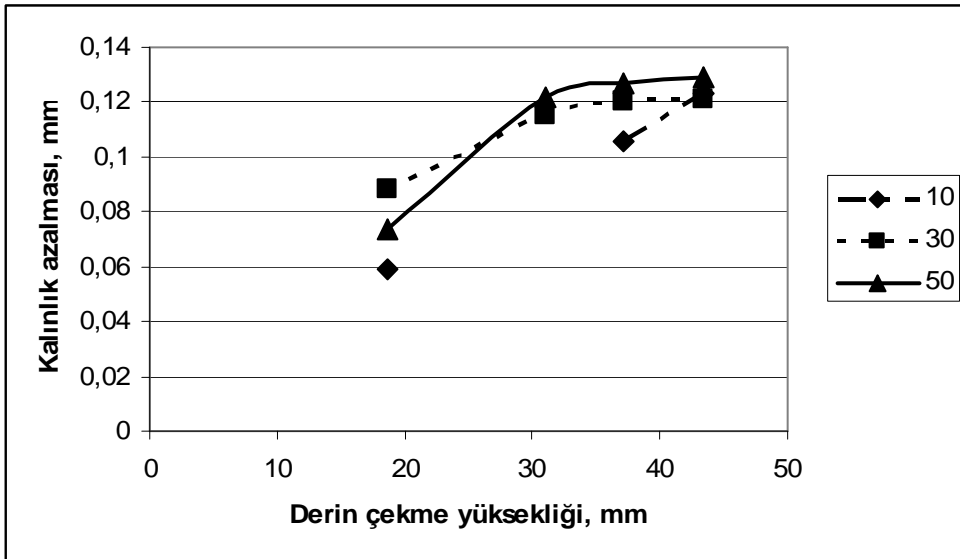
Derin çekme hızı (mm/s)	Derin çekme yüksekliği (mm)	En büyük kalınlık azalması (mm)
50	18,6	0,074
	31	0,122
	37,2	0,127
	43,4	0,129
30	18,6	0,089
	31	0,115
	37,2	0,120
	43,4	0,121
10	18,6	0,059
	37,2	0,108
	43,4	0,123

Tablo 5.4’deki değeri ile araştırmada kullanılan ERD 1314 kalite galvenize kaplanmış çelik sac için derin çekme hızının en büyük kalınlık azalmasına etkisi Şekil 5.44’de, derin çekme yüksekliğinin en büyük kalınlık azalması değişimine etkisi Şekil 5.45’de verilmiştir.

Şekil 5.44 derin çekme hızı artışı ile kalınlıktaki incelme miktarlarının arttığını göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, derin çekme hızı artışı ile ıstampa radyüs bölgesinde ürünün sac kalınlığı doğrultusunda daha fazla şekil değişimine zorlandığını göstermektedir. Şekil 5.45 derin çekme yüksekliği artışı ile inceleme koşulları için ürün yüksekliği değeri artışı süresince kalınlık azalması değişiminin 31 mm ürün yüksekliğine kadar doğrusal kabul edilebilecek şekilde artarak değiştiğini 31 mm’den daha büyük değerlerde kalınlık azalması değişim miktarlarının küçülen değerlerde olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.44 Derin çekme hızının en büyük kalınlık azalmasına etkisi



Şekil 5.45 Derin çekme yüksekliği en büyük kalınlık azalması değişimi

Çalışmada en büyük ürün yüksekliği olarak 43,4 mm planlanması nedeniyle derin çekme hızı 10-30-50 mm / s için hasar oluşmamış ve en büyük hasarsız ürün yükseklik değeri elde edilememiştir.

8 mm kalıp ıstampa radyüsü koşullarında elde edilen sonuçlardan ERD 1314 kalite galvanize kaplanmış çelik sac için en büyük kalınlık azalması miktarının (Δh_{\max}) derin çekme hızı (v) ile 10 – 50 mm / s derin çekme hızı aralığında değişimi:

$$\Delta h_{\max} = 0,0005 \cdot v + 0,1019 \text{ (37,2 mm için)}$$

eşitliği şeklindedir. Bu eşitlikte, birimler Δh_{\max} (mm) ve v (mm / s) dir.

