

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MAKARALI BÜKME İŞLEMİNDE İNCE SACLARIN KENAR
DALGALANMA KUSURUNUN DENEYSEL İNCELENMESİ
VE SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ**

**DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Osman Eldar DÖNMEZ**

**Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ
Programı : KONSTRÜKSİYON VE İMALAT**

TEMMUZ 2007

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MAKARALI BÜKME İŞLEMİNDE İNCE SAÇLARIN KENAR
DALGALANMA KUSURUNUN DENEYSEL İNCELENMESİ VE
SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ**

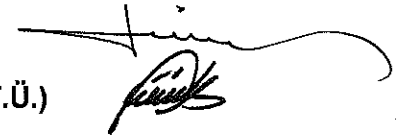
DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Osman Eldar DÖNMEZ
503992040

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 14 Mayıs 2007
Tezin Savunulduğu Tarih : 19 Temmuz 2007

Tez Danışmanı : Doç.Dr. Hikmet KOCABAŞ



Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Mehmet DEMİRKOL



Prof.Dr. İsmail YÜKSEK (Y.T.Ü.)



Prof.Dr. Mehmet Emin YURCİ (Y.T.Ü.)



Doç.Dr. Haydar LİVATYALI



TEMMUZ 2007

ÖNSÖZ

Her konuda gösterdiği anlayış ve yönlendirmeleri için danışman hocam Doç. Dr. Hikmet KOCABAŞ'a, değerli katkılarını ve desteklerini esirgemeyerek çalışmanın çok daha verimli bir şekilde tamamlanmasını sağlayan tez izleme kurulu üyeleri Prof. Dr. Teoman KURTAY'a, Doç. Dr. Haydar LİVATYALI'ya ve Prof. Dr. İsmail YÜKSEK'e, teşekkürü bir borç bilirim.

Deney düzeneği için makaralı bükme makinalarını kullandıran, düzenek için ek makara imal eden, malzeme sağlayan ve değerli zamanlarını ayırarak deneylerin yapılmasında büyük yardımları olan EFS Makina Ltd. (İvedik OSB /Ankara) sahibi Sayın Ekrem ÖZ'e, Fatih ÖZ'e ve EFS Makina çalışanlarına teşekkür ederim.

Malzeme deneyleri için destek olan Ar. Gör. Metin CEBE'ye, sacların 3-boyutlu taramaları için İTÜ Uçak Mühendisliği tarafından kullanılmakta olan cihazlarını zaman ayırarak kullanılmasını sağlayan Prof. Dr. Rüstem ASLAN'a ve taramaları, hassas olması için çok titiz bir çalışma yapan Tamer AKAR'a çok teşekkür ederim.

Sonlu eleman analizi sonuçlarının yorumlanmasında yardımlarından dolayı Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği öğretim üyesi sayın Yrd. Doç. Dr. Mehmet FIRAT'a çok teşekkür ederim.

Dostlarıma, çalışma arkadaşlarıma, yaşantım boyunca maddi ve manevi desteklerini her zaman sürdüren annem Melihan, babam Mustafa, kardeşim Zehra'ya, eşim Fuldem'e ve geçen süre içinde çok az zaman ayırabildiğim oğlum Kaan'a gösterdikleri anlayıştan dolayı çok teşekkür ederim.

Temmuz 2007

Y. Müh. Osman Eldar DÖNMEZ

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xviii
SUMMARY	xxii
1. GİRİŞ	1
2. “MAKARALI BÜKME” İŞLEMİNİN MEKANİĞİ	8
2.1 Genel	8
2.2 Deneysel Çalışmalar	15
2.2.1 Kenar yüzeylerde dalgalanma üzerine çalışmalar	15
2.2.2 Taban alanında görülen kusurlar üzerine çalışmalar	21
2.3 Teorik ve/veya Sonlu Elemanlar ile Modelleme Çalışmaları	24
2.3.1 İnce sac malzeme üzerine çalışmalar	24
2.3.2 Kalın sac malzeme üzerine çalışmalar	33
2.3.3 Yazılım geliştirme çalışmaları	36
2.4 Genel Değerlendirme ve Problemin Tanımlanması	43
3. METODOLOJİ	46
3.1 Çalışma Planı	47
4. DENEYSEL ÇALIŞMA	49
4.1 Makaralı Bükme Tezgahı ve Makara Takım Bilgileri	50
4.2 Deney Planlaması	52
4.3 Deney Sonuçları	55
4.4 Sac Malzeme Mekanik Özellikleri	68
5. SONLU ELEMANLARLA ANALİZ VE SİMULASYON	71
5.1 Dinamik Açık Algoritma Seçimi	71
5.2 Birinci Aşama: SEA Model Geliştirilmesi	74
5.2.1 Temel varsayımlar	76
5.2.2 Kullanılan birimler	77
5.2.3 Eleman seçimi	77
5.2.4 Modelleme malzeme seçimi	78
5.2.5 Sac hareketi için uygulanan kısıtlamalar	79
5.2.6 Model Ls-Dyna girdi dosyası diğer parametreleri	80
5.2.7 Model ile ilgili diğer bilgiler	81
5.2.8 Model temel özellikleri	81

5.2.9	İlk aşama sonuçları	82
5.3	İkinci Aşama: Geliştirilmiş SEA Modeli	82
5.4	Üçüncü Aşama: Modelin İyileştirme Hesabında Kullanılması	87
5.5	SEA Sonuçları	88
6.	GENEL VARGILAR VE OLASI ÇALIŞMA KONULARI	113
6.1	Çalışmanın Özeti	113
6.2	Genel Vargılar	114
6.3	Olası Çalışma Konuları	117
	KAYNAKLAR	119
	EKLER	122
	EK-A Sonuçlar	122
	EK-B SEA Modeli Girdi Dosyası Bilgileri	189
	EK-C Kavramlar Sözlüğü	195
	ÖZGEÇMİŞ	198

KISALTMALAR

BDT/BTÜ	:	Bilgisayar Destekli Tasarım/Bilgisayar Destekli Üretim
NOG	:	Normal Olasılık Grafiği
SEA	:	Sonlu Elemanlar Analizi

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1	Makaralı bükme işleminde örnek tolerans değerleri [5] 4
Tablo 1.2	Makaralı bükme işlemini etkileyen değişkenler [5] 5
Tablo 4.1	Deneylerde kullanılan tezgah bilgileri 51
Tablo 4.2	Deneylerde kullanılan değişkenler 52
Tablo 4.3	Deney planlaması 53
Tablo 4.4	Deney sonuçları kenar dalgalanmaları inceleme tablosu (mm) 56
Tablo 4.5	Kenar dalgalanmaları için milimetre cinsinden gözlem değerleri 57
Tablo 4.6	Düşey bükülmeler için milimetre cinsinden gözlem değerleri 58
Tablo 4.7	Kenar dalgalanmaları ile ilgili deney sonuçlarının L8 inceleme tablosu içine yerleştirilmesi 59
Tablo 4.8	AB etkileşimi için deney sonuçları inceleme tablosu 63
Tablo 4.9	AC etkileşimi için deney sonuçları inceleme tablosu 64
Tablo 4.10	BC etkileşimi için deney sonuçları inceleme tablosu 65
Tablo 4.11	Dalgalı kenar ucu ölçümleri tablosu (milimetre) 66
Tablo 5.1	Deneylerde kullanılan tezgah bilgileri [7,15] 75
Tablo 5.2	SEA modelinde kullanılan birimler ve örnek değerler [45] 77
Tablo 5.3	Modelleme kullanılan eleman sayısı ve çeşitleri 77
Tablo 5.4	Makara malzemesi özellikleri (Malzeme No: 20) 78
Tablo 5.5	Sac malzemesi mekanik özellikleri (Malzeme No: 24) 78
Tablo 5.6	Ls-Dyna modeli girdi dosyası bazı parametreleri 80
Tablo 5.7	İşlemci ve problem zamanları tablosu 87
Tablo 5.8	SEA sonuçları inceleme tablosu 92
Tablo 5.9	Kenar dalgalanmaları ile ilgili SEA sonuçlarının L8 inceleme tablosu içine yerleştirilmesi 93
Tablo 5.10	Deney ve SEA sonuçları inceleme tablosu 94
Tablo 5.11	AB etkileşimi için deney sonuçları inceleme tablosu 96
Tablo 5.12	AC etkileşimi için deney sonuçları inceleme tablosu 97
Tablo 5.13	BC etkileşimi için deney sonuçları inceleme tablosu 98
Tablo 5.14	Düşey bükülmeler için milimetre cinsinden gözlem değerleri. 99
Tablo 5.15	Bükülen kenar ucu üzerindeki ilk 100 eleman üzerindeki iç enerji ortalama ve standard sapma değerleri ($\bar{I}E_{ort} \pm \bar{I}E_{\sigma}$) (MPa) 106
Tablo 5.16	Kenar dalgalanma ortalama yüksekliği ve standard sapma değerleri ($d_{ort} \pm d_{\sigma}$) (milimetre) 109
Tablo 5.17	Düşey düzlemde eğilme (milimetre) 110

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1: Makaralı bükme işlemi ile elde edilen çeşitli ürünler	1
Şekil 1.2: Değişken kenar kesitli parça örnekleri	2
Şekil 1.3: Makaralı bükme makinası.....	3
Şekil 1.4: Makaralı bükme işleminde görülen ürün bozuklukları a) Düşey eğilme b) Yatay eğilme c) Burulma d) Açılma e) Bel verme f) Kenar dalgalanmaları g) Cep oluşumu h) Herringbore etkisi	4
Şekil 2.1: Makaralı bükme işlemi a) Makaralı bükme işlemi temsili resmi b) Makara dizilişi örneği c) Her makara setinde kenar bükme açıları örneği d) Makaralı bükme işlemi ile elde edilmiş ürünler (üstte) ve ekstrüzyon yöntemi ile elde edilmiş ürünler (altta)	8
Şekil 2.2: Çalışmada kullanılan kavramlar	9
Şekil 2.3: İki makara seti arasında kalan sac parçası gerinim modellemesi a) Basitleştirilmiş model b) Kenar gerçek şekil değişimi	12
Şekil 2.4: Form açısı metodu [5]	13
Şekil 2.5: Form oranı metodu [5]	14
Şekil 2.6: Şekil değişim uzunluğu (L_s) [6]	15
Şekil 2.7: Makaralı bükme işlemi esnasında önceden delikli sac parçalarda sık karşılaşılan yüzey bozuklukları [4]	18
Şekil 2.8: Watari ve Ona'nın çalışmalarında kullandıkları delikli sac modeli ve elde ettikleri sonuçlar [4]	18
Şekil 2.9: Cep oluşum büyüklüğü H_p [10]	21
Şekil 2.10: Jimma ve Ona'nın çalışmasında kullandıkları kesit [13]	23
Şekil 2.11: RFPASS yazılımı sonuçlarının 20° girişi ve 30° makara girişleri için deneysel sonuçlarla karşılaştırılması [15]	26
Şekil 2.12: a) Brunet, Mguil ve Pol çalışmalarında 2 ve 3 boyutlu algoritma ile oluşturdukları profil, b) Deneysel ve hesaplanan gerinimleri [17]	26
Şekil 2.13: Panton, Duncan, Zhu; Makaralı bükme esnasında sac malzemenin iç ve dış yüzeylerindeki gerinim değerleri. (Yönler: — Boylamasına, - - - Genişlik yönünde, _ _ _ Düşey düzlemde) [18]	28
Şekil 2.14: (a) Makara girişindeki sac malzeme deformasyonu (b) Makara giriş şekil değişim uzunluğu (L_s) ve sac malzeme genişliği (l_s) grafiği [19]	29
Şekil 2.15: Model geometrisi, 1899. adımda gerinim dağılımı; Kenar üzerinde kabuk gerinim değerlerinin dağılımı (üstte), taban kısmında kabuk gerinim değerlerinin dağılımı (altta) [22].....	31

Şekil 2.16:	İkili (sonlu) eleman boyutlandırması; Hesaplanan (üstte) ve sıkı dökeme (fine mesh) (altta) [23]	32
Şekil 2.17:	Kenar burkulma modeli [24]	32
Şekil 2.18:	Hong ve diğerleri tarafından kullanılan model [28]	34
Şekil 2.19:	(a) SEA modeli (b) 21°, 40° ve 60° makaralarda elde edilen maksimum gerinim değerleri [30]	35
Şekil 2.20:	Ona ve diğerleri tarafından önerilen form açısı hesabı [35] ..	37
Şekil 2.21:	a) Hitachi Metals Ltd. Katalog No: 265'te yer alan standard kesitler için bitmiş üründeki köşe sayısı "k _s " ile bu şekli elde etmek için kullanılan makara seti sayısı "n" korelasyonu, b) Hitachi Metals Ltd. Katalog No: 265'te yer alan simetrik kesitler için Şekil Katsayısı "aTk _s " ile makara seti sayısı "n" bağıntısı [35]	38
Şekil 2.22:	Örnek uygulama [35]	39
Şekil 2.23:	Temel şekil değiştirme tipleri ve bölgesel özellikler [39]	40
Şekil 2.24:	Makaralı bükme işlemi esnasında sac üzerinde oluşan 3 farklı alan [39]	41
Şekil 2.25:	Geometrik gösterim, a) uzay eğrisi ve yüzey eğrisi, b) Yüzey dışına doğru bükme ve yüzey içinde bükme [42]	43
Şekil 4.1:	Panel 85 profili	51
Şekil 4.2:	Deneylerde kullanılan makara geometrisi (a) Makaraların geometrisi (b) Tezgah üzerinde kesit görünümü	51
Şekil 4.3:	Deneylerde kullanılan makara dizilişleri, a) A1: 15°-30°-45°-85°, b) A2: 15°- 30°-85°	52
Şekil 4.4:	3-boyutlu yüzey taramasında kullanılan cihaz	53
Şekil 4.5:	Kenar dalga yüksekliği ortalaması yaklaşımı	54
Şekil 4.6:	Deneylerde karşılaşılan kenar dalgalanma ve düşey eğim kusurları	55
Şekil 4.7:	a) Deney sonuçları normal olasılık grafiği (NOG) b) Tüm etkilerin grafiği	60
Şekil 4.8:	AB etkileşimi grafiği.....	63
Şekil 4.9:	AC etkileşimi grafiği	64
Şekil 4.10:	BC etkileşimi grafiği	65
Şekil 4.11:	a) AB etkileşimi grafiği, b) AC etkileşimi grafiği, c) BC etkileşimi grafiği	66
Şekil 4.12:	a) Deneylerde kullanılan sünek çelik malzemenin K ve n değerleri için oturtulan eğri denklemi, b) Deneylerde kullanılan sünek çelik malzemenin gerilme-gerinim eğrisi ve SEA için seçilen değerleri	69
Şekil 4.13:	a) Deneylerde kullanılan alüminyum malzemenin K ve n değerleri için oturtulan eğri denklemi, b) Deneylerde kullanılan alüminyum malzemenin gerilme-gerinim eğrisi ve SEA için seçilen değerleri	70
Şekil 5.1:	Makara seti geometrisi (ölçüler milimetre cinsindedir) [7,15]	75
Şekil 5.2:	Simülasyonda kullanılan makara setleri yerleşimi. (XY düzleminde simetrik olduğu için yarısı modellenmiştir. Sac kalınlığı (T) 0,6 mm alınmıştır.)	76
Şekil 5.3:	Sünek çelik örnek eşdeğer gerilme-gerinim eğrisi	79
Şekil 5.4:	Sac malzeme hareket kısıtlamaları	80

Şekil 5.5:	a) Duggal ve diğerlerinin çalışmasında sundukları 20° makarada oluşan gerinim değerleri, b) SEA sonucu 20° makarada elde edilen gerilme-gerinim grafiği.....	82
Şekil 5.6:	a) A1 (15°-30°-45°-85°) makara dizilişi, b) A2 (15°-30°-85°) makara dizilişi	83
Şekil 5.7:	Geliştirilmiş SEA model özeti	84
Şekil 5.8:	Çarpılma etkisi [46]	85
Şekil 5.9:	A1-B1-C1 sonuçları (a) SEA sonuçları örneği x-yönünde gerilme (b) 3-B tarama ve gerçek resimleri (c) SEA sonuçları örneği – kenar yüzeyde dalgalanma	91
Şekil 5.10:	SEA sonuçları L8 analizi: a) Normal olasılık grafiği, b) Tüm etkilerin grafiği	95
Şekil 5.11:	SEA sonuçları L8 analizi : AB etkileşimi grafiği	96
Şekil 5.12:	SEA sonuçları L8 analizi : AC etkileşimi grafiği	97
Şekil 5.13:	SEA sonuçları L8 analizi: BC etkileşimi grafiği	98
Şekil 5.14:	A1-B1-C1 kombinasyonunda makara girişinde SEA sonuçları örneği boylamasına yönde gerilme değerleri	100
Şekil 5.15:	A1-B1-C1 kombinasyonu analizinin 5. saniyesinde 5. makara girişinde SEA sonuçları örneği, a) Maksimum Von Misses gerilme dağılımı, b) Boylamasına yönde gerilme dağılımı	101
Şekil 5.16:	Bhattacharyya ve diğerleri tarafından bahsedilen şekil değiştirme uzunluğu SEA sonuçlarında 8 kombinasyon için gözlenen alanları [7]	103
Şekil 5.17:	A1-110-AI kombinasyonu için: a) Bükülen kenar üzerindeki ilk 100 eleman üzerinde iç enerji dağılımı (MPa) (sırasıyla en alttan en üste t=0,97s, t=1,72s, t=2,33s, t=10s) b) Kenar ucundaki ilk 101 düğüm noktası için z-yönünde konum	107
Şekil 5.18:	A2-110-AI kombinasyonu için: a) Bükülen kenar üzerindeki ilk 100 eleman üzerinde iç enerji dağılımı (MPa) (sırasıyla en alttan en üste t=0,97s, t=1,57s, t=9s) b) Kenar ucundaki ilk 101 düğüm noktası için z-yönünde konum	107
Şekil 5.19:	a) A1-110-AI kombinasyonu için, ilerleme yönünde, konuma bağlı ortalama iç yüzey gerinim değerleri (dikey çizgiler soldan sağa 1. ila 4. makara setleri merkez konumlarını simgelemektedir), b) A1-110-AI kombinasyonu için, ilerleme yönünde, konuma bağlı ortalama iç yüzey gerinim değerleri (dikey çizgiler soldan sağa 1. ila 4. makara setleri merkez konumlarını simgelemektedir)	108
Şekil 5.20:	A1-110-AI kombinasyonu için geri yaylanma analizi sonrası kenar yüzey ucunda ilk 100 eleman üzerinde oluşan iç ve dış yüzey gerilme (xx-yönünde) dağılımı	108
Şekil 5.21:	110 mm sac genişliği ve alüminyum malzeme için sırasıyla 15°-30°-45°-85° ve 15°-30°-45°-75° makara dizilişleri için SEA ile hesaplanan gerinim (alt yüzey) dağılımı iyileşmesi ..	110
Şekil 5.22:	110 mm sac genişliği ve alüminyum malzeme için sırasıyla soldan sağa 15°-30°-45°-85°, 15°-30°-45°-75° ve 25°-50°-70°-75° makara dizilişleri için SEA ile hesaplanan profil geometrileri (yz düzlemi)	111
Şekil A.1:	İlk üç makara seti teknik resimleri	124
Şekil A.2:	Son iki makara seti teknik resimleri	125