5.2.10. İstampa radyüsü, derin çekme hızı ve derin çekme yüksekliği hasar durumu sonuçları

Tablo 5.5'te ERD 1314 kalite sac için derin çekme işleminde kalıp tasarımı için ıstampa radyüsü, derin çekme hızı ve derin çekme yüksekliği hasar durumu sonuçları verilmiştir.

5.3. Tartışma

Tablo 5.2-5.4' deki değerler ve Şekil 5.9-5.10, Şekil 5.24-5.26, Şekil 5.44-5.45'deki grafikler ile derin çekme hızlarının kalınlık değişimi değerlerine ve hasarsız imal edilebilecek ürün yükseklik değerlerine etkileri değerlendirilmiştir. Aynı tablolar ve şekiller ile kalıp ıstampa radyüsüne bağlı olarak kalınlık değişimi değerlerine ve hasarsız imal edilebilecek ürün yükseklik değerlerine etkileri değerlendirilmiştir.

0,6 mm kalınlığında ERD 1314 galvanize kaplı çeliğe uygulanan dikdörtgen kap şeklindeki ürün için DYNAFORM sonlu elemanlar metodu simülasyon çalışmaları, en büyük kalınlık değeri azalmalarının ıstampa köşe radyüsü bölgelerinde oluştuğunu ve bunun sonucunda da doğal olarak hasarın bu bölgede gerçekleştiğini göstermiştir. Elde edilen bu sonuçlar, iki yönlü çekme ve bükme zorlanmasının etkisindeki bu bölgenin diğer bölgelerden daha fazla zorlanan bölge olması nedeniyle normal sonuçlardır ve literatürle benzer bir sonuçtur [11].

Tablo 5.5 Istampaya radyüsü, derin çekme hızı ve derin çekme yüksekliği hasar durumu sonuçları

RADYUS (mm)	ÇEKME HIZI (mm/s)	YÜKSEKLİK (mm)	HASAR
4	50	18,6	YOK
		31	VAR
		37,2	VAR
		43,4	VAR
	30	18,6	YOK
		31	VAR
		37,2	VAR
		43,4	VAR
	10	18,6	YOK
		31	VAR
		37,2	VAR
		43,4	VAR
6	50	18,6	YOK
		31	VAR
		37,2	VAR
		43,4	VAR
	30	18,6	YOK
		31	YOK
		37,2	VAR
		43,4	VAR
	10	18,6	YOK
		31	YOK
		37,2	YOK
		43,4	YOK
8	50	18,6	YOK
		31	YOK
		37,2	YOK
		43,4	YOK
	30	18,6	YOK
		31	YOK
		37,2	YOK
		43,4	YOK
	10	18,6	YOK
		31	YOK
		37,2	YOK
		43,4	YOK

Araştırmada incelenen 4 mm, 6 mm ve 8 mm ıstampa radyüsü koşullarının her birinden elde edilen sonuçlardan, derin çekme hızı değerleri ile en büyük kalınlık azalması değerleri arasında doğrusal kabul edilebilecek bir ilişkinin var olduğunu göstermektedir. Doğrusallık, derin çekme hızı değerleri artışı ile en büyük kalınlık azalması değerleri artışı şeklindedir. Derin çekme hızı artışı ile kalınlık azalması değerlerindeki azalış literatürle benzerlik göstermektedir [8,26]. Benzerlik ıstampa radyüsü bölgesinde çekme hızı artışı ile kalınlığın büyük miktarlarda azalması ve hasarın bu bölgede gerçekleşmesi şeklindedir. Hız ile kalınlık azalması ilişkisi için aşağıdaki eşitlik verilebilir:

$$\Delta h_{\max} = A \cdot v + B$$

Bu eşitlikte, Δh_{\max} en büyük kalınlık azalmasını (mm), v derin çekme hızını (mm/s), A ve B sabitleri ifade eder. İncelenen parametreler dahilinde A değerleri 0,0004-0,001 arası değerler, B değerleri 0,0618-0,1040 arası değerlerdir.

4 mm, 6 mm ve 8 mm ıstampa radyüsü koşullarının her birinden elde edilen sonuçlardan, derin çekme hızı değerleri ile hasarsız üretilebilecek ürün yükseklik değerleri arasında da doğrusal kabul edilebilecek bir ilişkinin var olduğunu söylenebilir. Doğrusallık, derin çekme hızı değerleri artışı ile hasarsız üretilebilecek ürün yükseklik değerleri azalışı şeklindedir. Bu ilişki için aşağıdaki eşitlikler verilebilir:

4 mm ıstampa radyüsü koşulları için;

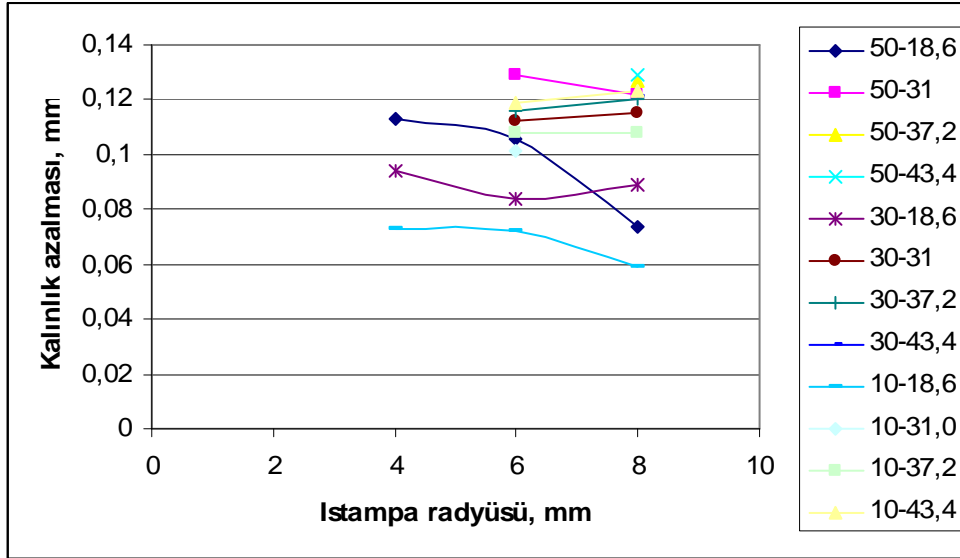
$$H = (- 0,15) \cdot v + 25,5$$

6 mm ıstampa radyüsü koşulları için;

$$H = (- 0,35) \cdot v + 47,5$$

Bu eşitliklerde, H hasarsız üretilebilecek ürün yükseklik değerleri (mm), v derin çekme hızı (mm/s) değeridir.

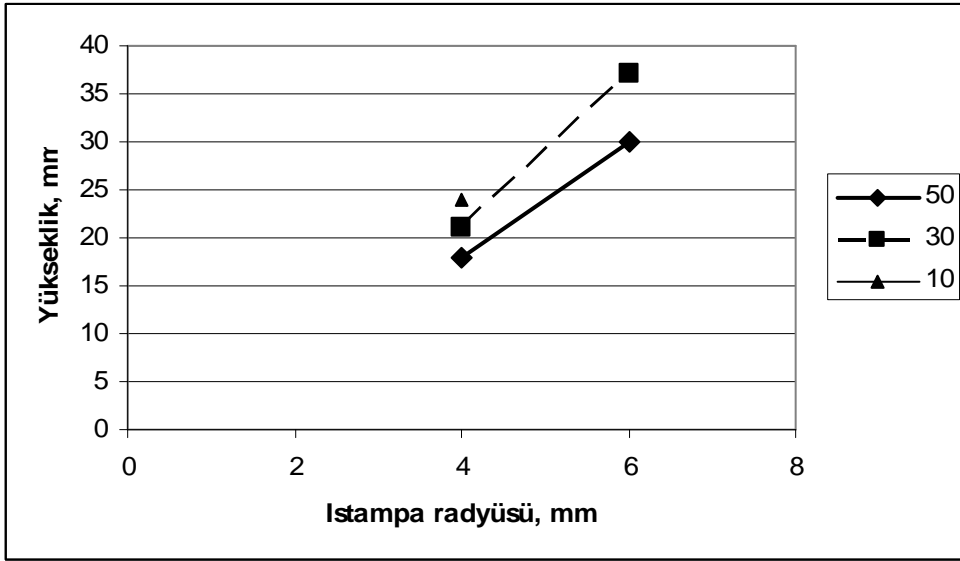
Kalıp ıstampa radyüsü değerleri ile en büyük kalınlık azalması değerleri arasındaki ilişki ise Şekil 5.46 daki gibidir.