Şekil A.3:	A1-B1-C1 kombinasyonu için deney sonuçları ve analiz sonuçlarını karşılaştırma (a) Sonuçların fotoğrafı (b) 3 boyutlu tarama resimleri (c) SEA sonuçları	126
Şekil A.4:	A1-B1-C2 kombinasyonu için deney sonuçları ve analiz sonuçlarını karşılaştırma (a) Sonuçların fotoğrafı (b) 3 boyutlu tarama resimleri (c) SEA sonuçları	127
Şekil A.5:	A1-B2-C1 kombinasyonu için deney sonuçları ve analiz sonuçlarını karşılaştırma (a) Sonuçların fotoğrafı (b) 3 boyutlu tarama resimleri (c) SEA sonuçları	128
Şekil A.6:	A1-B2-C2 kombinasyonu için deney sonuçları ve analiz sonuçlarını karşılaştırma (a) Sonuçların fotoğrafı (b) 3 boyutlu tarama resimleri (c) SEA sonuçları	129
Şekil A.7:	A2-B1-C1 kombinasyonu için deney sonuçları ve analiz sonuçlarını karşılaştırma (a) Sonuçların fotoğrafı (b) 3 boyutlu tarama resimleri (c) SEA sonuçları	130
Şekil A.8:	A2-B1-C2 kombinasyonu için deney sonuçları ve analiz sonuçlarını karşılaştırma (a) Sonuçların fotoğrafı (b) 3 boyutlu tarama resimleri (c) SEA sonuçları	131
Şekil A.9:	A2-B2-C1 kombinasyonu için deney sonuçları ve analiz sonuçlarını karşılaştırma (a) Sonuçların fotoğrafı (b) 3 boyutlu tarama resimleri (c) SEA sonuçları	132
Şekil A.10:	A2-B2-C2 kombinasyonu için deney sonuçları ve analiz sonuçlarını karşılaştırma (a) Sonuçların fotoğrafı (b) 3 boyutlu tarama resimleri (c) SEA sonuçları	133
Şekil A.11:	17 mm kenar yüksekliği (110 mm sac genişliği) ve alüminyum malzeme için kenar dalga ortalaması ve standard sapma değeri ($d_{ort} \pm d_{\sigma}$) (solda) ve düşey düzlemde eğim miktarı (sağda), a) Deney sonucu (15° - 30° - 45° - 85° makara dizilişi için), b) Deney ile aynı makara dizilişi ile elde edilmiş SEA sonucu, c) 15° - 30° - 45° - 75° makara dizilişine sahip SEA iyileştirme modeli sonucu, d) 25° - 50° - 70° - 75° makara dizilişine sahip SEA iyileştirme modeli sonucu	135
Şekil A.12:	17 mm kenar yüksekliği (110 mm sac genişliği) ve sünek çelik malzeme için kenar dalga ortalaması ve standard sapma değeri ($d_{ort} \pm d_{\sigma}$) (solda) ve düşey düzlemde eğim miktarı (sağda) (a) Deney sonucu (15° - 30° - 45° - 85° makara dizilişi için), (b) Deney ile aynı makara dizilişi ile elde edilmiş SEA sonucu, c) 15° - 30° - 45° - 75° makara dizilişine sahip SEA iyileştirme modeli sonucu, d) 25° - 50° - 70° - 75° makara dizilişine sahip SEA iyileştirme modeli sonucu	136
Şekil A.13:	12 mm kenar yüksekliği (100 mm sac genişliği) ve alüminyum malzeme için kenar dalga ortalaması ve standard sapma değeri ($d_{ort} \pm d_{\sigma}$) (solda) ve düşey düzlemde eğim miktarı (sağda) (a) Deney sonucu (15° - 30° - 45° - 85° makara dizilişi için), (b) Deney ile aynı makara dizilişi ile elde edilmiş SEA sonucu, c) 15° - 30° - 45° - 75° makara dizilişine sahip SEA iyileştirme modeli sonucu, d) 25° - 50° - 70° - 75° makara dizilişine sahip SEA iyileştirme modeli sonucu	137

Şekil A.14:	12 mm kenar yüksekliği (100 mm sac genişliği) ve sünek çelik malzeme için kenar dalga ortalaması ve standard sapma değeri ($d_{ort} \pm d_{\sigma}$) (solda) ve düşey düzlemde eğim miktarı (sağda) (a) Deney sonucu (15° - 30° - 45° - 85° makara dizilişi için), (b) Deney ile aynı makara dizilişi ile elde edilmiş SEA sonucu, c) 15° - 30° - 45° - 75° makara dizilişine sahip SEA iyileştirme modeli sonucu, d) 25° - 50° - 70° - 75° makara dizilişine sahip SEA iyileştirme modeli sonucu	138
Şekil A.15:	a) 110 mm sac genişliği ve alüminyum malzeme için makara kombinasyonlarına göre elde edilen profillerin y-z düzleminde gösterimi, b) 110 mm sac genişliği ve sünek çelik malzeme için makara kombinasyonlarına göre elde edilen profillerin y-z düzleminde gösterimi	139
Şekil A.16:	a) 100 mm sac genişliği ve alüminyum malzeme için makara kombinasyonlarına göre elde edilen profillerin y-z düzleminde gösterimi, b) 100 mm sac genişliği ve sünek çelik malzeme için makara kombinasyonlarına göre elde edilen profillerin y-z düzleminde gösterimi	140
Şekil A.17:	A1-110mm-Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (alt yüzey) (t=5s)	141
Şekil A.18:	A1-110mm-Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (üst yüzey) (t= 5s)	141
Şekil A.19:	A1-110mm-Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası x-yönünde gerilme dağılımı (orta katman) (t= 5s)	142
Şekil A.20:	A1-110mm-Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası maksimum Von Misses gerilme dağılımı (t= 5s) ...	142
Şekil A.21:	A1-110mm-Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (alt yüzey) (t=5s)	143
Şekil A.22:	A1-110mm- Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (üst yüzey) (t= 5s)	143
Şekil A.23:	A1-110mm-Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası x-yönünde gerilme dağılımı (t= 5s)	144
Şekil A.24:	A1-110mm-Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası maksimum Von Misses gerilme dağılımı (t= 5s) ...	144
Şekil A.25:	A1-100mm-Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (alt yüzey) (t=5s)	145
Şekil A.26:	A1-100mm-Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (üst yüzey) (t= 5s)	145
Şekil A.27:	A1-100mm-Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası x-yönünde gerilme dağılımı (t= 5s)	146
Şekil A.28:	A1-100mm-Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası maksimum Von Misses gerilme dağılımı (t= 5s) ...	146
Şekil A.29:	A1-100mm-Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (alt yüzey) (t=5s)	147
Şekil A.30:	A1-100mm-Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (üst yüzey) (t= 5s)	147
Şekil A.31:	A1-100mm-Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası x-yönünde gerilme dağılımı (t= 5s)	148
Şekil A.32:	A1-100mm-Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası maksimum Von Misses gerilme dağılımı (t= 5s) ...	148

Şekil A.33:	A2-110mm-Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (alt yüzey) (t=5s)	149
Şekil A.34:	A2-110mm-Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (üst yüzey) (t= 5s)	149
Şekil A.35:	A2-110mm-Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası x-yönünde gerilme dağılımı (t= 5s)	150
Şekil A.36:	A2-110mm-Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası maksimum Von Misses gerilme dağılımı (t= 5s) ...	150
Şekil A.37:	A2-110mm-Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (alt yüzey) (t=5s)	151
Şekil A.38:	A2-110mm-Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (üst yüzey) (t= 5s)	151
Şekil A.39:	A2-110mm-Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası x-yönünde gerilme dağılımı (t= 5s)	152
Şekil A.40:	A2-110mm-Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası maksimum Von Misses gerilme dağılımı (t= 5s) ...	152
Şekil A.41:	A2-100mm-Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (alt yüzey) (t=5s)	153
Şekil A.42:	A2-100mm-Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (üst yüzey) (t= 5s)	153
Şekil A.43:	A2-100mm-Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası x-yönünde gerilme dağılımı (t= 5s)	154
Şekil A.44:	A2-100mm-Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası maksimum Von Misses gerilme dağılımı (t= 5s) ...	154
Şekil A.45:	A2-100mm-Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (alt yüzey) (t=5s)	155
Şekil A.46:	A2-100mm-Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (üst yüzey) (t= 5s)	155
Şekil A.47:	A2-100mm-Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası x-yönünde gerilme dağılımı (t= 5s)	156
Şekil A.48:	A2-100mm-Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası maksimum Von Misses gerilme dağılımı (t= 5s) ...	156
Şekil A.49:	15°-30°-45°-75°- 110 mm - Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (alt yüzey) (t= 5s)	157
Şekil A.50:	15°-30°-45°-75°- 110 mm - Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (üst yüzey) (t= 5s)	157
Şekil A.51:	15°-30°-45°-75°- 110 mm - Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası x-yönünde gerilme dağılımı (orta katman) (t= 5s)	158
Şekil A.52:	15°-30°-45°-75°- 110 mm - Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası maksimum Von Misses gerilme dağılımı (t= 5s)	158
Şekil A.53:	15°-30°-45°-75°- 110 mm – Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (alt yüzey) (t= 5s)	159
Şekil A.54:	15°-30°-45°-75°- 110 mm - Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (üst yüzey) (t= 5s)	159
Şekil A.55:	15°-30°-45°-75°- 110 mm - Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası x-yönünde gerilme dağılımı (orta katman) (t= 5s)	160

Şekil A.56:	15°-30°-45°-75°- 110 mm - Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası maksimum Von Misses gerilme dağılımı (t= 5s)	160
Şekil A.57:	15°-30°-45°-75°- 100 mm - Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (alt yüzey) (t= 5s)	161
Şekil A.58:	15°-30°-45°-75°- 100 mm - Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (üst yüzey) (t= 5s)	161
Şekil A.59:	15°-30°-45°-75°- 100 mm - Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası x-yönünde gerilme dağılımı (orta katman) (t= 5s)	162
Şekil A.60:	15°-30°-45°-75°- 100 mm - Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası maksimum Von Misses gerilme dağılımı (t= 5s)	162
Şekil A.61:	15°-30°-45°-75°- 100 mm – Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (alt yüzey) (t= 5s)	163
Şekil A.62:	15°-30°-45°-75°- 100 mm – Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (üst yüzey) (t= 5s)	163
Şekil A.63:	15°-30°-45°-75°- 100 mm – Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası x-yönünde gerilme dağılımı (orta katman) (t= 5s)	164
Şekil A.64:	15°-30°-45°-75°- 100 mm – Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası maksimum Von Misses gerilme dağılımı (t= 5s)	164
Şekil A.65:	25°-50°-70°-75°- 110 mm - Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (alt yüzey) (t= 5s)	165
Şekil A.66:	25°-50°-70°-75°- 110 mm - Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (üst yüzey) (t= 5s)	165
Şekil A.67:	25°-50°-70°-75°- 110 mm - Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası x-yönünde gerilme dağılımı (orta katman) (t= 5s)	166
Şekil A.68:	25°-50°-70°-75°- 110 mm - Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası maksimum Von Misses gerilme dağılımı (t= 5s)	166
Şekil A.69:	25°-50°-70°-75°- 110 mm – Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (alt yüzey) (t= 5s)	167
Şekil A.70:	25°-50°-70°-75°- 110 mm – Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (üst yüzey) (t= 5s)	167
Şekil A.71:	25°-50°-70°-75°- 110 mm – Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası x-yönünde gerilme dağılımı (orta katman) (t= 5s)	168
Şekil A.72:	25°-50°-70°-75°- 110 mm – Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası maksimum Von Misses gerilme dağılımı (t= 5s)	168
Şekil A.73:	25°-50°-70°-75°- 100 mm - Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (alt yüzey) (t= 5s)	169
Şekil A.74:	25°-50°-70°-75°- 100 mm - Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (üst yüzey) (t= 5s)	169

Şekil A.75:	25°-50°-70°-75°- 100 mm - Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası x-yönünde gerilme dağılımı (orta katman) (t= 5s)	170
Şekil A.76:	25°-50°-70°-75°- 100 mm - Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası maksimum Von Misses gerilme dağılımı (t= 5s)	170
Şekil A.77:	25°-50°-70°-75°- 100 mm – Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (alt yüzey) (t= 5s)	171
Şekil A.78:	25°-50°-70°-75°- 100 mm – Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (üst yüzey) (t= 5s)	171
Şekil A.79:	25°-50°-70°-75°- 100 mm – Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası x-yönünde gerilme dağılımı (orta katman) (t= 5s)	172
Şekil A.80:	25°-50°-70°-75°- 100 mm – Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası maksimum Von Misses gerilme dağılımı (t= 5s)	172
Şekil A.81:	A1-110-Al kombinasyonda, kenar ucundaki ilk 100 eleman için x-yönünde konuma bağlı toplam iç enerji grafiği	173
Şekil A.82:	A1-110-YC kombinasyonda, kenar ucundaki ilk 100 eleman için x-yönünde konuma bağlı toplam iç enerji grafiği	173
Şekil A.83:	A1-100-Al kombinasyonda, kenar ucundaki ilk 100 eleman için x-yönünde konuma bağlı toplam iç enerji grafiği	174
Şekil A.84:	A1-100-YC kombinasyonda, kenar ucundaki ilk 100 eleman için x-yönünde konuma bağlı toplam iç enerji grafiği	174
Şekil A.85:	A2-110-Al kombinasyonda, kenar ucundaki ilk 100 eleman için x-yönünde konuma bağlı toplam iç enerji grafiği	175
Şekil A.86:	A2-110-YC kombinasyonda, kenar ucundaki ilk 100 eleman için x-yönünde konuma bağlı toplam iç enerji grafiği	175
Şekil A.87:	A2-100-Al kombinasyonda, kenar ucundaki ilk 100 eleman için x-yönünde konuma bağlı toplam iç enerji grafiği	176
Şekil A.88:	A2-100-YC kombinasyonda, kenar ucundaki ilk 100 eleman için x-yönünde konuma bağlı toplam iç enerji grafiği	176
Şekil A.89:	A1-110-Al kombinasyonu için: a) Bükülen kenar üzerindeki ilk 100 eleman üzerinde iç enerji dağılımı (MPa) (sırasıyla en alttan en üste t=0,97s, t=1,72s, t=2,33s, t=10s) b) Kenar ucundaki ilk 101 düğüm noktası için z-yönünde konum	177
Şekil A.90:	A1-110-YC kombinasyonu için: a) Bükülen kenar üzerindeki ilk 100 eleman üzerinde iç enerji dağılımı (MPa) (sırasıyla en alttan en üste t=0,97s, t=1,72s, t=2,33s, t=10s) b) Kenar ucundaki ilk 101 düğüm noktası için z-yönünde konum	177
Şekil A.91:	A1-100-Al kombinasyonu için: a) Bükülen kenar üzerindeki ilk 100 eleman üzerinde iç enerji dağılımı (MPa) (sırasıyla en alttan en üste t=0,97s, t=1,72s, t=2,33s, t=10s) b) Kenar ucundaki ilk 101 düğüm noktası için z-yönünde konum	178
Şekil A.92:	A1-100-YC kombinasyonu için: a) Bükülen kenar üzerindeki ilk 100 eleman üzerinde iç enerji dağılımı (MPa) (sırasıyla en alttan en üste t=0,97s, t=1,72s, t=2,33s, t=10s) b) Kenar ucundaki ilk 101 düğüm noktası için z-yönünde konum	178

Şekil A.93:	A2-110-AI kombinasyonu için: a) Bükülen kenar üzerindeki ilk 100 eleman üzerinde iç enerji dağılımı (MPa) (sırasıyla en alttan en üste $t=0,97s$, $t=1,57s$, $t=9s$) b) Kenar ucundaki ilk 101 düğüm noktası için z-yönünde konum	179
Şekil A.94:	A2-110-YC kombinasyonu için: a) Bükülen kenar üzerindeki ilk 100 eleman üzerinde iç enerji dağılımı (MPa) (sırasıyla en alttan en üste $t=0,97s$, $t=1,57s$, $t=9s$) b) Kenar ucundaki ilk 101 düğüm noktası için z-yönünde konum	179
Şekil A.95:	A2-100-AI kombinasyonu için: a) Bükülen kenar üzerindeki ilk 100 eleman üzerinde iç enerji dağılımı (MPa) (sırasıyla en alttan en üste $t=0,97s$, $t=1,57s$, $t=9s$) b) Kenar ucundaki ilk 101 düğüm noktası için z-yönünde konum	180
Şekil A.96:	A2-100-YC kombinasyonu için: a) Bükülen kenar üzerindeki ilk 100 eleman üzerinde iç enerji dağılımı (MPa) (sırasıyla en alttan en üste $t=0,97s$, $t=1,57s$, $t=9s$) b) Kenar ucundaki ilk 101 düğüm noktası için z-yönünde konum	180
Şekil A.97:	A1-110-AI kombinasyonu için, ilerleme yönünde, konuma bağlı ortalama iç yüzey gerinim değerleri (dikey çizgiler soldan sağa 1. ila 4. makara setleri merkez konumlarını simgelemektedir)	181
Şekil A.98:	A1-110-YC kombinasyonu için, ilerleme yönünde, konuma bağlı ortalama iç yüzey gerinim değerleri (dikey çizgiler soldan sağa 1. ila 4. makara setleri merkez konumlarını simgelemektedir)	181
Şekil A.99:	A1-100-AI kombinasyonu için, ilerleme yönünde, konuma bağlı ortalama iç yüzey gerinim değerleri (dikey çizgiler soldan sağa 1. ila 4. makara setleri merkez konumlarını simgelemektedir)	182
Şekil A.100:	A1-100-YC kombinasyonu için, ilerleme yönünde, konuma bağlı ortalama iç yüzey gerinim değerleri (dikey çizgiler soldan sağa 1. ila 4. makara setleri merkez konumlarını simgelemektedir)	182
Şekil A.101:	A2-110-AI kombinasyonu için, ilerleme yönünde, konuma bağlı ortalama iç yüzey gerinim değerleri (dikey çizgiler soldan sağa 1. ila 3. makara setleri merkez konumlarını simgelemektedir)	183
Şekil A.102:	A2-110-YC kombinasyonu için, ilerleme yönünde, konuma bağlı ortalama iç yüzey gerinim değerleri (dikey çizgiler soldan sağa 1. ila 3. makara setleri merkez konumlarını simgelemektedir)	183
Şekil A.103:	A2-100-AI kombinasyonu için, ilerleme yönünde, konuma bağlı ortalama iç yüzey gerinim değerleri (dikey çizgiler soldan sağa 1. ila 3. makara setleri merkez konumlarını simgelemektedir)	184
Şekil A.104:	A2-100-YC kombinasyonu için, ilerleme yönünde, konuma bağlı ortalama iç yüzey gerinim değerleri (dikey çizgiler soldan sağa 1. ila 3. makara setleri merkez konumlarını simgelemektedir)	184
Şekil A.105:	Geri yaylanma analizi sonrası kenar yüzey ucunda ilk 100 eleman üzerinde oluşan iç ve dış yüzey gerilme (xx-yönünde) dağılımları: a) A1-110-AI kombinasyonu için, b) A1-110-YC kombinasyonu için	185