Şekil 5.46 Istampa radyüsü – kalınlık azalması ilişkisi

Şekil 5.46 kalınlık azalması değerlerinin ıstampa radyüsü değerlerindeki değişimden belirgin bir Şekilde etkilenmediği sonucunu göstermektedir. Bununla beraber, 18,6 mm ürün yüksekliğindeki değerler ıstampa radyüsü değerleri artışı ile kalınlık azalması değerlerinin azaldığını göstermektedir. Bu sonuçlar, ıstampa radyüsü değerlerinin (4–8 mm arası) kalınlık azalması değerlerine etkisinin yok sayılabilecek değerler Şeklinde olduğunu göstermektedir.

Istampa radyüsünün hasarsız elde edilebilecek ürün yüksekliğine etkisi Şekil 5.47 deki gibidir. 43,4 mm ürün yüksekliğine kadar planlanan araştırma sonuçları, ıstampa radyüsü değerleri artışı ile hasarsız elde edilebilecek ürün yükseklik değerlerinin arttığını göstermektedir.



Şekil

5.47 Istampa radyüsü – hasarsız ürün yüksekliği ilişkisi

Sonuç olarak, bu çalışma göstermiştir ki; araştırmada incelenen malzeme ve derin çekme parametreleri ile ıstampa radyüsü değerleri artırılarak derin çekme yöntemiyle imal edilecek ürünlerden daha büyük hasarsız ürün yükseklik değerlerine sahip ürünler elde edilebilecektir. Bununla beraber, derin çekme hızı azaltılarakta derin çekme yöntemiyle imal edilecek ürünlerden daha büyük hasarsız ürün yükseklik değerlerine sahip ürünler elde edilebilecektir. Küçük ıstampa radyüsü değerlerinde derin çekme hızının hasarsız ürün yükseklik değerlerine etkisi daha azdır.

BÖLÜM 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

0,6 mm kalınlıktaki ERD 1314 (DIN EN 10327) kalite galvanize kaplanmış çelik sac'dan 478 x 578 mm ölçülerinde dikdörtgen derin çekme ürünü için Tablo 4.2 de verilen değerler koşullarında 4 mm, 6mm ve 8 mm ıstampa radyüsü değişkenleri ve 10 mm/s, 30 mm/s ve 50 mm/s derin çekme hızı değişkenleri inceleme parametreleri ile DYNAFORM sonlu elemanlar metodu simülasyon çalışmalarından:

1. Derin çekme hızı azaltılarak derin çekme yöntemiyle imal edilecek ürünlerden daha büyük hasarsız ürün yükseklik değerlerine sahip ürünler elde edilebileceği,
2. Istampa radyüsü değerleri artırılarak derin çekme yöntemiyle imal edilecek ürünlerden daha büyük hasarsız ürün yükseklik değerlerine sahip ürünler elde edilebileceği,
3. Küçük ıstampa radyüsü değerlerinde derin çekme hızının hasarsız ürün yükseklik değerlerine etkisi daha az olduğu, ıstampa radyüsü değeri artışı ile derin çekme hızı azalışının hasarsız ürün yükseklik değerlerinin artış miktarında daha etkili olduğu,
4. Kalınlık azalması değerlerinin ıstampa radyüsü değerlerindeki değişimden belirgin bir şekilde etkilenmediği,
5. Derin çekme hızı değerleri ile en büyük kalınlık azalması değerleri arasında doğrusal kabul edilebilecek bir ilişkinin var olduğunu ve doğrusallığın derin