Şekil A.106: Geri yaylanma analizi sonrası kenar yüzey ucunda ilk 100 eleman üzerinde oluşan iç ve dış yüzey gerilme (xx-yönünde) dağılımları: a) A1-100-AI kombinasyonu için, b) A1-100-YC kombinasyonu için	186
Şekil A.107: Geri yaylanma analizi sonrası kenar yüzey ucunda ilk 100 eleman üzerinde oluşan iç ve dış yüzey gerilme (xx-yönünde) dağılımları: a) A2-110-AI kombinasyonu için, b) A2-110-YC kombinasyonu için	187
Şekil A.108: Geri yaylanma analizi sonrası kenar yüzey ucunda ilk 100 eleman üzerinde oluşan iç ve dış yüzey gerilme (xx-yönünde) dağılımları: a) A2-100-AI kombinasyonu için, b) A2-100-YC kombinasyonu için	188

SEMBOL LİSTESİ

$\sigma_{xx}, \sigma_{yy} ..$	Gerilmeler
σ_y	Akma gerilmesi
τ	Kesme gerilmesi
$\epsilon_{xx}, \epsilon_{xy}, \epsilon_{xz} ...$	Gerinim değerleri
θ, α	Açılar
A, B, C	L8 deney faktörleri
a	Kenar yüksekliği
d_{ort}	Ortalama kenar dalgası yüksekliği
d_{σ}	Kenar dalgası standard sapma değeri
D	İki makara seti arası uzaklığı
E	Elastisite modülüsü
F_s	Statik sürtünme katsayısı
F_d	Dinamik sürtünme katsayısı
h	Dalga yüksekliği
İE_{ort}	İç enerji ortalama değeri
İE_{σ}	İç enerji standard sapma değeri
K	Pekleşme modülüsü
L	Boy
mm	Milimetre
n	Makara seti sayısı
v	Poisson oranı
R	Yarıçap
s	Saniye
sg	Sac genişliği
t	Zaman
T	Kalınlık
v	Hız
ω	Dönme hızı

MAKARALI BÜKME İŞLEMİNDE İNCE SACLARIN KENAR DALGALANMA KUSURUNUN DENEYSEL İNCELENMESİ VE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ

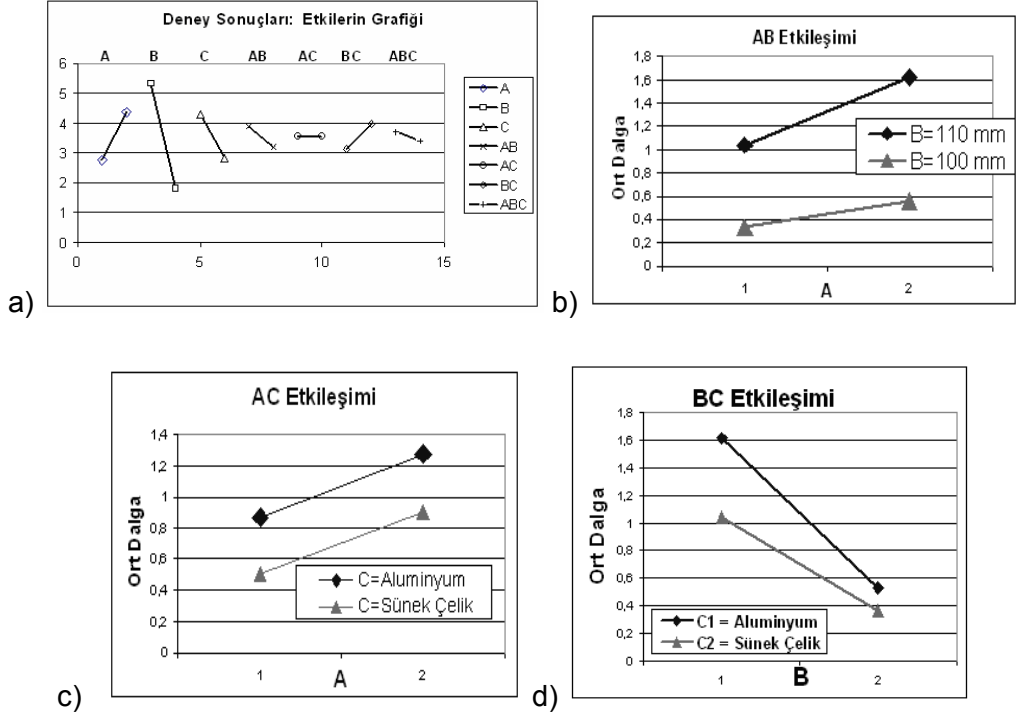
ÖZET

Makaralı bükme işlemi, imalat teknikleri arasında giderek daha çok önem kazanmaktadır. Makaralı bükme işlemi arka arkaya dizilen makaralar vasıtası ile sac parçanın kenarının kademeli olarak bükülmesi olarak tarif edilebilir. Makaralı bükme işleminde imalat tezgahlarındaki makara tasarımı, günümüz teknolojisinde halen deneysel olarak elde edilen bilgilere ve çalışanların pratik deneyimlerine bağlıdır. Yüksek maliyet ve harcamalardan ötürü sistematik olarak deneysel çalışmalar çok az yapılabilmektedir.

Günümüzde daha dar tolerans değerleri, daha kaliteli yüzeyler ve çeşitlenerek artan kesitler karşısında makaralı bükme işlemine etki eden değişkenlerin ve aralarındaki etkileşimlerin, bu yönde artan talepleri karşılayabilmek için daha iyi anlaşılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Makaralı bükme makinası ile ilgili bir sipariş alındıktan sonra en kısa sürede ürünü teslim etmek makina imalatçıları açısından çok önemli bir rekabet avantajı sağlamaktadır. Ancak makina üzerinde istenilen profil için çoğu zaman imalat sonrası ayar gerekip ilave zaman kaybına yol açmakta veya kimi durumlarda maliyeti çok yükselten tasarım değişikliğine gidilmektedir. Zaman kaybı sipariş veren imalatçı için risk yaratırken, tezgah imalatçısı da aynı şekilde zaman, tasarım değişikliği, ilave ayar ve diğer gecikme maliyetleri ile büyük zararları ve firma imajına etkisini hesaba katmak zorunda kalmaktadır.

Makaralı bükme işleminde, karmaşık üç boyutlu şekil değişimleri sonucu çeşitli şekil bozuklukları ortaya çıkabilmektedir. Şekil bozuklukları içinde, en sık görüleni kenar yüzeylerde dalgalanmadır. Sac yüzeyinde/tabana alanında cep oluşumu, çarpılma, düşey ve yatay yönde eğilme, burkulma, burulma diğer kusurlara örnek olarak sayılabilir. Bu alanda makina tasarımcılarına imalat öncesinde son ürün hesaplamasında bulunabilecek bilgisayar destekli araçlar henüz başlangıç düzeyindedir ve tasarımcılar, daha önceki deneyimler ışığında benzetme yoluyla ve basit ampirik formüller ile kabaca yapılan hesaplamalardan faydalanmaktadır.

Bu çalışmada ince sac malzemede u-kesitli simetrik profil için makaralı bükme işleminde en sık görülen kusurlardan olan kenar dalgalanmaları L8 tam eşleştirmeli deney tasarımı ile incelenmiştir. Deneysel çalışmada aşağıda Şekil 1'de sunulan makara dizilişi (A), kenar yüksekliği (sac genişliği) (B) ve malzeme cinsi (C) değişkenlerinin etkileri ve aralarındaki önemli etkileşimler tespit edilmiştir. Şekil 1.a'da kenar yüksekliğinin makaralı bükme işleminde en büyük etkisi olduğu, makara dizilişi ile malzeme cinsinin de eşit miktarda etkileri gözlenmiştir. Şekil 1.b ile d'de kenar yüksekliği ile malzeme cinsi ve makara dizilişi ile kenar yüksekliği arasındaki etkileşimler tespit edilmiştir.



Şekil 1. a) Tüm etkilerin grafiği b) AB etkileşimi c) AC etkileşimi d) BC etkileşimi

Bu çalışmada ayrıca makaralı bükme işlemi için sonlu elemanlarla analiz ve hesaplama yapabilecek bir model geliştirilmesi amacıyla dinamik açık algoritmalar kullanan bir ticari paket yazılımından yararlanılmıştır. Bu yazılım ile birden fazla parça ile hareket halinde temas, sürtünme, kayma, eleman sayısının yüksek olması gibi unsurlar göz önüne alınarak, daha kısa sürede sonuçlar veren bir model geliştirilmiştir.

Hazırlanan sonlu elemanlarla analiz (SEA) modelleri, deney sonuçlarını hesaplaması amacıyla, deney kombinasyonlarına karşılık gelen geometriler ile bilgisayar ortamında çalıştırılmıştır. SEA sonuçları deneysel çalışma ile karşılaştırıldığında daha dalgalı kenar ve daha yüksek kenar dalgası büyüklükleri elde edilmiştir. Ancak her kombinasyonun SEA analizi ile elde edilen sonuçları ile davranış ve deney sonuçları arasında güçlü bir korelasyon (0,97) tespit edilmiş ve modelin makara dizilişi, malzeme ve kenar yüksekliği değişkenlerinin etkilerinin simülasyonunda başarılı olduğu sonucuna varılmıştır. Aynı modelin makara açıları arasındaki farkın 30° 'yi aşmayacak şekilde uyarlanması suretiyle iyileştirme hesabında kullanılmış ve gözle görülür iyileştirmeler gözlenmiş ve modelleme yaklaşımı nedeni kusurların değerlendirilmesinde ilave hata payı tespit edilmiştir.

Sonuçları şu şekilde özetlemek mümkündür:

1. Kenar yüksekliği ürün kalitesine etkisi en büyük olan değişkendir. Etki değeri yaklaşık olarak 3,5 birim (diğer iki etkiden de yaklaşık iki kat büyüklükte) olarak hesaplanmıştır. İşleme doğrudan etkisi olan makara dizilişindeki değişiklikte 1,6 birim ve malzemede alüminyum yerine sünek çelik kullanılmasının yarattığı olumlu etki ise 1,5 birim olarak tespit edilmiştir.
2. Kenar yüksekliği ve malzeme cinsi arasında güçlü bir etkileşim gözlenmiştir. Etki değeri yaklaşık olarak 0.8 birim olarak elde edilmiştir. Kenar yüksekliği kısa (12

mm) olduğu zaman her iki malzeme ile de kenar dalgalanmaları yaklaşık %50 ila %70 oranlarında azalmış ve belirgin şekilde daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

3. Ayrıca, makara sayısı/dizilişi ve kenar yüksekliği arasında önemli bir etkileşim gözlenmiştir. Etki değeri yaklaşık olarak 0.7 birim olarak elde edilmiştir. Açı farkının azalması çıkışta 15° azalması ve ilave makara seti eklenmesi ile kenar dalgalanmaları %30 ila %47 oranlarında azalmıştır.
4. Makara sayısı/dizilişi ile malzeme cinsi arasında etkileşim bulunmamaktadır.
5. Kombinasyon olarak A1 (0°-15°-30°-45°-85°) B2 (kısa kenar yüksekliği: 12 mm) ve C2 (sünek çelik) ile kenar dalgalanmasının en aza indirilmesi (dalga ortalaması 0.29 ± 0.12 elde edilmiştir) açısından en iyi sonuç elde edilmiştir.
6. Kenar dalgalanmaları ile düşey düzlemde eğilme arasında düşük bir korelasyon (0.23) elde edilmesinin çıkış makarasında 40° ve 55° olarak açı farkının yarattığı ilave eğilme nedeniyle sönümlendiği düşünülmektedir.

SEA modeli ile elde edilen sonuçları ise şu şekilde özetleyebiliriz:

1. Makaraların hareketi ile sac malzemenin ittirilmesi suretiyle makara girişlerinde yaşanabilecek sorunlar (özellikle çıkış makara setine) gözlenebilmiştir. Bu vesile ile gerçek hayatta alınan önlemlere (köşe yuvarlatılması) SEA modeli de olumlu tepki vermiştir. 40° ve 55° açı farklarında sac malzemenin çıkış makara setlerine düzgün bir şekilde girmesi için makara setlerinin gerçek makara setlerindeki gibi modellenmesi ile SEA modeli sonuçları deney sonuçlarına yaklaşmıştır.
2. Klasik kabuk elemanları yerine çarpılma etkisini de içerecek şekilde geliştirilmiş kabuk elemanları kullanılması ile çıkış makara setlerinde yaşanan sorunlar giderilmiştir.
3. Deneyler ile elde edilen kenar dalgalanma ve düşey düzlemde eğilme davranışlarının SEA ile hesaplanmasında kenar dalgalanma için yüksek bir korelasyon (0,97) değeri ve düşey düzlemde eğim için orta bir korelasyon (0,51) gözlenmiştir. Düşey düzlemde eğilme için daha düşük bir korelasyon elde edilmesinin SEA modelindeki giriş kısmında 210 mm'lik y-yönünde hareket kısıtlaması, çıkış makara seti için gereken ilave elemanların sac malzeme boyundan 85 mm kısaltılması suretiyle sağlanması, kenar dalgalanması değerlerindeki ilave farklar ve makara setlerindeki elemanlar arasında dönme nedeniyle oluşan ilave açıklıktan kaynaklandığı düşünülmektedir.
4. SEA modeli ile alınan sonuçların Taguçi yöntemi ile incelenmesi ile elde edilen etki büyüklükleri birbirlerine yakın çıkmıştır. Ancak makara dizilişi doğrudan etkisi daha 2.34 birim olarak (deneylerdeki 1.6 birim yerine) SEA analizinde alınmıştır. Bu sonucun ilave makara kullanılması suretiyle sac malzemenin aldığı yolun uzaması ve çıkış makarasındaki 15° düşme nedeniyle basma yönündeki kuvvetlerin azalması ile kabuk elemanların daha iyi sonuç vermesi şeklinde yorumlanmıştır.
5. Bhattacharyya ve diğerlerinin çalışmalarında sundukları form uzunluğunun yaklaşımı ile SEA modeli ile alınan sonuçlarda uyum gözlenmiştir.
6. İyileştirme hesabı için dört makara seti kullanımı (0°-25°-50°-70°-75°) ve makara setleri arasında 30°'yi aşmayacak geometri kullanılması ile yapılan iyileştirme hesaplarında, kenar dalgalanması 0.17 mm ila 0.5 mm arasında büyüklükleri

arasında ölçülmesi ile düşey düzlemde 5 mm ila 10 mm arasında değerler elde edilmesi modelleme yaklaşımından kaynaklanan kalıcı kusur olarak değerlendirilmiştir. Benzer kesitler için aynı modelleme yaklaşımı kullanılarak bu düzeyde bir kusur gözlenmesi, üretilecek olan makinanın hatasız ürün elde edebileceği şeklinde yorumlanabilir.

7. 0° - 25° - 50° - 70° - 75° makara dizilişi ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında çıkış açısının 10° azaltılması suretiyle 0° - 15° - 30° - 45° - 75° düzeneğinde toleranslar dahilinde hatasız ürün elde edileceği öngörülmektedir.
8. Ortalama aksenal gerinim A2 (15° - 30° - 85°) kombinasyonunda A1 (15° - 30° - 45° - 85°) kombinasyonuna göre yaklaşık % 250 oranında büyük oluşmakta ve makara seti girişinde daha şiddetli düşmektedir. Dalgalanmanın ilk çekirdeklenmesinin 30° lik makara seti öncesinde başladığı gözlenmiştir. Ardışık istasyonlar arasında fazla açı vermenin kenar dalgalanmasını artırdığı bir kez daha kanıtlanmıştır.
9. İşlem sonrası elde edilen iç enerji, artık gerilme ve gerinim değerleri incelendiğinde, kenar dalgalanmaları hakkında yalnızca iç enerji ile bir hüküm vermenin mümkün olmadığı, işlem boyunca oluşan gerinimin de etkileri olduğu değerlendirilmiştir.
10. Belirgin kenar dalgalanması görülen hallerde kenar dalgalanması genel olarak artan iç enerjiye paralel olarak artmaktadır. Bu durumda gerinim değerleri yükselirken, artık gerilmelerin daha düşük seviyelere indiği gözlenmiştir.
11. Bükülen kenar ucundaki toplam iç enerjideki değişim ile kenar dalgalanması arasında birebir ilişki vardır. Ancak dalgalanma olgusunun temelinde yatan, aksenal germe, makara önünde ve içinde aksenal basma, enerji doyumu, kararsızlık, bifurkasyon ve burkulma (buruşma) ile doğrudan ilişkilendirmek eldeki bilgilerle mümkün değildir.
12. Profil kenarındaki malzemenin toplam iç enerjisi kenar dalgalanması üstünde belirgin biçimde etkinken, bu enerjinin kenar boyunca değişimi ile dalgalanmanın yeri, şiddeti ve sıklığı konusunda hüküm vermek mümkün değildir.
13. Diğer SEA çalışmalarında gösterilemeyen kenar dalgalanması, düşey düzlemde eğilme gibi kusurların aynı anda elde edilmesinin ve davranışlarının deney sonuçları ile uyumlu çıkmasının modelleme yaklaşımının, sac malzemenin davranışının hesaplanması açısından, güçlü yanları olarak değerlendirilmiştir. Kısıtlamaların kaldırılması ile asimetric parçalarda burulma gibi diğer kusurlar açısından da sağlıklı sonuçlar alınabileceği değerlendirilmiştir.

Sonuçlar ışığında makaralı bükme işleminde makara ve tezgah tasarımında kenar dalgalanma sorunu daha iyi anlaşılmıştır. Ayrıca SEA modeli yardımı ile makaralı bükme işleminde diğer tasarım değişkenlerinin etkilerinin bilgisayar ortamında incelenebilecek ve yapılan değişikliklerin neden olabileceği farklı davranışlar makara imalatı öncesinde tespit edilebilecektir.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION AND FINITE ELEMENT ANALYSIS OF EDGE WAVINESS DEFECT DURING COLD ROLL FORMING OF THIN SHEET METAL

SUMMARY

Cold Roll Forming (CRF) is gaining more significance among the other metal forming processes in today's manufacturing environment. CRF is the process of forming the sheet metal by passing it through a series of rotating rolls arranged in tandem that bend and shape the sheet metal. The design of the process is still based on empirically gained data and practical experience of employees. Systematic experimental researches have been done with limited forms because of high expenditure and costs.

On the producers' side it is very important to deliver the CRF machine as early as possible once an order is received. However, only after production, the CRF machines can be tuned to prevent any undesired shape defects which require additional time. In some cases the design fails which needs rework on the machine. The time loss is the biggest risk on the customer side as it is a mass production machine and on the other side the machine producers have to take tuning and design change costs into account which are always accompanied with delay and negative effects on reputation.

Due to complex deformation unlike bending or deep drawing, it requires careful modeling of CRF process. The most frequent defect observed during CRF process of symmetrical u-shape profiles is the edge waviness. The web-buckling, twist, bend in the horizontal and vertical plane are the other defects, which can be observed during CRF. In this field the computer aided design tools are too primitive for simulation of the process and are limited with the empirical methods & analogy with the previous similar shapes.

In this study the edge waviness during CRF process of thin sheet metal is investigated experimentally with Taguchi approach of full factorial L8 design method. During the experimental study the parameters of roll setup (with maximum angle increments of 40° and 55°) (A), flange length (sheet width of 110 mm and 100 mm) (B) and material (aluminum and mild steel) (C) effects on edge waviness and interactions between them were investigated. As seen in the Figure 1.a the flange length has the biggest effect in magnitude. The roll setup and material type has equal effects and are observed to have equal magnitudes after flange length. In addition to these effects, the interactions shown in Figure 1.b 1.c and 1.d between the flange length, material type and roll setup are observed and detailed in this study.

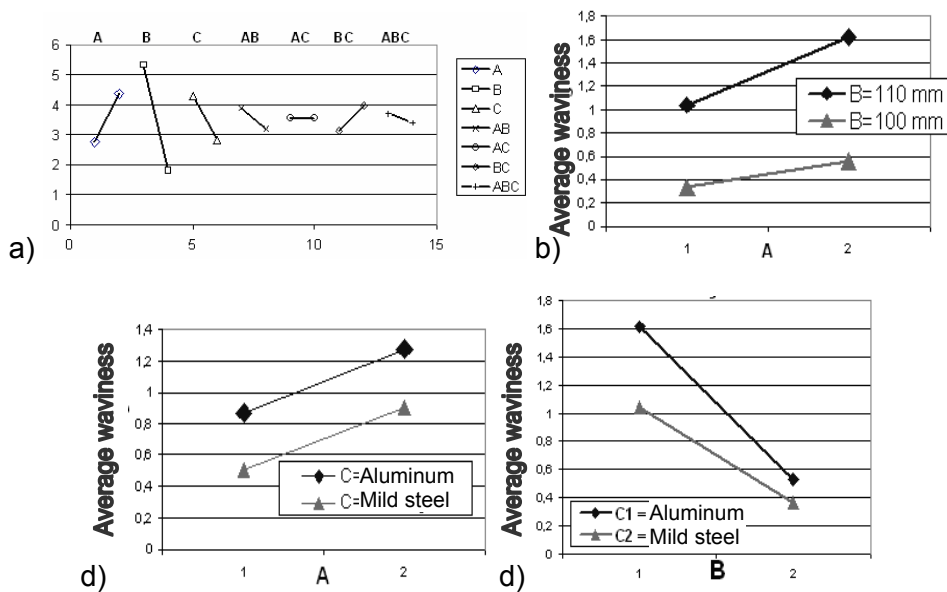


Figure 1. a) Effects b) AB interaction c) AC interaction d) BC interaction

In addition to the experimental study a finite element analysis model is developed in order to simulate the experimental results and to predict sheet metal behavior. Taking into account of the large deformation, contact with more than one part, friction, slippage, and large number of elements in the modeling of the CRF process, it is decided to use a finite element program which has explicit algorithms in order to obtain results in a short period of time. For this purpose a commercial finite element software package LS-DYNA which has explicit algorithms has been used. The finite element model combinations for each experimental setup were developed and analyzed. The results were compared with the obtained experimental results. A strong correlation (0,97) was observed between the finite element analysis results and the experimental results. It was concluded that the finite element model is successful in simulating the effects of the parameters of roll setup, flange length and material type on edge waviness. In order to calibrate and observe improvement predictions, the model was adapted to simulate two roll setup combinations which have angle increments below or equal to 30° . The model was successful again and considerable amounts of improvements were observed and the error is noted as the overestimate amount when interpreting results for different combinations.

The results can be summarized as follows:

1. Flange height has the biggest effect on the finished product. The effect value is calculated as 3,5 units (two times of the other two effects). Among the other direct effects the roll setup is calculated as 1,6 units and material type (using aluminum instead of mild steel) positive effect is calculated as 1,5 units.
2. A strong relation has been observed between the flange height and the material type which has an effect value of 0.8 units. When the flange height is short (12 mm) the average waviness using both materials has dropped between 50% and 70% and better results were obtained.
3. In addition to the above interrelation, another interrelation has been observed between roll setup/number and flange height which has an effect value of 0.7

units. Decreasing the angle difference at the exist roll set of 15° and including one more roll the results were improved by 30% and 47%.

4. There was no interrelation observed between the roll setup/number and material type.
5. The lowest average waviness is obtained using A1 (0°-15°-30°-45°-85°) B2 (short flange: 12 mm) and C2 (mild steel) combination with a value of 0.29 ± 0.12 .
6. A weak correlation observed (0.23) between the average waviness and the vertical bow. It is interpreted as the low value is caused by the large angle difference (40° and 55°) at exit rolls which is damping the correlation.

Finite Element Model (FEM) results can be summarized as follows:

1. Pulling the sheet via roll movement, the problems were observed during roll entrances (especially at exit roll). With the similar behavior i.e. edge fillet FEM gave considerable improvement in results especially at the 40° ve 55° exit rolls and the results obtained more .
2. Instead of using classical shell element, the element formulation including warping correction solved the divergence problem at the exit rolls.
3. Between the FEM and experimental results, a strong correlation (0.97) was observed for edge waviness and a medium correlation for vertical bow behavior. The extra y-axis constraints on the nodes for the first 210 mm on the sheet metal, modeling the exit rolls with more elements and reducing the length of the sheet metal about 85 mm, additional edge waviness obtained in the FEM results and additional gap due to modeling of the roll sets with 100 elements can be listed for further reducing the correlation between the experimental and FEM results.
4. The magnitude of the effects calculated with Taguchi method using the FEM results, are found to be close with the effects obtained from experimental results. The roll setup direct effect is obtained as 2.34 units (instead of 1.6 units in experimental results) from the FEM results. This increase in the effect is evaluated as the result of decrease in the compressive forces due to usage of additional roll sets and increased gap and additional reduction the angle difference of 15o between the A1 and A2 roll set up combinations, which is further improving the results of shell elements.
5. The forming length concept introduced by Bhattacharyya et al, is observed in the FEM results.
6. In order to calibrate the model, the simulation was repeated reducing the exit roll angle by 10° and keeping the angle difference between each consecutive roll set under 30° (0°-25°-50°-70°-75°). The results for edge waviness which the height of the waves were measured between 0.17 and 0.5 mm and vertical bow measured between 5 mm and 10 mm, are interpreted as the inherent source of error due to the FEM approach in this study. Therefore, for similar profiles if the same FEM modeling approach is applied, and if the results are at the same level, then it can be interpreted as the profiles can be obtained in real life without visible defects.

7. When compared with the results obtained by the 0° - 25° - 50° - 70° - 75° roll setup, if the exit roll angle of A1 combination of the experimental roll setup, is reduced by 10° (i.e. 0° - 15° - 30° - 45° - 75°) a desirable profile is predicted to be obtained within the limits of the tolerances.
8. In the A2 (15° - 30° - 85°) roll setup combination compared to the A1 (15° - 30° - 45° - 85°) roll setup combination, the mean axial strain is nearly 250% higher and it is also observed that it is reduced more sharply in the entrance of the roll. In addition the first formation of the edge waves is observed to begin before the 30° roll station. Big increase in the consecutive roll angles causing increase in edge waviness is confirmed.
9. When the internal energy, residual stress and strain results obtained upon completion of the process are investigated, it is understood that a decision can not be given with only internal energy criterion, but the strain formation throughout the process has considerable effects on the edge waviness.
10. The edge waviness is increasing in parallel to the internal energy when there is considerable edge waviness formation. In this case, whilst the strain values are increasing, residual stress values are dropping to lower values.
11. There is a relation between the edge waviness and the change in the internal energy. However, it is not possible to setup a direct relation with the basic phenomenon of axial stress, axial compression in front of the roll sets and in the roll sets, energy saturation, instability, bifurcation and buckling (wrinkling) which are the basics of waviness.
12. The total internal energy of the flange section has considerable effect on the edge waviness, however it is not possible to determine the locations, magnitude and frequency of the edge waviness, with the distribution of the internal energy along the flange section.
13. Unlike other FEM studies, the introduced model in this study predicts multiple errors (i.e. edge waviness, vertical bow) which are in comply with the experimental results, and the approach is found to be more reliable in order to predict the sheet metal behavior. In addition, it can be applied to various cross sections (e.g. asymmetric) and can predict additional defects like horizontal bow, twist and flare ...etc.

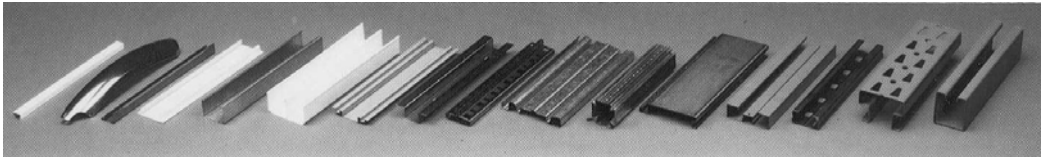
The CRF machine designer can benefit the experimental results and use the finite element model to simulate the effects of the design parameters changes which may be needed and also use the results to prevent edge waviness before the machine is actually produced.

1. GİRİŞ

Makaralı bükme işlemi veya İngilizce terimi ile “Cold Roll Forming” günümüzde giderek artan bir şekilde sanayide kullanım imkanı bulmaktadır. Türkçe’de bu işlem için “makaralı bükme” kavramının kullanılmasının uygun olacağı düşünülmektedir. İşlem, arka arkaya dizilen makaralar vasıtası ile sac malzemenin kenarının oda sıcaklığında kademeli olarak bükülmesi olarak tarif edilebilir. Bükme işlemi ile şekil verilebilen hemen her malzeme makaralı bükme işlemi ile de bükülebilmektedir.

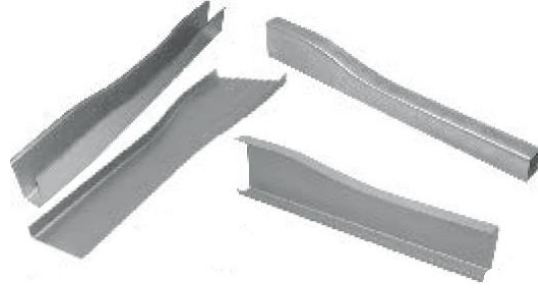
Makaralı bükme işlemi, 20. yüzyılın başına dayanan nispeten yeni bir işlemdir. Carl M. Yoder, ilk makaralı bükme makinasını “Yoder Y-70 Mud Strip Forming Machine” 1910 yılında otomobil çamurluklarının imalatı için tasarlayıp imal etmiştir. İşlemin yaygınlaşması ise özellikle 1950’li yıllardan itibaren başlamış ve Kuzey Amerika’da 1970’li yıllardan itibaren sac levhadan imal edilmiş ürünler %30 ila %50 arasında bir oranda makaralı bükme işlemi ile imal edilmeye başlanmıştır. Geçen süre zarfında artan rekabet sonucu daha esnek üretim hatları ve daha dar toleranslar içinde ürünlerin elde edilmesi, makaralı bükme makinaları üreticilerinden beklenmektedir [1].

Makaralı bükme işlemi ile raf ayakları, çatı kaplamaları ve dekoratif ürünlerin yanı sıra cam kenar tutucuları, tüp imalatı, beyaz eşya parçaları, PVC pencere iç profilleri, kablo taşıyıcılar, otomobil tamponu vb. gibi çok çeşitli ürünler imal edilmektedir. Şekil 1.1’de görülen profillerde sabit kesitli ürünler yer almaktadır. Bu konuda yapılan araştırmalar ile Şekil 1.2’de görülen değişken kesitli alanların da makaralı bükme işlemi ile ekonomik olarak imal edilmesine çalışılmaktadır. Bu yöndeki gelişmeler ile makaralı bükme işlemi sanayide daha çok kullanım alanı bulma yönünde önemli bir avantaja sahip olacaktır.



Şekil 1.1: Makaralı bükme işlemi ile elde edilen çeşitli ürünler

Makaralı bükme işlemi tabiatı gereği büyük üretim miktarlarında diğer işlemlere göre büyük bir rekabet avantajı sağlamaktadır. Bu nedenle önümüzdeki dönem içinde de gelişmeye son derece açık bir alan olarak durmaktadır. Sweeney ve Grunewald'ın çalışmalarında, otomotiv sanayisinde tasarımcıların, makaralı bükme işlemine uyumlu parçaların seçilmesi ve varolan üretim teknikleri yerine makaralı bükme işlemi ile, fizibilite analizi yaparak, imalata karar vermeleri halinde, daha çok çeşitli parçanın makaralı bükme ile üretilebileceği ve bunun da büyük bir rekabet avantajı sağlayacağı belirtilmektedir [2].



Şekil 1.2: Değişken kenar kesitli parça örnekleri

Bu konuya paralel olarak, Copra® FEA RF yazılımının sahibi DataM firması Genel Müdürü Sn. Albert SEDLMAIER'in ifadesine göre Almanya'da otomobil imalatçıları yan sanayi firmalarını makaralı bükme işlemi ile imal edilmiş daha çeşitli ürünler için yatırım yapmaya ve alternatifler üretmeye zorlamaya başlamıştır [3].

Makaralı bükme tezgahı Şekil 1.3'te gösterildiği gibi genellikle 20 ila 25 arasında değişen makara sayısından oluşmakta ve kontrol edilebilen ve edilemeyen çok çeşitli değişkenler ürün kalitesine etki etmektedir. Ayrıca işlemin daha iyi anlaşılması ve imalata geçmeden bilgisayar ortamında optimizasyonu sağlanması ve birikimlerin uzman sistemler ile tasarıma adapte edilmesi, imalatçı firmalar açısından düşük maliyetle makina tedariki için önemli beklentilerdir.

Makina üreticileri için bilgisayar destekli tasarım ve analiz programları arasında çeşitli firmaların ürünleri bulunmaktadır. Bunlardan belli başlı olanları COPRA, PROFIL, CARDAM'dır. Bu programlar, makara ve tezgah tasarımı için teknik resimlerin çıkarılması yanı sıra mevcut ve sık kullanılan ampirik bağıntılar ile analizler yapabilmektedir.

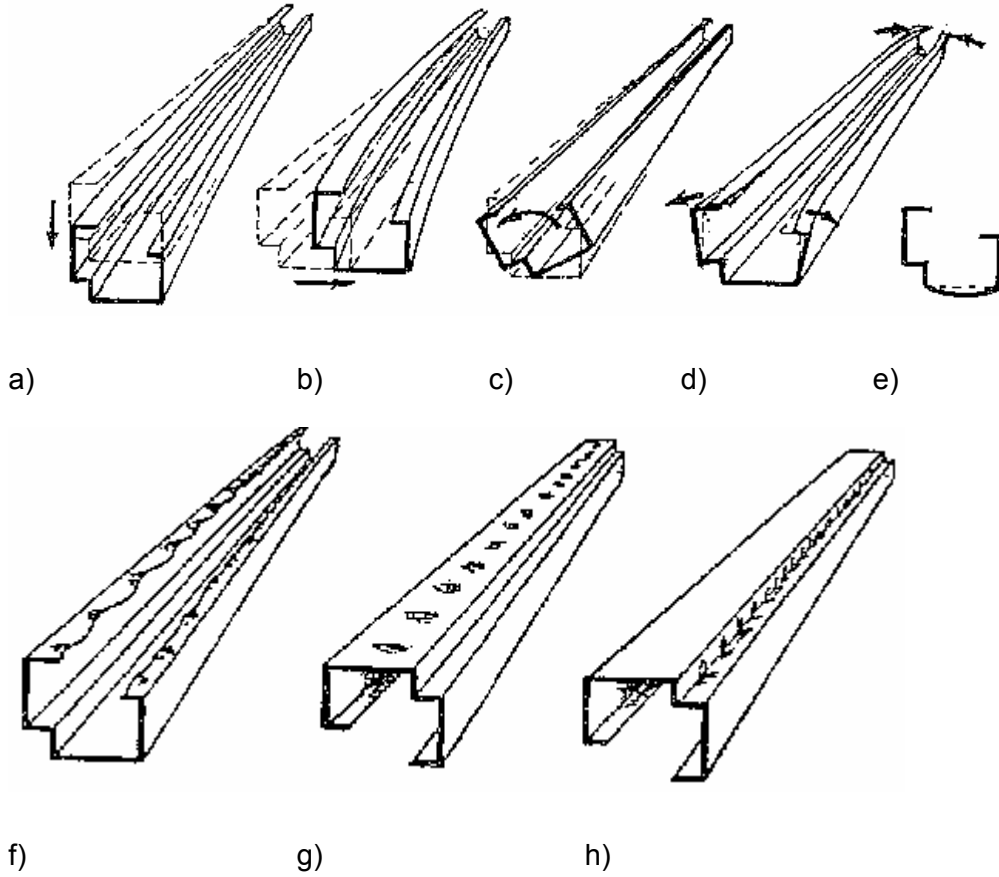
DataM firmasının ürünü olan COPRA-RF ® programında bulunan DTM modülü açıklamasında, SEA ile karşılaştırılmış ve deneysel çalışmalarla doğrulanmış ilave

bağıntılar ile SEA ile uzun zaman alabilecek analizlerin 5 saniye gibi kısa sürede kullanıcıya sağlandığı ifade edilmektedir. Ancak bu tür analizlerin yeterli olmadığı kısımlar için Copra programında MSC-MARC ® programına, UBECO firmasının PROFIL programında ABAQUS programına girdi dosyası hazırlama eklentileri bulunmaktadır. DataM firması genel müdürü Sn. Sedlmaier makaralı bükme tezgah tasarımında “form açısı metodunun” kendi deneyimlerine göre başlangıç noktası olarak hala en iyi alternatif sunduğunu belirterek daha kapsamlı çözümler için işlemin daha iyi anlaşılabilmesi ve Şekil 1.2’de gösterilen değişken kesitli ürünlerin makaralı bükme işlemi ile daha kolay üretilebilmesi için çalışmalara devam ettiklerini vurgulamıştır [3].



Şekil 1.3: Makaralı bükme makinası

Makaralı bükme işleminde ürün kalitesine etkisi olan çok sayıda değişken yer almaktadır. Söz konusu değişkenlerin fazlalığı ve kombinasyon halinde birbirleri ile etkileşimleri bu alanda matematiksel bir model tanımlamadaki en büyük engellerden biridir. Makara setlerinin üretildikten sonra karşılaşılan tipik kusurlar, Şekil 1.4’te sunulmaktadır. Bu kusurlardan 1.4.f’de verilen kenar dalgalanması, u-tipi açık profillerde en sık rastlanan kusurlardandır. Watari ve Ona tarafından ifade edilen dalga yüksekliğinin dalga genişliğine oranının 2×10^{-3} ve daha yüksek olduğu hallerde kenar dalgalanması gözle fark edilmektedir [4]. Asimetrik profillerin makaralı bükme işleminde ise burulma veya eğilmeler makaralı bükme işleminin doğası gereği daha sık görülmektedir.



Şekil 1.4: Makaralı bükme işleminde görülen ürün bozuklukları a) Düşey eğilme b) Yatay eğilme c) Burulma d) Açılma e) Bel verme f) Kenar dalgalanmaları g) Cep oluşumu h) Herringbore etkisi

Nallapati tarafından derlenen, makaralı bükme işleminden beklenen örnek tolerans değerleri ve ürün kalitesine etki eden değişkenler, Tablo 1.1 ve Tablo 1.2'de sunulmuştur [5]. Özellikle tolerans değerleri konusunda günümüzde daha dar değerleri karşılayan makinalara olan talep nedeni ile makara tasarımında bilgi birikimi giderek daha da önem kazanmaktadır.