çekme hızı değerleri artışı ile en büyük kalınlık azalması değerleri artışı şeklinde olduğu,

6. 4 mm ıstampa radyüsü ile 10 mm/s derin çekme hızı kullanılarak 24 mm hasarsız ürün yükseklik değerlerinin, 30 mm/s derin çekme hızı kullanılarak 21 mm hasarsız ürün yükseklik değerlerinin, 50 mm/s derin çekme hızı kullanılarak 18 mm hasarsız ürün yükseklik değerlerinin elde edilebileceğini,
7. 6 mm ıstampa radyüsü ile 10 mm/s derin çekme hızı kullanılarak 43,4 mm bir ürünün hasarsız, 30 mm/s derin çekme hızı kullanılarak 37 mm hasarsız ürün yükseklik değerlerinin, 50 mm/s derin çekme hızı kullanılarak 30 mm hasarsız ürün yükseklik değerlerinin elde edilebileceğini,
8. 8 mm ıstampa radyüsü ile 10 mm/s - 30 mm/s - 50 mm/s derin çekme hızı değerleri kullanılarak 43,4 mm ürün yükseklik değerlerinin hasarsız elde edilebileceğini,

sonuçları elde edilmiştir.

6.2. Öneriler

Farklı iş parçası boyutları ve bu boyutların her biri için ıstampa radyüsü ara değerleri ile derin çekme ara değerleri de kullanılarak deneylerin her durumda hasara kadar sürdürülerek, derin çekme hızı ve ıstampa radyüsü parametreleri değerleri ile hasarsız elde edilebilecek ürün yükseklik değerlerinin belirlenmesi sektör için yararlı olacaktır. Bu amaçla yeni çalışmalar önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] GÜNEŞ T. , Pres İşleri Tekniği, Bölüm II ,TMMOB Makine Mühendisleri Odası Yayınları,Yayın No:130 , Ankara, 1990
- [2] KIRLI O, Derin Çekme İle Soğuk Şekillendirmenin Sonlu Elemanlar Metodu Yardımıyla Non-Linear Analizi, Yüksek Lisans Tezi , Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Üniversitesi, 2003
- [3] MAMALIS A.G.,MANALOKAS D.E.,BALDOUKAS A.K.,Simulation of sheet metal forming using explicit finite-element techniques: effect of material and forming cahacteristics Part 1. Deep drawing of cylindrical cups, Journals of Materials Processing Technology, 72 , 48-60 , 1997
- [4] MAMALIS A.G. ,MANALOKAS D.E. ,BALDOUKAS A.K. ,Simulation of sheet metal forming using explicit finite-element techniques: effect of material and forming cahacteristics Part 2. Deep drawing of square cups, Journals of Materials Processing Technology, 72,110-116 , 1997
- [5] GARCIA C. , CELENTANO D. , FLORES F. , PONTHOT J.P. , Numerical modelling and experimental validation of steel deep drawing processes Part I Material characterization, Journals of Materials Processing Technology, 172 , 451-460 , 2006
- [6] GANTAR G. , KUZMAN K. , FILIPIC B. , Increasing the stability of the deep drawing process by simulation-based optimization, Journals of Materials Processing Technology, 164-165 , 1343-1350 , 2005
- [7] SATTARI H. , SEDAGHATI R. , GANESAN R. , Analysis and design optimization of deep drawing process Part II Optimization, Journals of Materials Processing Technology, 184 , 84-92 , 2007
- [8] JUNG D.W. , Study of Dynamic Explicit Analysis in Sheet Metal Forming Processes Using Faster Punch Velocity and Mass Scaling Scheme, Journals of Materials Engineering and Performance, 7 , 479-490 , 1998
- [9] HAN S.S., The Influence of tool geometry on friction Behavior in sheet metal forming, Journals of Materials Processing Technology,63,129-133, 1997