Tablo 1.1: Makaralı bükme işleminde örnek tolerans değerleri [5]

Ölçü	Tolerans Değeri	Notlar
Uzunluk	$\pm 0,4$ mm ila 1,6 mm	Otomatik kesme kalıbı: Hıza ve uzunluğa bağlı olarak
Kesit	$\pm 0,4$ mm ile 0,8 mm	
Açı	$\pm 1^\circ$ ila 2°	Malzeme özelliklerinin değişkenliğine bağlı
Burulma	$<1,5^\circ$	Elle düzeltme hariç
Düzlük	12,5 mm ila 25 mm / m	Takımlara bağlı

Tablo 1.2: Makaralı bükme işlemini etkileyen değişkenler [5]

Kesit Tasarımı	Makara Tasarımı	İşlem Koşulları	Malzeme Özellikleri	Kesitsel Kalite
Şekil	Çiçek deseni	Tezgah tipi	Gerilme	Düşey eğim
Adımların uzunluğu	Geçiş yüksekliği	Makaralar arası mesafe	Poisson Oranı	Yatay eğim
Kesit genişliği	Düşey merkez uzaklığı	Ayar koşulları	Kritik Akma gerilmesi	Burulma
Boyutsal ve Açısal tolerans değerleri	Kesit oryantasyonu	Makara durumu	En az bükme çapları	Boyutsal hassasiyet
Düzlük	Yardımcı İşlemler	Makara hizalama	Geri yaylanma	Yüzey kalitesi
Bükme çapı / kalınlık oranı	Kenar makaraları	Makara basıncı	Sac parça toleransları	Burkulma izleri
Kesit derinliği	Makara yüzeylerinin kalitesi	Yağlama	Yüzey özellikleri	Çatlama
Yüzey çizikleri Yivler	Sac veya parça beslemesi	Makara Kalitesi	Malzeme gözenekleri	Kenar deliklerinin yerleri

Makaralı bükme tezgahı doğası gereği seri imalat amacıyla kullanılmaktadır. Bu konuda imalatçının yeni bir tezgah siparişi verirken en büyük beklentisi en kısa sürede tezgaha kavuşmaktır. Ayarlar ile kaybedilen zaman (bazen haftalar veya aylar alabilmektedir), sipariş veren imalatçı için çok önemlidir. Mevcut yazılımlar, makina imalatçıların işlerini büyük ölçüde kolaylaştırmakla birlikte henüz tam bir çözüm sunulmuş değildir. Günümüzde makaralı bükme işlemi için tezgah tasarımı deneysel olarak elde edilmiş bilgi birikimine ve tasarımcının ve/veya çalışanların pratik deneyimlerine bağlıdır. Eğer yeni imal edilen bir makina ile elde edilen ürünlerde bozukluk görülürse, makinanın ince ayarlar ile düzeltilmesi veya bozuk parçaların çıkışta “türk-kafası”, “ütüleme” ..vb gibi ek işlemlerle düzeltilmesi gerekmektedir. Ancak ek işlemler yapıldığı hallerde bile bu bozukluklardan izler kalabilmekte veya yüzeydeki bozukluklar için boya veya başka şekillerle kaplama yapılarak bu bozukluklardan dolayı ürünün estetik olarak cazibesini yitirmesi önlenmeye çalışılmaktadır. Makina üreticileri bu nedenle daha muhafazakar tasarımlar yapmakta, başarılı olmuş modelleri benzetme yolu ile kullanmakta veya ilave makara kullanarak bu tip riskleri almamaya çalışmaktadırlar. Özellikle imal edilen ürünlerin birçoğunda estetik kaygılar ön planda olduğu için kaliteli ürünler ve mükemmel yüzeyler bu alanda yatırım yapan şirketler için son derece önemli bir rekabet avantajı sağlamaktadır.

Yukarıda vurgulanan nedenlerle imalatçılar daha deneyimli firmaları tercih edip, bunun karşılığında daha büyük bir maliyete katlanmayı tercih etmektedirler.

Makaralı bükme işleminde karşılaşılan kusurların kontrol edilmesi ve önceden hesaplanması alanında SEA çalışmalarının gelişmesi ve maliyeti yüksek deneylerin bilgisayar ortamında yapılması ile elde edilecek bilgi birikimi bu alanda tecrübesiz imalatçılar için avantaj sağlayacaktır. Makaralı bükme işlemi için makina imal edilmesi ile ilgili riskler de azaldıkça sanayi imalatında payı artacak ve daha ucuz fiyatlarla imal edilen ürünlerin her sektörde talebi artacaktır.

Özet olarak, makaralı bükme işleminde ürün kalitesine etki eden çok sayıda değişken olması ve karmaşık üç boyutlu deformasyonlar içermesi, diğer imalat işlemlerine kıyasla, bu alanda analitik çözümleri ve işlemin modellenmesi çalışmalarını güçleştirmektedir. Sistematik olarak deneysel çalışmalar, deney düzeneğinin pahalı olması nedeni ile, yapılamamaktadır. Günümüzde daha dar tolerans değerlerinin talep edilmesi ve gelen kesitlerin değişkenliğinin giderek artması nedeni ile makaralı bükme işlemine etki eden değişkenlerin daha detaylı incelenmesine ve yeni deney yaklaşımlarının tatbik edilmesi ile değişkenlerin ve etkileşimlerinin daha iyi anlaşılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca deneysel çalışmaların pahalı olması nedeni ile SEA yazılımlarının daha etkin kullanılması ve deneylerin bilgisayar ortamında daha güvenilir bir şekilde yapılması pahalı deney düzenekleri nedeniyle kısıtlı kalmakta olan çalışmaları zenginleştirecektir.

Bu çalışmada makaralı bükme işlemi esnasında en sık karşılaşılan sorunlardan olan kenar yüzeylerde dalgalanma kusuru davranışının daha iyi anlaşılması ve bilgisayar ortamında analiz edilmesi hedeflenmiştir. Kenar dalgalanma kusurlarının daha çok görüldüğü ince sac malzeme ve simetrik u-tipi açık profil temel alınarak deneysel çalışma yapılmış ve deney sonuçlarını bilgisayar ortamında hesaplayacak bir sonlu elemanlar modeli geliştirilmesi hedeflenmiştir.

Bu amaçla kenar dalgalanmalarına etkisi olduğu önceki çalışmalarda bildirilen makara dizilişi, kenar yüksekliği ile malzeme cinsi değişkenleri seçilerek ve Taguçi yaklaşımı ile deneysel çalışma yapılarak etkilerin ve etkileşimlerin incelenmesi benimsenmiştir. Değişkenlerin etki ve etkileşimlerinin daha iyi anlaşılması ile kenar dalgalanmasının kontrol edilmesinin kolaylaşacağı düşünülmektedir.

Deney sonucu elde edilen sac profillerin üç boyutlu tarama işlemi ile nokta bulutu halinde sayısallaştırılarak bilgisayar ortamına aktarılarak geometrik olarak incelenmesi planlanmıştır. Bu çalışmanın ikinci kısmında ise makaralı bükme işlemini bilgisayar ortamında canlandırmak ve deneylerde elde edilecek sac malzeme davranışını bilgisayar ortamında hesaplamak için bir sonlu elemanlar analizi (SEA) modeli geliştirilmiştir.

Bu çalışmayı oluşturan bölümler kısaca aşağıdaki gibidir.

Birinci bölümde makaralı bükme işleminin genel değerlendirilmesi ve uygulama alanları tanıtılmış, kısaca çalışma hedefleri özetlenmiştir.

İkinci bölümde makaralı bükme işleminin mekaniği açıklanmış ve makaralı bükme işlemi alanında yapılan çalışmalar özetlenmiştir. Bu çalışmadaki hedefler ve yaklaşım farkı açıklanmıştır.

Üçüncü bölümde çalışma metodolojisi kısaca özetlenmiştir.

Dördüncü bölümde Taguchi (Taguchi) yaklaşımı ile deneysel olarak kenar dalgalanması davranışının anlaşılması amacıyla yapılan deneysel çalışma yaklaşımı açıklanmış ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

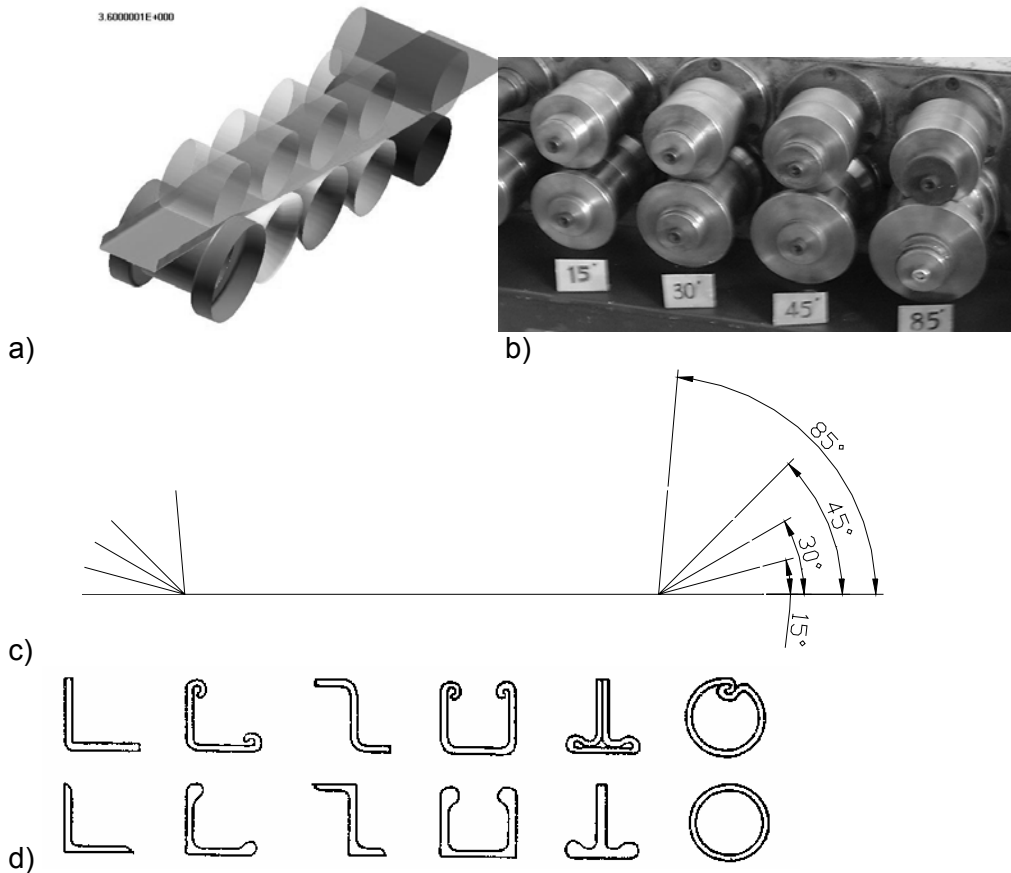
Beşinci bölümde dinamik açık algoritmalar kullanan sonlu elemanlar yazılımı ile SEA modeli geliştirilmiştir. Bu model kullanılarak, kenar dalgalanmalarının davranışlarının hesaplanması amacıyla bilgisayar ortamında deneyler tekrarlanmış, elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. SEA modelinde bulunan ilave hata payının hesaplanması için daha önceki çalışmalarda hatasız profil elde edileceği vurgulanan açı farkları dikkate alınarak yeni makara dizilişleri ile iyileşme yönünde modelin kullanılabilirliği gösterilmiştir.

Altıncı bölümde genel vargılar ve ilave olarak yapılabilecek çalışmalar sunulmuştur.

2. “MAKARALI BÜKME” İŞLEMİNİN MEKANIĞI

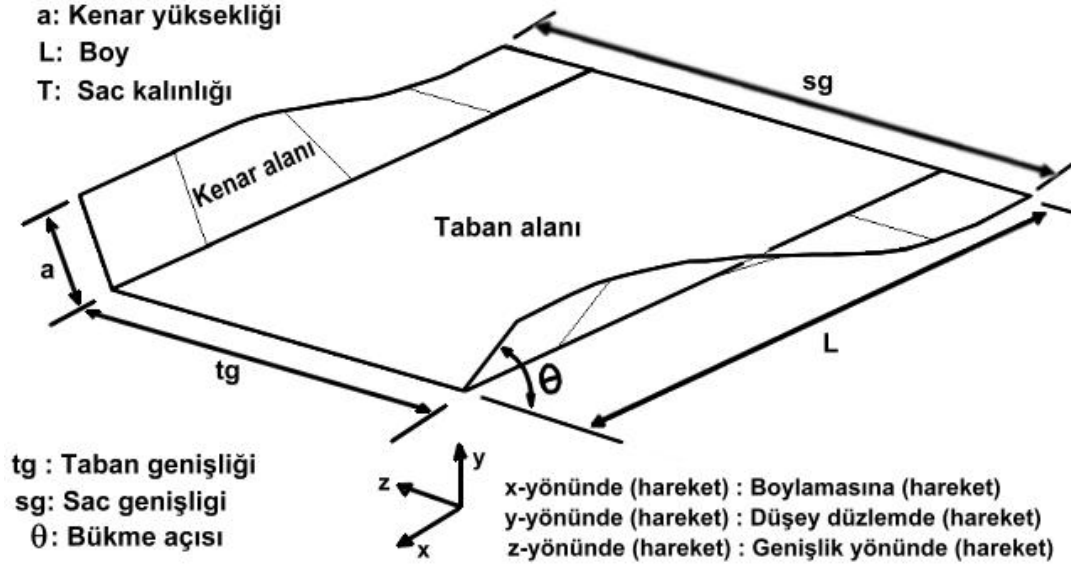
2.1 Genel

Makaralı bükme işlemi temel olarak Şekil 2.1’de gösterildiği biçimde arka arkaya yerleştirilmiş makara setlerinin hareket ettirilmesi ile sac malzemenin makaralar arasından geçerken kenarının bükülmesi prensibine dayanmaktadır. Her bir makara seti Şekil 2.1.a, b ve c’de gösterildiği gibi belli bir açı verilerek (örneğin u-profil imalatında 15° , 30° , 45° , 85° gibi) üretilip makaralı bükme makinasında arka arkaya monte edilmektedir.



Şekil 2.1: Makaralı bükme işlemi a) Makaralı bükme işlemi temsili resmi b) Makara dizilişi örneği c) Her makara setinde kenar bükme açıları örneği d) Makaralı bükme işlemi ile elde edilmiş ürünler (üstte) ve ekstrüzyon yöntemi ile elde edilmiş ürünler (altta)

Bu çalışmada sac malzeme üzerinde kavramlar Şekil 2.2'de sunulduğu şekliyle kullanılmıştır.



Şekil 2.2: Çalışmada kullanılan kavramlar

Makaralı bükme işlemi ile çok geniş bir yelpazedeki malzeme cinsi ile, sac kalınlığı 0,15 ila 9,5 mm, sac genişliği 5 ila 2000 mm ve ilerleme hızları 100 metre / dakika gibi değerleri bulmaktadır. Endüstride 30m/dakika karşılığı 1800 metre / saat imalat değeri makaralı bükme işlemi hızı için genellikle normal karşılanmaktadır.

Makaralı bükme işlemi ile, Şekil 2.1.d'de ekstrüzyon yöntemi ile elde edilebilecek kesitleri sac malzemeden daha kolay ve ekonomik olarak elde edilebilmektedir. Aynı zamanda pres ile bükme gibi işlemlere göre, kesintisiz çalıştığı için yukarıda belirtilen imalat hızları örneklerindeki gibi çok daha büyük ölçekte imalat yapılabilir. Ayrıca istenilen profilin boyu uzadıkça pres ile bükme; malzeme sertleştikçe ekstrüzyon imkansızlaştığı için makaralı bükme işlemine alternatifler de azalmaktadır.

Makaralı bükme işlemindeki zorluk makara sayısının ve yerleşiminin hesap edilmesidir. İstenilen profili elde ederken, istenmeyen kusurlardan kurtulmak ve bunu da minimum makara sayısı ile yapmak gerekmektedir. Makara dizilişini ve tasarımını (açılar, makaralar arası mesafe, çap...vb) henüz basit ampirik yaklaşımlarla ve önceki başarılı modellerle benzetim yoluyla bulmak sınırlıdır.

Makara sayıları istenilen karmaşık kesitlere göre değişmektedir, ancak 30 makara setini genellikle aşmamaktadır. Makara setlerinin tasarımında kullanılan yöntemlerden biri de iki makara arasındaki bükme açısı ve mesafe yüzünden sac malzeme kenarındaki uzamaların kritik gerinim (birim şekil değişimi) değerini aşmamasını sağlayacak şekilde tasarım yapmaktır. Temel prensip olarak bu uzamaların akma gerilmelerini geçmeyecek şekilde elastik alanda kalmasına çalışılırken makara açıları ile sadece yandan bükülmesi ile şekil değişiminin verilmesi hedeflenmektedir.

Halmos tarafından kenar dalgalanması ve düşey düzlemde eğilme kusuru ile ilgili nedenler ve alınacak önlemler şu şekilde özetlenmektedir. Kenar dalgalanması aşırı boylamasına gerinim nedeni ile kenar uçlarında oluşmaktadır. İnce malzeme kullanımında veya istenilen kesit geometrisi sebebiyle, boylamasına rijitlik direnci düşük ve büyük gerinimler olduğunda, kenar dalgalanması oluşma eğilimine girer. Kenar ucunun aldığı mesafe daha uzun olduğu için, ayrıca başlangıç makaraları arasından geçerken bir miktar daha uzama olmaktadır. Çıkış makarasından geçerken oluşan baskı gerilmeleri ile tekrar kısalarak çıkmakta ve eğer bu gerilmeler kritik değerden yüksek olursa kenar dalgalanması oluşmaktadır. Kenar dalgalanmasının diğer nedenleri arasında kalın veya ince malzeme kullanma (makaralardan tasarımda belirtilen maksimum kalınlıktan daha kalın (1,6 mm boşluktan 1,9 mm kalınlığında sac kullanmak gibi), minimum incelikten daha ince sac malzeme çekmek) malzeme kusurları (kenarında dalgalanma varsa makaralı bükme işlemi sonrasında da kusur devam eder veya sac rulonun bir kenarında kıvrılma varsa), kurulum (kenar yüzeyde aşırı basınç yaratacak bir makara tasarımı, sac malzeme düzeltici makarada kıvrılma, eğilme veya burulma), yanlış ayarlanmış ütüleme (bir kenarı veya kenarları gerdiren adımda kenarda uzamaya sebebiyet vermesi) ve hizalama sorunları (rulo açıcısı, pres veya takım üzerinde yanlış hizalama malzemedeki kıvrılma ve neticesinde kenar dalgalanmasına neden olabilir) olarak sayılabilir [1].

Kenar dalgalanmasının önlenmesi için alınabilecek önlemler sırasıyla, makara sayısının artırılması, makara profili, kılavuz makara kullanımı, makara hizalamasının daha hassas yapılması sayılabilir. Daha masraflı olmakla birlikte diğer önlemler olarak yerel ısıtma (kenar uçlarının ısıtılarak termal uzama ve kısalma yardımı ile kritik değer altında kalınmaya çalışılması), önceden şekil verme (merkezi kısımları ön makara profillerinden geçirmek sureti ile önceden uzatılması ile toplam uzamanın çıkışta homojen dağılımı) ve geçiş hattının yumuşatılması (iki makara seti arasındaki geçiş arasına kılavuz makaralar eklenerek yumuşak bir geçiş yapması) olabileceğini belirtmektedir [1].

Bu konu ile ilgili olarak sık rastlanan bir başka kusur ise düşey düzlemde eğilme kusurudur. Halmos, göreceli olarak, taban alanı dar ve kenarların yüksekliğinin büyük olduğu makaralı bükme işlemlerinde daha sık görülen bir kusur olduğunu, sac malzemenin boylamasına düzensiz uzama ve kısalmasından kaynaklandığını ve bu deformasyon tipinin makaralı bükme işleminin doğası gereği oluştuğunu bildirmektedir. Halmos bu durumun önlenemez de olsa, boylamasına gerinim azaltılarak, etkisinin doğru bir tasarımla görülmeyecek düzeye indirilebileceğini (makara sayısı, makara geometrisi, makara hizalama, geçiş hattı, makaralar arası mesafe ..vb,) belirtmektedir. Düşey düzlemde eğilmenin diğer nedenleri arasında malzeme (kalın veya yüksek mukavim malzemede düşey eğilme varsa), kesme işlemi (çapak veya kenar dalgalanması oluşmuşsa), kötü düzeltici makara ayarı olabileceğini belirtmektedir [1].

Düşey düzlemde eğilmenin düzeltilebilmesi için doğru makara sayısı seçimi (az olduğunda makaralarda genişlik yönünde yaratılan bükme aşırı miktarda olmakta, kenarlarda ve taban alanda uzama farkı iyice büyümektedir, fazla makara seçimi ise, malzeme, ilave montaj ve hizalama/ayarlama zamanını arttırarak maliyeti arttırmaktadır), makara geometrisi ve makaralar arası uzaklığın uzama farkının yaratacağı etkiyi minimize etmek için optimize edilmesinin gerekli olduğu ifade edilmektedir. Ancak, bu önlemler makara tasarımı problemini daha da güçleştirmektedir [1].

Şekil 2.3.a'da gösterildiği gibi bükülen kenarın bütün makara setlerinden sanki düz çizgi gibi geçmesi için sunulmuş bağıntılardan Şekil 2.3.b'deki gibi sinusoidal bir şekle dönüşen kenardaki gerçek gerinim değerlerini hesap etmeye çalışan analitik yaklaşımlar da çalışmalarda sunulmaktadır. Şekil 2.3.a'da gösterilen kenar uzamasının en basit halinde örnek gerinim hesaplaması şu şekilde yapılabilir.

$$CD = a - a \cos \theta = a(1 - \cos \theta), \quad AC = a \sin \theta, \quad DO = L \quad (2.1)$$

Buradan

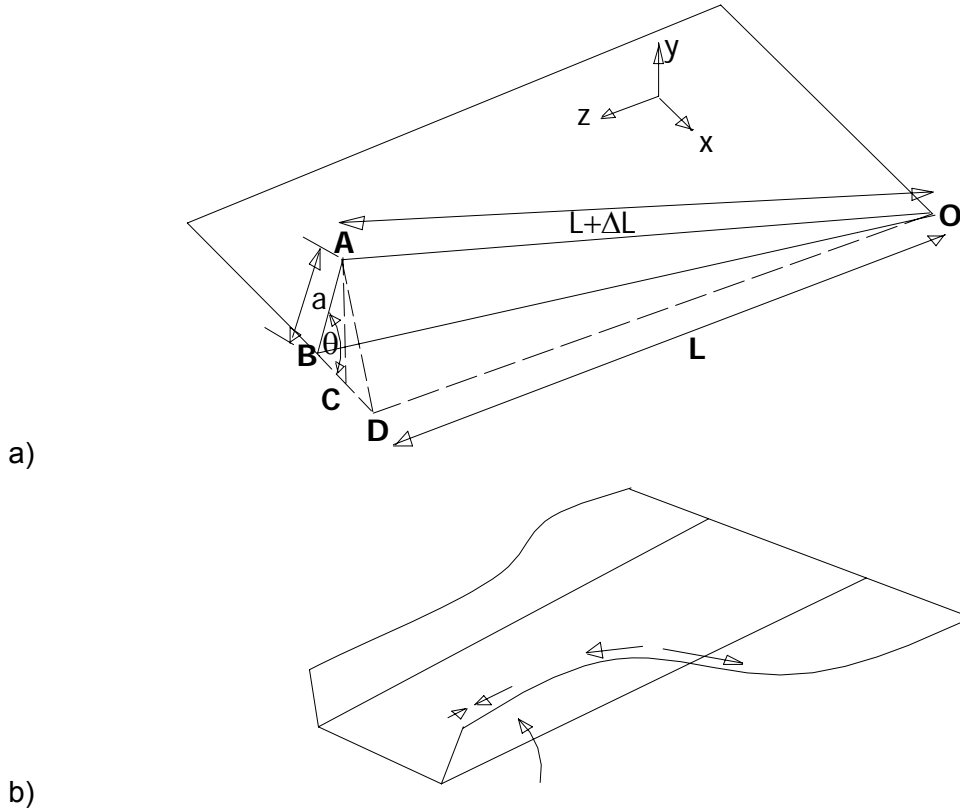
$$AD^2 = [a(1 - \cos \theta)]^2 + (a \sin \theta)^2 \quad (2.2)$$

$$(L + \Delta L)^2 = AD^2 + OD^2 = [a(1 - \cos \theta)]^2 + (a \sin \theta)^2 + L^2 \quad (2.3)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\sqrt{L^2 + 2a^2(1 - \cos \theta)} - L}{L} = \sqrt{1 + \frac{2a^2(1 - \cos \theta)}{L^2}} - 1 \quad (2.4)$$

Halmos tarafından ifade edilen basitleştirilmiş modele göre uzamanın kenar yüksekliğinin oluşturduğu daire parçasının uzunluğuna eşit olması ve 90° olduğunda dörtte biri olacak şekilde eşit olarak modellenmesi ile aşağıda 2.5 olarak verilen formül ile gerinim hesaplanabilmektedir [1]:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\sqrt{L^2 + \left(\frac{2\pi a}{4}\right)^2} - L}{L} = \sqrt{1 + 2.467 \frac{a^2}{L^2}} - 1 \quad (2.5)$$



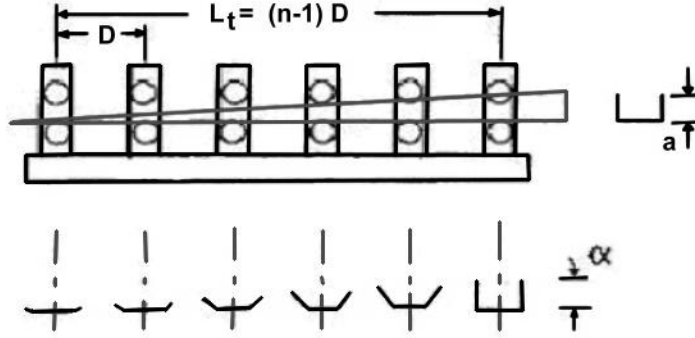
Şekil 2.3: İki makara seti arasında kalan sac parçası gerinim modellemesi a) Basitleştirilmiş model b) Kenar gerçek şekil değişimi

Gerinimlerin hesaplanmasının yanı sıra ampirik yaklaşımlar da bulunmaktadır. Angel tarafından 1949 yılında sunulan Form Açısı Metodu en bilinen metodlardan birisidir [5]. Şekil 2.4'de makaralı bükme tezgah değişkenleri olarak aşağıdaki 2.6 ve 2.7 denklemleri kullanılarak makara seti sayısı hesaplanabilmektedir.

$$\text{Cot} \alpha = \frac{L_t}{a} = \frac{(n-1)D}{a} \quad \rightarrow \quad \text{Cot} \alpha = 40,5 \quad (\alpha \cong 1,5^\circ), \quad (2.6)$$

a: Kenar yüksekliği (son makaradan çıktıktan sonra),
D: İki makara istasyonu arasındaki uzaklık,
n: Makara seti sayısı

$$n = \frac{40.5a}{D} + 1 \quad (2.7)$$



Şekil 2.4: Form açısı metodu [5]

Bu metod kapsamında önerilenler: Plastik gerinim değerlerini en aza indirebilmek için, form açısı $\alpha < 2^\circ$ olmalıdır. Düşük-karbonlu sünek çeliklerde $\alpha \cong 1^\circ 25'$ iyi sonuç vermektedir. Paslanmaz çelikte: $\alpha \cong 1^\circ 35'$ iyi sonuç vermektedir. Daha güvenli bir tasarım için $\alpha \cong 1^\circ$ ($\cot \alpha = 57^\circ$) seçilmelidir. Örnek olarak iki makara arası 146 mm ve kenar yüksekliği son makara setinden çıktıktan sonra 10 mm ise 2.7 denklemi ile $3.77 \cong 4$ makara seti önerilmektedir.

2. makara setinde azami kenar yüksekliği (a')= $\tan 1^\circ 30' \times 2 \times D = \tan 1^\circ 30' \times 2 \times 146 = 5,40$ mm, aynı şekilde 4. makara setinde $a' = \tan 1^\circ 30' \times 4 \times 146$ (bu durumda ($a < a'$)) 10 mm kenar yüksekliği 13,25 mm'den küçük olduğu için form açısı metodu açısından güvenli bir tasarım olduğu belirtilmektedir. Sırasıyla 1 ila 4. makaralarda açılar $0^\circ, 20^\circ, 42^\circ, 90^\circ$ şeklinde bulunmaktadır.

Griffin tarafından 1955 yılında sunulan Şekil 2.5'te gösterilen bu Form Oranı Metoduna göre ise makaralar aşağıdaki şekilde belirlenmektedir [5]. Kritik (elastik limit) gerinim değeri aşağıdaki 2.8 numaralı denklem ile bulunmaktadır.

$$\delta_c = \frac{\sigma_y}{E} \quad (2.8)$$

σ_y = Akma gerilmesi

E= Elastisite modülüsü

δ_c = Elastik limit gerinim değeri (kritik gerinim)

M= Gerekli toplam metal hareketi

D= Makara istasyonları arası mesafe

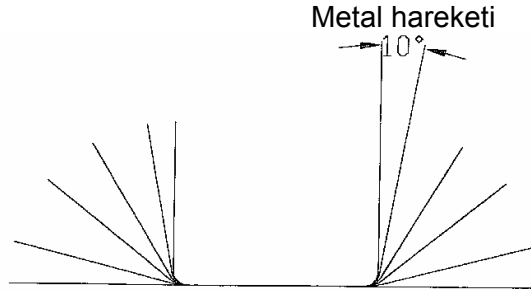
Daha sonra birim merkez mesafesinde müsaade edilen metal hareketi ise 2.9 numaralı denklemlerle hesap edilmektedir:

$$\sqrt{(1-\delta_c)^2 - 1^2} = \sqrt{(2\delta_c + \delta_c^2)} \approx \sqrt{(2\delta_c)} \quad (2.9)$$

Bu değeri temel alarak bulunacak makara istasyonu sayısı (n) ise aşağıda verilen 2.10 numaralı denklem ile hesaplanmaktadır.

$$n \approx \frac{M}{(\sqrt{2\delta_c} \times d)} \quad (2.10)$$

Makara istasyonları arası mesafe ise tasarımcı tarafından belirlenmelidir.



Şekil 2.5: Form oranı metodu [5]

Konu hakkında imalat süreçleri içinde edinilmiş birikimler vasıtasıyla oluşturulmuş deneysel (ampirik) tablolar ve bağıntılar bulunmaktadır. Bu bağıntılar genel olarak daha güvenli bir tasarım için önerilmektedir. Maliyetleri aşağı çekmek ve daha dar toleranslarda üretim yapabilecek makina tasarımı için optimum makara seti hesabı ise makaralı bükme işleminde sac malzeme davranışının daha iyi anlaşılması ile mümkün olacaktır.

Makaralı bükme işlemi ile ilgili uluslararası bilimsel dergilerde yayınlanmış veya konferanslarda sunulmuş çalışmalar ve makaleler iki grupta toplanabilir:

- a) Deneysel çalışmalar,
- b) Teorik ve/veya sonlu elemanlar ile modelleme çalışmaları.

2.2 Deneysel Çalışmalar

Deneysel çalışmaların hemen tamamı u-kesitli açık profiller üzerine yapılan çalışmalardan oluşmaktadır. Deneysel çalışmalar makaralı bükme işleminde sık görülen kusurlara göre aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir:

1. Kenar yüzeylerde dalgalanma,
2. Taban alanında görülen kusurlar üzerine çalışmalar.

2.2.1 Kenar yüzeylerde dalgalanma üzerine çalışmalar

Bhattacharyya ve diğerleri, her makara istasyonunda şekil değişim uzunluğunu hesaplayan bir metod üzerinde çalışmalarını bildirmektedirler. Malzeme katı-plastik (rigid-plastic) kabul edilerek, şekil değiştirme enerjisinin en az olması prensibi ile hesaplama yapılmıştır. İlk sonuç olarak, pratikte malzemenin şekil verme işlemindeki davranışında, fiziksel ölçülerin, malzemenin mekanik özelliklerinden daha çok etki yaptığını gözlemlemişlerdir. Bu konuda, Şekil 2.6'da gösterimi yapılan şekil değişim uzunluğu kavramını tanımlayarak, hatasız ürün imalatını kontrol edilebilecek ampirik bir yaklaşım geliştirmişlerdir [6].



Şekil 2.6: Şekil değişim uzunluğu (L_s) [6]

Bhattacharyya ve diğeri bildirdikleri sonuçlarında :

a) Şekil değıştirme uzunluğunun ampirik olarak elde edilmiş 2.11'de sunulan

$$L_s = a \sqrt{\frac{8 \times a \times \theta_p}{3 \times T}} \quad (2.11)$$

(a: Kenar yüksekliğı, T: malzeme kalınlığı, θ_p : Bükme açısı (radyan)) bağıntısı ile en az şekil değıştirme enerjisi sağlandığı ve sonuçların \pm %6 seviyesinde olduğu, ve

b) Formülde belirtildiğı gibi, şekil değıştirme uzunluğunun 3 fiziksel parametre ile ilgili olduğu ve malzemelerin mekanik özelliklerinden pratikte bağımsız sayılabileceğini belirtmektedirler. Sünek çelik ve alüminyum malzemeler ile yapılan deneysel çalışmalarda da bu farkların gözlenmediğı belirtilmektedir [2].

Bhattacharyya ve Smith tarafından yapılan diğeri deneysel çalışmada ise kenar açısı 90° 'den küçük u-kesit şekil elde etmek ($\theta_n < 90^\circ$) için minimum makara kullanarak bükme açılarının optimizasyonu incelenmiştir. Yazarlar elde ettikleri sonuçlarla şu önermelerde bulunmaktadırlar: 1- İlk makara istasyonunda kenar dalgalanması yaratmayacak en büyük açı farkı ($\Delta\theta_{\text{maksimum}}$) seçilmelidir. Bunun ardından ilk makara setinde bu açıdan daha küçük bir açı kullanılmalıdır. 2- Son makara istasyonundaki açıyı belirledikten sonra açı farkı ($\Delta\theta$) 5° olacak şekilde son iki makara hazırlanmalıdır. 3- Ara makaraların açı farkları $\Delta\theta < \Delta\theta_{\text{maksimum}}$ olacak şekilde belirlenmelidir. Yazarlar bu prensiple (0° - 45° - 85° - 90°) makara düzeni ile kenar dalgalanmalarının gözlenmediğı düzgün bir ürün çıkarttıklarını belirtmektedirler [7].

Bhattacharyya ve diğeri lerinin 1987 tarihli çalışmalarında ise, makara üzerine binen kuvveti hesaplamak için yarı-ampirik bir metod sunulmaktadır. Sonuçlarda, malzeme özelliklerinin, geometrik parametrelerinin ve makaralı bükme makinası ölçülerinin, makara üzerine binen yüke olan etkileri gösterilmektedir. Konu ile ilgili olarak, makara üzerindeki yükler için formüller verilmekte ve verilen formüllerin, malzeme kenar yüksekliğı çok az ve malzeme kalınlığı göreceli olarak fazla olmadığı sürece, kullanımı ile elde edilen sonuçların eksi yönde %0 ila % 20 arasında bir hata payı ile çıktığını belirtmektedirler [8].

Bhattacharyya ve diğeri ler tarafından makaralı bükme işlemi esnasında uzama oluşumunun ince sac malzeme kullanılarak (0,6 mm sac kalınlığı ve 20 mm kenar yüksekliğı) incelendiğı çalışmada, aşağıda verilen formül ile makaralar arası mesafelerin maksimum gerinim değıerini aşmayacak şekilde düzenlenebileceğı ifade edilmektedir. Bu amaçla minimum enerji prensibi ile hesaplama yapılıp, bir u-kesit açık profil için M değıeri olarak 1,63 sunulmaktadır. M değıerini kullanarak 2.12'de verilen ampirik formülle iki makara arasındaki uzaklığın maksimum gerinim değıeri aşılmadan hesap edilebileceğini belirtmektedir [9].

$$L_{\xi} = M \sqrt{\frac{a^3 \theta}{T}} \quad a = \text{Kenar yüksekliği}, \theta = \text{Bükme açısı}, T = \text{Malzeme kalınlığı} \quad (2.12)$$

Yukarıda hesaplanan L_{ξ} değeri ile de geometrik kenar yüzey tepe gerinim değerinin (e_p) bulunması ve

$$e_p = \sqrt{\left[1 + 2 \left(\frac{a}{L_{\xi}} \right)^2 (1 - \cos \theta) \right]} - 1 \quad (2.13)$$

formülü ile makara seti sayısının (n) hesap edilmesi için aşağıdaki yol önerilmektedir:

$$\theta_{N-1} = \theta_{\text{final}} - \theta_d \rightarrow \theta_d: \text{Tasarlanan açı (5° önerilmektedir)} \quad (2.14)$$

$$e_L < e_{\text{maksimum}} = e_p - e_a, \quad n = \frac{\theta_{N-1}}{\phi} + 1 \quad \phi: \text{Tahmini uygun bükme açısı} \quad (2.15)$$

Makara açıları için 2.16'da sunulan bağıntıda,

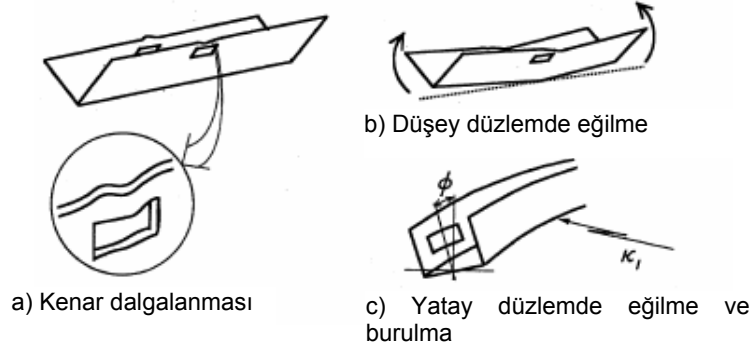
$$\theta_{(x)} = Ax^3 + Bx^2 + Cx + D \quad (2.16)$$

$\theta_{(0)}=0$, $\theta_{(N)}= \theta_{\text{(final)}}$, $\theta_{(N-1)}= \theta_{\text{(final)}} - 5$, tasarımcı tarafından belirlenen birinci makara seti açısı $\theta_{(1)}$ ile verilmekte olan 3. dereceden denklemin çözümü mümkün olmaktadır. Yazarlar tarafından yapılan deneylerle teorik olarak maksimum uygulanabilir gerinim değerleri ile hesaplanan makara kombinasyonları incelenmiş, maksimum gerinim değeri olarak 0,0025 değerinin tasarımcı tarafından seçilmesi durumunda en uygun çözümün 0-29-61-85-90 kombinasyonu ile 4 adet makara olacağı belirtilmiştir [9].