- [10] JAISINGH A. , NARASIMHAN K. , DATE P.P. , MAITI S.K. , SINGH U.P. , Sensitivity of a deep drawing process for miniaturized products, Journals of Materials Processing Technology, 147 , 321-327 , 2004
- [11] GANTAR G. , KUZMAN K. , Sensitivity and stability evaluation of the deep drawing process, Journals of Materials Processing Technology, 125-126 , 302-308 , 2002
- [12] BROWNE M.T. , HILLERY M.T. , Optimising the variables when deep-drawing C.R.1 cups, Journals of Materials Processing Technology, 136 , 64-71 , 2003
- [13] GHOUATI O. , GELIN J.C. Identification of material parameters directly from metal forming processes, Journals of Materials Processing Technology, 80-81 , 560-564, 1998
- [14] GARCIA C. , CELENTANO D. , FLORES F. , PONTHOT J.P. , OLIVIA O. , Numerical modelling and experimental validation of steel deep drawing processes Part II Applications, Journals of Materials Processing Technology, 172 , 461-471 , 2006
- [15] COLGAN M. , MONOGHAN J. , Deep drawing process: analysis and experiment, Journals of Materials Processing Technology, 132 , 35-41 , 2003
- [16] DUCHENE L. , HABRAKEN A.M. , Analysis of sensitivity of FEM predictions to numerical parameters in deep drawing simulations, European Journal of Mechanics A/Solids, 24 , 614-629 , 2005
- [17] ALICI İ, Derin Çekme Saclarının Deformasyon Davranışının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2001
- [18] ERDİR S, Profilli Derin Çekmede Hataların Analizi Ve Alınabilecek Önlemler, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1995
- [19] ÇETİN M.S. , Derin Çekme İle Soğuk Şekillendirmenin Sonşu Elemanlar Metodu Yardımıyla Analizi , Yüksek Lisans Tezi , Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007
- [20] GÜNDÜ T, Derin Çekme Saclarında Derin Çekilebilirlik Özelliklerinin Belirlenmesi , Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2000
- [21] GÜNEŞ T. , Pres İşleri Tekniği, Bölüm II, TMMOB Makine Mühendisleri Odası Yayınları, Yayın No:130 , Ankara, 1989

- [22] TOPAÇ M.M. , Karbonlu Çeliklerde Derin Çekmeye Etki Eden Faktörlerin İncelenmesi , Yüksek Lisans Tezi ,Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2003
- [23] FİGES , Ansys LS-DYNA Course Notes , FİGES, Bursa , 2002
- [24] LS-DYNA, Theory LS-Dyna (Help files),Livemore Software Technology Corp.(LSTC) ,1996
- [25] GÖL S. , Derin Çekme İşlemine Etki Eden Parametrelerin Analizi ve Optimizasyonu , Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2005
- [26] BAL M. , Açılı derin çekme kalıplarında matris ve zımba radyüsünün çekme oranına etkisinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007

ÖZGEÇMİŞ

Gökhan Özçelik, 11.06.1982 de Bolu'da doğdu. İlköğrenimini Sivas ve Edirne'de, orta öğrenimini Edirne'de ve lise öğrenimini Bolu'da tamamladı. 2001 yılında lisans öğrenimine başladığı Pamukkale Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünden 2005 yılında bölüm ikincisi olarak mezun oldu. 2005 yılında Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Makine Tasarımı ve İmalat Anabilim Dalı'nda yüksek lisans programına başladı. 2005 yılında Bolu'da bulunan Ekol Makine Kalıp Sanayi Tic. Ltd.Şti. 'de kalıp tasarımı ve imalattan sorumlu mühendis olarak görev aldı. Halen bu görevini sürdürmektedir.