Bhattacharyya ve diğerleri, bir başka çalışmaya atıfta bulunarak, "şekil faktörü (shape factor)" metodu ile yapılan hesaplamada maksimum gerinimin 0,0015 alınması halinde ise 0°-25°-50°-70°-85°-90° kombinasyonunun hesaplanabileceği ve 0°-29°-61°-85°-90° 4'lü kombinasyonu ile kıyaslanınca ikisinin de iyi sonuç verdiği ve önemli bir fark olmadığı belirtilmiştir. Bu nedenle makalede sunulan metod makara tasarımında önerilmiştir [9].

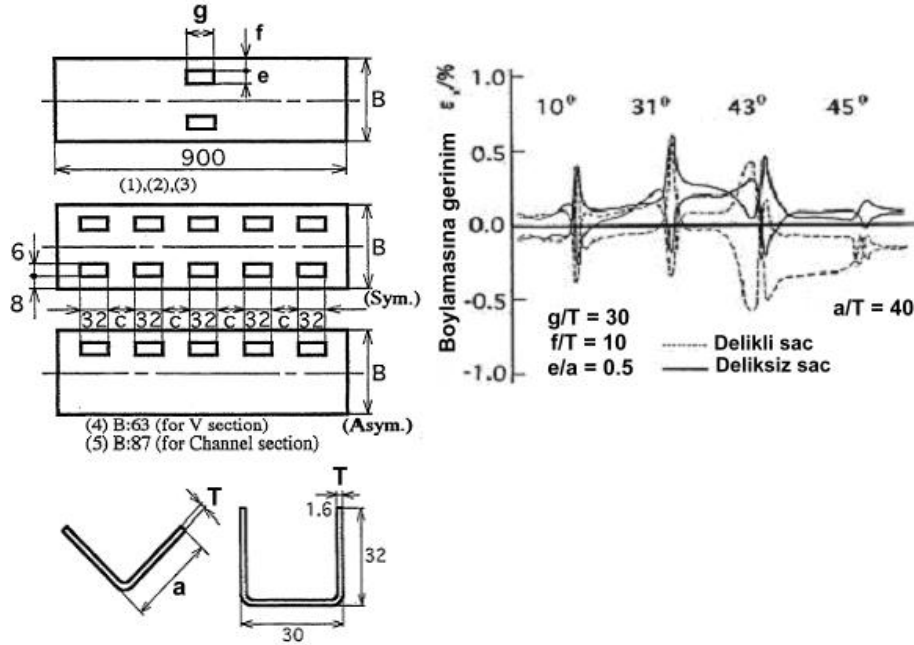
Watari ve Ona yaptıkları deneysel çalışmada, önceden delikli sac malzemelerin silindirik bükme işleminden geçirilmesi esnasında meydana gelen yüzey bozukluklarını ve bunların önlenmesi konusunu incelemiştir. Bu şekilde işlem

gerektiren ürünlere örnek olarak kütüphane rafı veya kütüphane kaideleri gibi ürünler verilebilir. Genel olarak görülen çarpılmalar Şekil 2.7’de gösterilmiştir [4].



Şekil 2.7: Makaralı bükme işlemi esnasında önceden delikli sac parçalarda sık karşılaşılan yüzey bozuklukları [4]

Şekil 2.8’de modellenmesi verilen sac delikli levhalar, çalışmada şu şekilde makaralı bükme işleminden geçmişlerdir: V-kesitler, 30 mm çaplı makaralardan oluşan bir düzenekten geçerken, U-kesitler ise 40 mm çaplı makaralardan oluşan bir düzenekten geçmiştir. V-kesitler 5 makara setinden (10° - 17° - 31° - 41° - 45°) oluşan bir düzenekte bükülmüş, U-kesitler ise 7 makara istasyonundan oluşan 15° - 30° - 45° - 60° - 75° - 85° - 90° açılı bir düzenekte bükülmüştür.



Şekil 2.8: Watari ve Ona'nın çalışmalarında kullandıkları delikli sac modeli ve elde ettikleri sonuçlar [4]

Watari ve Ona'nın çalışmasında genel olarak aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

1. Kenar dalgalanmaları (Şekil 2.7.a)

- a. Delik genişliği (g) artıkça (↑) kenar yüzeyde dalgalanma artma eğilimine(↑) girmektedir. Aynı zamanda, kenar yüksekliği büyük olan ürünlerde (a/T=45, 50) çarpılma, az olan ürünlere göre çok daha fazla gözlenmiştir.
- b. Delik, sac kenarından uzaklaştıkça (f ↑), kenar dalgalanması önemli ölçüde azalmaktadır (↓). Yazarlar bunun Euler Burkulma teorisi ile de uyum gösterdiğini belirtmektedirler.
- c. Delik genişliği (g) küçük olan ürünlerde delik eninin kenar çarpılmalarına bir etkisi yoktur. Ancak, büyük kenar yüksekliklerine sahip ürünlerde (a/T = 45, 50), delik genişliği (g) artıkça (↑) kenar dalgalanmaları önemli ölçüde artmaktadır(↑).
- d. Kenar çarpılmasının gözlenmesinde, $h/U = 2,0 \times 10^{-3}$ limiti çıplak gözle bu çarpılmaların görülmediği eşik değerdir (h: Yüzey dalgası yüksekliği, U: Yüzey dalgası uzunluğu). Buna göre: $ge/fT < 14$ oranı kenar dalgalanmanın görülmemesi için kullanılabilir ampirik bir oran olarak önerilmektedir (g: delik genişliği, e: delik boyu, f: delik tabanının kenar bitimine uzaklığı, T: sac malzemenin kalınlığı). Ayrıca şu bağıntılar, üründe müsaade edilebilecek (eğer h/U oranı belli ise) ge/fT oranının hesaplanmasında önerilmektedir:

$$\text{i. } h/U=0,473 \times 10^{-3} \times (ge/fT)^{0,548} : a/T = 35 \text{ oranı için} \quad (2.17)$$

$$\text{ii. } h/U = 0,431 \times 10^{-3} \times (ge/fT)^{0,608} : a/T = 40 \text{ oranı için} \quad (2.18)$$

$$\text{iii. } h/U=0,294 \times 10^{-3} \times (ge/fT)^{0,759} : a/T = 45 \text{ oranı için} \quad (2.19)$$

2. Boylamasına Gerinim

Şekil 2.8'de sağ kısımda görüldüğü üzere, 4 makara istasyonundan (10° - 31° - 43° - 45°) geçerken, boylamasına uzamada, delikli sac, deliksiz saca göre çok daha ağır bir bükme işlemine maruz kalmaktadır. Özellikle 31° ve 43° makara istasyonlarında kabuk gerinim pozitif değerlerden negatif değerlere geçmektedir. Kenar yüzeyde burkulma nedeninin bu olduğu düşünülmektedir.

3. Düşey düzlemde eğilme (Şekil 2.7.b)

- a. Delik uzunluğu ve düşey düzlemde eğilme: Delik genişliği arttıkça ($g \uparrow$) düşey düzlemdeki eğilme de artmaktadır (\uparrow). Ancak kenar dalgalanmalarının tersine, kenar yüksekliği az olanlarda düşey düzlemde eğilme, kenar yüksekliği büyük olanlara göre daha fazladır. Delikli kenarlarda, kenar yüksekliği, kenar dalgalanma mekanizmasının tersine yönde menfi bir etki göstermektedir.
- b. Deliğin sac kenarından uzaklığı (f): Kenar yüksekliği büyük olan ürünlerde (a/T oranı 40, 45 ve 50), delik, kenar ucundan uzaklaştıkça düşey düzlemde eğilme azalmaktadır. Tam tersine, a/T oranı 35 olan ürünlerde, delik kenardan uzaklaştıkça eğilme artmaktadır.
- c. Delik genişliği (g): $a/T = 45$ veya 50 oranının yüksek olduğu uzun kenarlarda, delik genişliğinin eğilmeye etkisi yoktur. a/T oranının 35, 40 olduğu ürünlerde ise, delik genişliği arttıkça (\uparrow) eğilme de artmaktadır (\uparrow).
- d. Düşey düzlemde, boylamasına eğilme oluşumu: Atalet momenti önceden delikli sac için I_p ve normal sac için I_o ise, 2.20 bağıntısı sağlanırsa,

$$(I_p / I_o) \geq 4 \times 10^{-3}(g/T) + 0,77 \quad (20 \geq g/T \geq 50) \quad (2.20)$$

düşey düzlemde eğilme üründe gözle görülmeyecektir. Bu ölçü 28 mm uzunluğundaki bir kenar için ölçülmüştür. Diğer delikli saclarda da ($H=32\text{mm}$, 36mm , 40mm) uygulanabilir bir bağıntı olduğu bildirilmiştir.

4. Yatay düzlemde eğilme ve burulma (Şekil 2.7.c)

Delik aralığının (c) azalması (\downarrow) ile birlikte yatay düzlemdeki eğilme ve burulmanın arttığı (\uparrow) gözlenmiştir. Ancak bu konuda daha fazla çalışma yapılması yazarlar tarafından önerilmektedir.

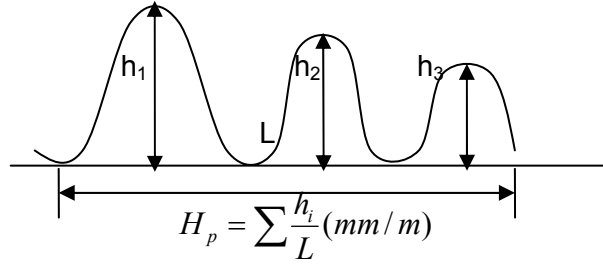
5. Makara istasyonları ayarlaması ve şekil bozuklukları

$g/T = 20$, $f/T = 10$ ve $e/H=0,5$ oranlarına sahip önceden delikli ürünlerle çalışılmıştır. 3 veya 4 istasyonlu çalışmalarda, kenar dalgalanmaları ve düşey düzlemdeki burulmalar çok büyüktür (\uparrow). 5 istasyonlu çalışmada, başlangıç açılarının düşük (\downarrow) olduğu bir düzenekle, şekil bozuklukları azalmaya başlamaktadır (\downarrow). Geniş panellerin ve önceden delikli sacların, özellikle ilk makara setlerine girişlerinde, düşük yapısal esneklik göstermekte olduğu belirtilmektedir ve makara setlerinin sayısı ve geçiş açılarının önemli olduğu belirtilmektedir.

Sonuç olarak yazarlar, ürün çarpılmasının önlenmesi hususunda yaptıkları çalışmada a) Kenar dalgalanmalarının, kenarlarındaki burkulma neticesinde, çekme kuvvetinin basma kuvvetine dönüşmesi neticesinde olduğunu b) Düşey düzlemdeki eğilmenin, boylamasına yönde, başlangıç aşamasında meydana geldiğini c) Geniş profillerin bükülmesindeki sac davranışı ile delikli sacların bükülmesi sırasındaki davranışın benzer olduğu ve yazıda belirtilen ampirik formülasyonun bunları önlemede faydalı olacağını ifade etmişlerdir [4].

2.2.2 Taban alanında görülen kusurlar üzerine çalışmalar

Hira, Abe ve Nakagawa u-kesitli açık profiller için yaptıkları çalışmada sünek çelik sacın $0,27 \text{ mm} < T < 0,35 \text{ mm}$ kalınlığı arasında ise kalınlık T arttıkça (\uparrow) Şekil 2.9'da gösterilen ortalama cep oluşumu değeri H_p 'nin düştüğünü (\downarrow) bildirmektedirler. Hira, Abe ve Nakagawa cep oluşumunun bir çeşit elastik burkulma etkisi olduğunu, dolayısıyla daha kalın malzeme ile H_p değerinin düşürülebileceğini ifade etmektedirler [10].



Şekil 2.9: Cep oluşum büyüklüğü H_p [10]

Ona ve Jimma, asimetric u-kesitli açık profiller için yaptıkları deneysel çalışmada ise, burulma ve eğilme şekil bozukluklarını önlemek için, çıkış-düzelticisi (exit-straightener), makara basınç kuvvetini ayarlama, makaraların birbirlerine göre konumlarının çaprazlama olarak ayarlanması, çıkışta geri yaylanmayı dengelemek için ilave bükme makaraları ve burulma düzeltme istasyonu (twist form stand) operasyonlarını, 8 makara istasyonlu bir düzenekle deneysel olarak araştırmışlardır. Genel olarak, makaralı bükme işleminin asimetric ürünlerde daha çok ortaya çıkan şekil bozuklukları için kullanılan düzeltici işlemleri, asimetric ürünlerde genişlikleri aynı kalmak üzere (63 mm genişlik, ve $0,8 \text{ mm}$ kalınlık), değişik kenar yükseklikleri olacak şekilde (H_1/H_2 ; $21/15$, $24/12$, $27/7$, $30/6$, $36/0 \text{ mm/mm}$) incelemişlerdir [11].

Makara basıncının artırılması ve azaltılması ile yapılan denemelerde ise, bu uygulamanın düşey eğriliğin giderilmesinde etkili fakat, yatay eğrilikte ve burulmada etkili olmadığı görülmüştür. Ayrıca, burulma-şekil verme makarası ile şekil vererek işlemin bitmiş bir işlemde sonra “çıkışta düzeltici makaradan” burulma şekil bozukluğunun giderilmesinde daha faydalı olduğu gözlenmiştir. İlave-bükme makarasından çıkan malzemenin ise 30:6 oranında olanında etkili bir şekil düzelmesi olduğu gözlenmiştir. Yazarlar sırasıyla ulaştıkları sonuçlar:

a) Makaralı bükme işlemine simetrik makaralar vasıtasıyla, asimetric ve u-kesitli açık profil bir sac işlenmek istenirse; sac, yatay yönde eğimli hale gelip, uzun kenarına doğru dönerek burulmaktadır.

b) Profil çarpımları çıkış-düzeltilicisi ile düzeltilebilmektedir; ancak hali hazırda çalışmada, verimli bir düzeltme, kenar uzunlukları 21:15 oranına sahip u-kesitlerde sınırlı kalmaktadır.

c) Alt ve üst makaraları, son makara istasyonunda, genişlik yönünde kaydırmak, ya burulmayı ya da yatay ekseninde eğilmeyi (horizontal curvature) düzeltmektedir. Burulma, makaraları kısa kenarına kaydırınca, azalmaktadır. Aksi istikamette (uzun kenarına) kaydırınca ise, yatay eğilme azalmaktadır.

d) Son makara istasyonunda makara basıncının artırılması, düşey eğimi düzeltmede etkili olmakla birlikte, yatay eğilme ve burulmayı düzeltmede etkisiz kalmaktadır.

e) Burulma düzeltme istasyonu, düzeltmenin yanı sıra şekil vermede de kullanılmıştır. Burulma düzeltme istasyonu kullanımının etkisinin çıkış düzelticisi kullanmaktan daha fazladır.

f) Son makara istasyonundan önce eklenen, fazla-bükme istasyonu burulma ve düşey eğilmeyi önlemede etkili olmuştur.

g) Makaraların, çıkış-düzeltilisinden çıkışta genişlik yönünde hareketi etkili olmadığı gibi, uzun kenarda, kenar burkulmasına da sebebiyet vermektedir.

h) 24:12 örneğinde olduğu gibi, makara basıncını ayarlama ve çıkış düzelticisi kombinasyonu, (g) maddesinde belirtilen düzeltici işlemde çok daha etkin olmuştur.

i) Son makara istasyonundan sonra eklenen burulma düzeltme istasyonu, makara basıncı ayarlama ve makaraların genişlik yönünde hareketi ile kullanıldığında çok etkili olmuştur. Şekil verme işlemi 27:9 oranına kadar çıkmıştır.

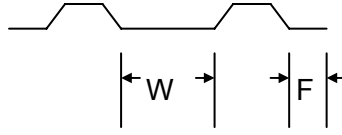
j) Yukarıda (i) maddesinde belirtilen işleme bir de fazla-bükme istasyonu eklendiğinde en iyi sonuç alınmış ve bükme limiti 30:6 oranına çıkmıştır.

k) 36:0 oranında (L-profil) bükme işlemi yukarıdaki kombinasyonların hiçbirisi ile düzgün yapılamamıştır.

Çıkış düzelticisi ile yaptıkları çalışmada ise, spiral gibi burulmaya önlemek için makara hareketi (yatay ve düşey hareket) ve düzeltici makara ile denemelerinde, en büyük etkiyi, düzeltici makara açısının yarattığını ifade etmektedirler. Son olarak yazarlar, düzeltici makara açısı olarak 20° kullanımı halinde, yatay ve düşey kalıp hareketleri ile, düşey eğrilmenin önüne geçilemediğini ifade etmektedirler [11].

Miyamoto ve Hava tarafından yapılan Hira, Abe ve Nakagawa'nın çalışmasına benzer bir başka çalışmada titanyumdan üretilen panellerde cep oluşumu (web-buckling) ile malzeme özellikleri arasındaki ilişki araştırılmıştır. Çalışma, yüzey dalgalanmaları ile malzeme arasında kuvvetli bir bağ olduğunu göstermiştir. Çalışma sonuçları şu şekilde sıralanabilir: 1) Malzeme içindeki tane boyutu (grain size) arttıkça (\uparrow) H_p (ortalama cep oluşumu yüksekliği) artmaktadır (\uparrow) (cep oluşumu, malzeme tane büyüklüklerinin $25\mu\text{m}$ 'den küçük olması durumunda görünmez hale gelebilmektedir) 2) Akma gerilmesi σ_y arttıkça (\uparrow) H_p azalmaktadır (\downarrow) [12].

Jimma ve Ona'nın çalışmalarında ise deneysel olarak cep oluşumu Şekil 2.10'da sunulan çatı kaplamasında kullanılan kesit için incelenmiştir [13]. Bazı ticari ürünler ve şekiller için yaptıkları deneylerde şu sonuçlara ulaşmışlardır:



Şekil 2.10: Jimma ve Ona'nın çalışmasında kullandıkları kesit [13]

- $W/T < 96$ ve $F/T < 12$ olduğunda A-tipi profiller için yüzey dalgalanmaları oluşmaz,
- $W/T < 88$ ve $F/T < 48$ olduğunda B-tipi profiller için yüzey dalgalanmaları oluşmaz,
- En küçük W aralığı $W=12$ olana kadar o yüzeyde dalgalanma görülmez,
- Son olarak 2.21'de sunulan bağıntı iyi bir ürün için sınır değerdir.

$$\frac{F}{T} = \frac{250}{\left(\frac{W}{T} - 88\right)} \quad (2.21)$$

Çalışmalarında:

1. Boylamasına basma gerinimi arttıkça (\uparrow) yüzey ve kenarlarda dalgalanmanın arttığını (\uparrow),
2. Makaralardaki bükme açısının azalması ile (\downarrow), boylamasına basma geriniminin azaldığını (\downarrow),
3. Makaralı bükme yapılmış bütün geniş profillerde boylamasına basma geriniminin olduğunu,

bildirmektedirler [13].

2.3 Teorik ve/veya Sonlu Elemanlar ile Modelleme Çalışmaları

Teorik çalışmalar makaralı bükme makara tasarımı için gerinimin daha gerçekçi hesaplanması üzerine yoğunlaşmıştır. Sonlu elemanlar ile modelleme çalışmaları ise daha önce yapılmış deneysel çalışmalarda elde edilmiş gerinim değerlerinin bilgisayarda doğru hesaplanması amacıyla yapılmaktadır.

Bu çalışmalarda deneysel yöntemlerle elde edilmiş bağıntılar ile karşılaştırma yapıldığından elde edilen sonuçlarda herhangi bir yüzey bozukluğu belirtilmemiştir. Daha çok gerinim değerlerinin deneysel sonuçlar olarak bildirilen değerlere yaklaşmış olması başarı kriteri olarak sunulmaktadır. Bu alandaki çalışmaları kusura göre gruplamak uygun değildir; çünkü çalışmalar bir kusuru hesaplamaktan ziyade en fazla gerinim değerlerini hesaplamaya dayanmaktadır. Bu çalışmada incelenen yayınlar;

- 1) İnce (<1 mm) sac malzeme üzerine çalışmalar,
- 2) Kalın sac malzeme (≥ 1 mm) üzerine çalışmalar,
- 3) Yazılım geliştirme çalışmaları,

olarak gruplandırılmıştır.

2.3.1 İnce sac malzeme üzerine çalışmalar

Seneyake ve diğerleri, 1994 tarihli çalışmalarında, sac üzerinde uzama gerilmelerinin yeterince anlaşılması ile, makaralı bükme işleminde makara tasarımının, deneme yanılma şeklindeki tahmini çalışmayı çok azaltacağı vurgulanmaktadır. Yapılan modelleme ile makaralı bükme işleminin simülasyonunun başarılı sonuçlar verdiği ve deney sonuçları ile uyumlu olduğu belirtilmektedir.

Halihazırda “form açısı” metodu (“*forming angle*” method) ile makara istasyonları aralıklarının belirlenip, makara istasyonunda bükme açısının hesaplandığını, bu şekilde, kenarlardaki plastik uzamaların sınırlandırıldığını belirtmektedirler [14].

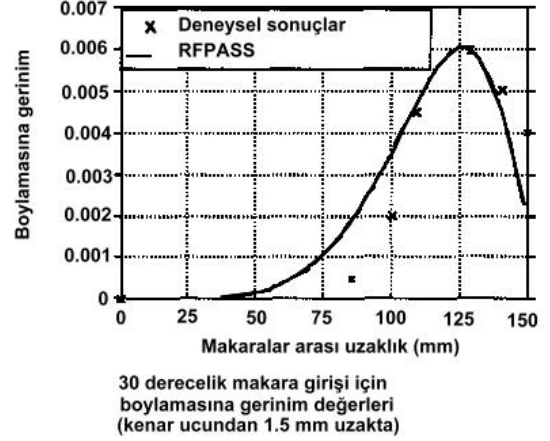
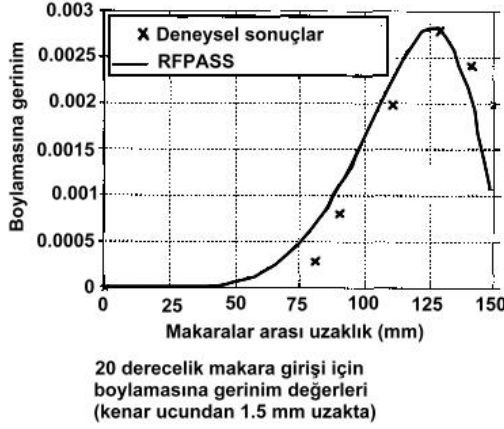
Yazarlar, çalışmalarında ana amaçlarının, makaralı bükme işlemi esnasında malzeme davranışını daha iyi anlamak olduğunu ve SEA ile malzeme üzerinde her bölgede gerinimlerin hesaplanabildiği için makara tasarımının kolaylaştığı bildirmektedirler. Yazarlar, ne kadar çok makara istasyonu olursa veya sac malzeme başlangıç ve bitiş formu arasındaki mesafenin uzaması ile makaralı bükme işleminin de aynı oranda kolaylaşacağını vurgulamışlardır [14].

SEA çalışması olarak, yazarlar, MARC/MENTAT programı kullanmış ve modellemede 4-düğümlü (node) kabuk elemanı (tip 75) seçmişlerdir. Koordinatlar, yer değiştirmeler ve rotasyonlar için bi-lineer enterpolasyon kullanılmıştır. Yazarlar ayrıca, makara istasyonlarına girmeden hemen önce referans verdikleri çalışmada bahsedilen burkulma olayının da yaptıkları simülasyonda görüldüğünü bildirmektedirler. Çalışmalarında sac malzemenin üzerinin ızgara şeklinde çizildikten sonra makaralı bükme işleminden geçirdiklerini belirtmektedirler. İşlem sonrasında meydana gelen şekil değişimi (kare şekilden baklava desenine) kullanılarak gerinim değeri bilgisayar ortamında hesaplanmaktadır. Bu geometrik hesaplama ile deneysel ölçüler arasında uyum gözlemlendiğini bildirmektedirler [14].

Duggal ve diğerlerinin 1996 tarihli çalışmasında basit kesitlerde makaralı bükme simülasyonu için RFPASS adlı yazılım geliştirilmiştir. Bu yazılım için yapılan bazı önemli varsayımlar ise şunlardır: 1) Profil genişlik yönünde eşit aralıklara bölünmüştür, bu kesitlerde genişleme olmayacağı varsayılmıştır, 2) Sinusoidal şekil-fonksiyonu (shape-function) 2.22’de sunulduğu şekilde kullanılmıştır,

$$S(x)=\sin((\pi/2) (X/L)^n) \quad (2.22)$$

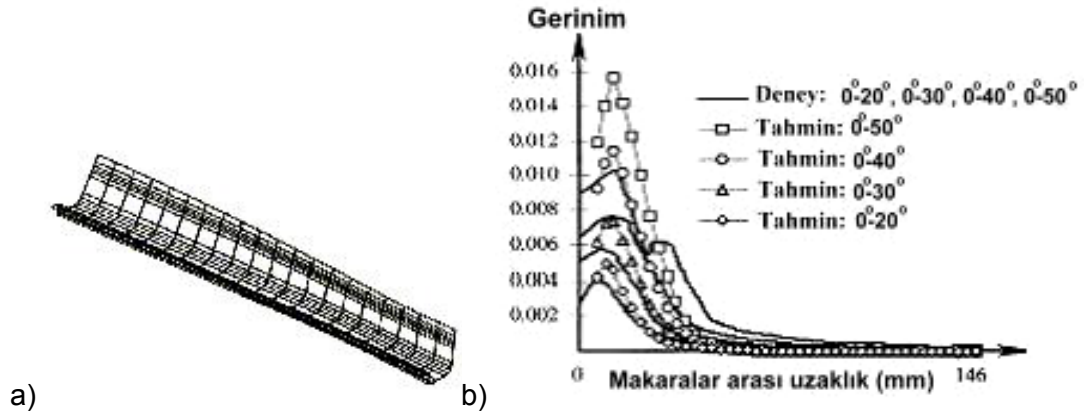
3) Genişlik yönünde kesitler her zaman x-y düzlemine paralel kalırlar, 4) Sac profilini çeken toplam kuvvet genişlik yönünde yapılmış kesitlerdeki kuvvetlerin toplamına eşittir, 5) Genişlik yönünde ve uzun kenar yönleri akarken ana gerilmelerle aynı yöndedir. Şekil 2.11’de sunulan sonuçlarda elde edilen yazılımın deneylerle desteklenerek iyi sonuçlar verdiğini bildirmişlerdir. Ancak, yazılım, basit kesitlerde sorun çıkarmamakla birlikte, yazılımın karışık şekillerde kullanılması için geliştirilmeye ihtiyacı olduğu vurgulanmıştır [15].



Şekil 2.11: RFPASS yazılımı sonuçlarının 20° girişi ve 30° makara girişleri için deneysel sonuçlarla karşılaştırılması [15]

Brunet, Lay ve Pol 1996 yılındaki makalelerinde [16] ve Brunet, Mguil ve Pol, 1998 yılındaki makalelerinde [17] yaptıkları çalışmada silindirik bükme prosesi için deformasyonları ve makara optimizasyonunu sağlamak üzere bir sonlu eleman yazılımı (PROFIL) geliştirmişlerdir [16,17].

Bu yazılım mantığı olarak herhangi bir zamanda sac üzerinde oluşan gerginlik hesabı için 2 veya 4 makara arasında kalan kısımlarla ilgilenmişlerdir. Ardından, bu tip bir çalışma için ikinci bir varsayım yapmışlardır: İki aralık arasında sac yüzeyinde makarayı katı cisim olarak kaydırmışlardır. Bu şekilde 2-boyutlu bir çalışma formülasyonu yapmışlardır. Her makara aralığındaki sac kısmı 2 boyutlu “plain-strain Reissner-Mindlin” kabuk elemanları ile modelleyerek (kapalı algoritma kullanarak) hesaplatılmıştır. 3 boyutlu gösterim için, 4 düğümlü Mindlin kabuk elemanları ile bu parçalı hesaplamaları yan yana getirerek düğümler birleştirildiğinde Şekil 2.12'deki gibi düzgün formlu bir yapıda prosesin hesaplanmasının mümkün olduğu belirtilmiştir.



Şekil 2.12: a) Brunet, Mguil ve Pol çalışmalarında 2 ve 3 boyutlu algoritma ile oluşturdukları profil, b) Deneysel ve hesaplanan zar gerinimleri [17]

Diğer varsayımları şu şekildedir:

Kesit Analizi için:

- 1) Makaralar hareketsiz, katı yüzey hareketlidir.
- 2) Makaralar katı cisim olarak modellenmektedir.
- 3) Sürtünme modellemesi kullanılmıştır.
- 4) Temas ve sürtünme çevre şartları statik-kapalı algoritma ile çözülmüştür.

3-boyutlu kabuk analizinde (3-D shell analysis) kullanılan bazı varsayımlar aşağıdaki gibidir:

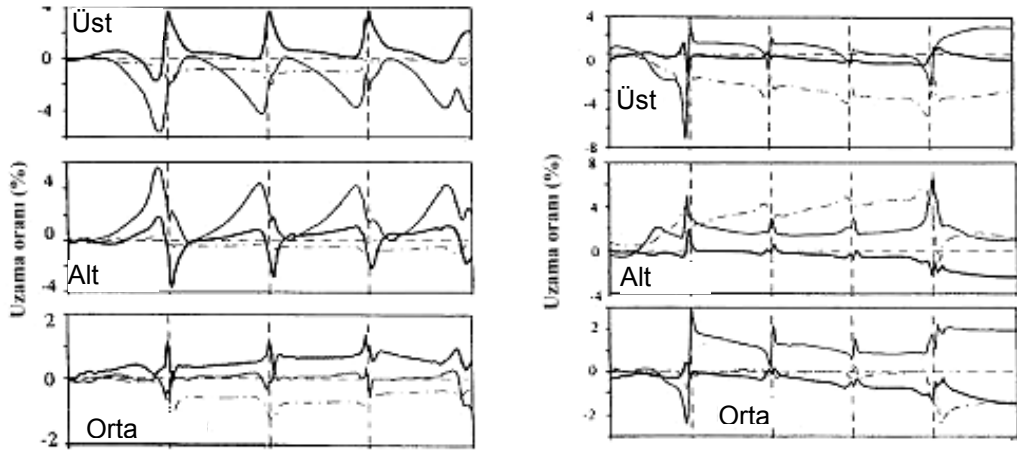
- 1) "4-node quadrilateral Mindlin" kabuk elemanları kullanılmıştır,
- 2) 2 ve 3 boyutlu analizlerde, anizotropik Hill modeli; izotropik sertleşme ile başlangıç anizotropisi (initial anisotropy with isotropic hardening).
- 3) Elastik gerinimlerin çok az olacağı varsayılmıştır.

Kalın ve ince saclar ve tüp için yapılan 3 çalışmada boylamasına gerinimlerin (longitudinal strain) PROFIL yazılımı ile yapılan hesaplamaların deney sonuçlarına göre %10 ila %30 arasında yüksek çıkmasının, makaraların katı cisim olarak modellenmesinden kaynaklandığını belirtmektedirler. Gerçek makinalardaki makaralardaki yaylanmanın bu farka sebep olduğunu tahmin etmektedirler [16,17].

Kalın saclarla çalıştıkları için "plane-stress" durumunun modelleme için uygun olduğunu belirtmektedirler. Tüp makaralı bükme işlemi ile sonuçların iyi çıkmasından sonra aynı çalışmayı u-kesitli açık profil için devam ettirmişlerdir. Elde ettikleri sonuçların deneysel olarak da desteklendiğini belirtmektedirler. PROFIL yazılımında sonuçların 2 boyutlu ve sonrasında 3-boyutlu olarak (Master FEM 2d, cross section analysis coupled with a "slave" FEM 3D) yapılıyor olmasına rağmen sağlıklı sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Boylamasına gerilmelerden korunmak için, makaralı bükme operasyonunda mümkün olduğu kadar işlemin bükme momenti ile yapılmasının (genişlik yönünde kuvvetlerle değil) önemli olduğunu vurgulamışlardır [16].

Panton, Duncan ve Zhu, boylamasına ve kesme uzamaları arasındaki bağıntı için çalışmalar yapmışlardır. Makaralı bükme işlemi için ilk bakışta görülen ve en büyük sorun olan kenarlarda uzama ve işlem sonunda tekrar kısalma nedeni ile yarattığı gerilmeler, yüzey dalgalanmaları veya uzamalar ile ilgili olarak yaptıkları analizde şu sonuçlara varmışlardır:

- 1) Yüzey gerinimleri, bükme gerinimleri gösterir şekilde önemli ölçüde değişiklik göstermektedir.
- 2) Her durumda boylamasına, genişlik ve kesme yönünde gerinim değerleri gözlenmektedir. Bunun düzlem-kesitlerin makaralı bükme işleminde düzlem olarak kalmadığını gösterdiği belirtilmiştir. Gerinim değerlerinin makaralardan tam geçerken tepe değerlere çıkması gibi tekrar eden durumların, Şekil 2.13'te verilen sonuçlarda gösterildiği gibi makaralı bükme işleminin doğasında olduğu belirtilmiştir [18].



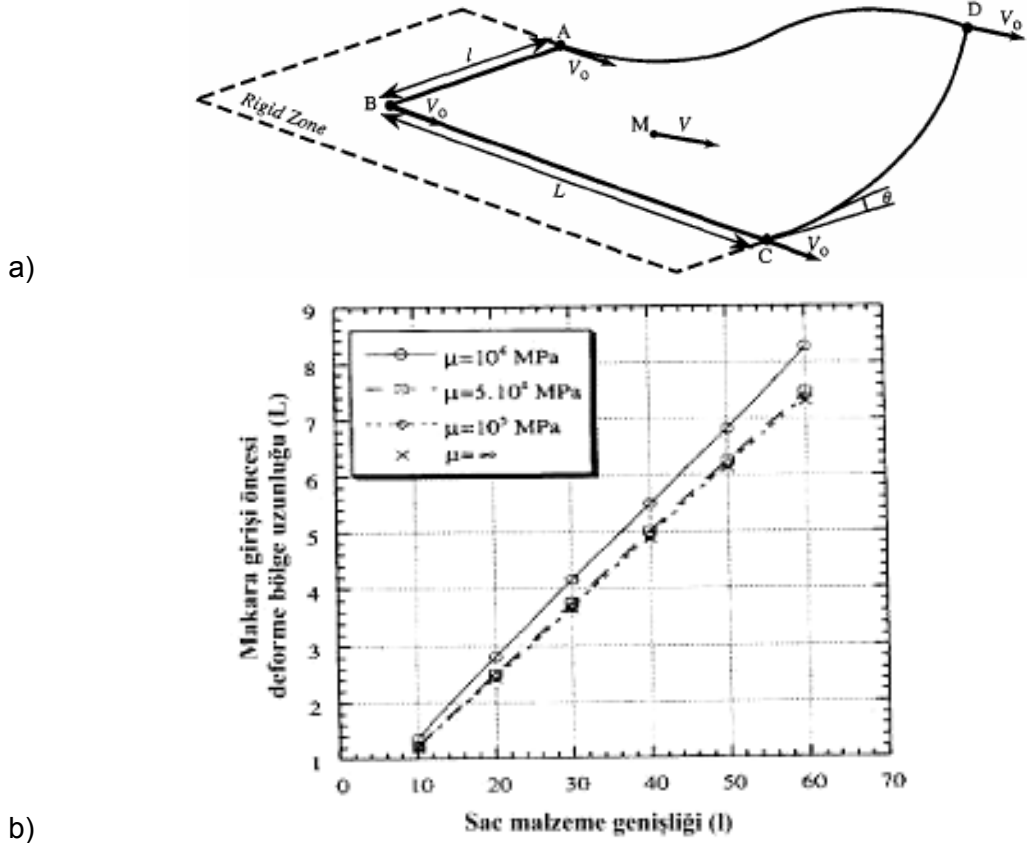
Şekil 2.13: Panton, Duncan, Zhu; Makaralı bükme esnasında sac malzemenin iç ve dış yüzeylerindeki gerinim değerleri. **(Yönler: —** Boylamasına, - - - Genişlik yönünde, _._._ Düşey düzlemde) [18]

Nefussi ve diğerleri, daha önce elasto-plastik malzemeler için yaptıkları çalışmayı katı plastik metal sac için genişletmişlerdir. Bu geliştirilen metod ile yaptıkları analizde, 0,6 mm kalınlığı olan sac malzemenin, lineer katılma kuralı 2.23

$$R = \sigma_0 + H \varepsilon^p \quad (2.23)$$

($\sigma_0=200$ MPa ve $H=400$ MPa) kullanılarak ilk makara istasyonunda (30° açı tasarlanmış) şekil değişimi incelenmiştir. Modellemede sünek çelik malzeme akma gerilmesi olarak $\sigma_y=265$ MPa, 1mm kenar bükme çapı ve sac kenar genişliği 20 mm kullanılmıştır. Modelleme sonuçlarının deneysel çalışma ile uyumlu olduğu ancak kalınlığın 0,6 mm olduğu durumlarda daha yüksek gerinim değerlerinin elde edildiği yazarlar tarafından belirtilmektedir. Yazarlar elde edilen yüksek değerlerin üst limit olarak tasarımcı tarafından kullanılabileceğini belirttiktedirler. Optimum sac genişliğine göre bükülecek kenar genişliği için sonuçlar Şekil 2.14'de gösterilmiştir [19].

Livatyalı ve diğerlerinin 2000 yılında yaptıkları çalışmada, kaplamalı ve boyalı sac malzemelerin, makaralı bükme işleminde bükülen sert köşelerde oluşan kaplama, boya kabarması veya çatlama sorunu SEA ile incelenmiştir. M-panel olarak nitelenen çatı kaplamalarında kullanılan panellerde, çatlak oluşumu, PAM-STAMP 3 boyutlu dinamik açık ve DEFORM programı yardımıyla modelleme çalışması yapılmıştır. Merkezde bulunan kanal şekli için, kanalın dış yüzeyinde oluşan tepe gerinimin kaplamanın üst sınırını aşmaması iyi bir tasarım için gerekmektedir [20].



Şekil 2.14: a) Makara girişindeki sac malzeme deformasyonu, b) Makara giriş şekil değişim uzunluğu (L_s) ve şekil değişim genişliği (l_s) grafiği [19]

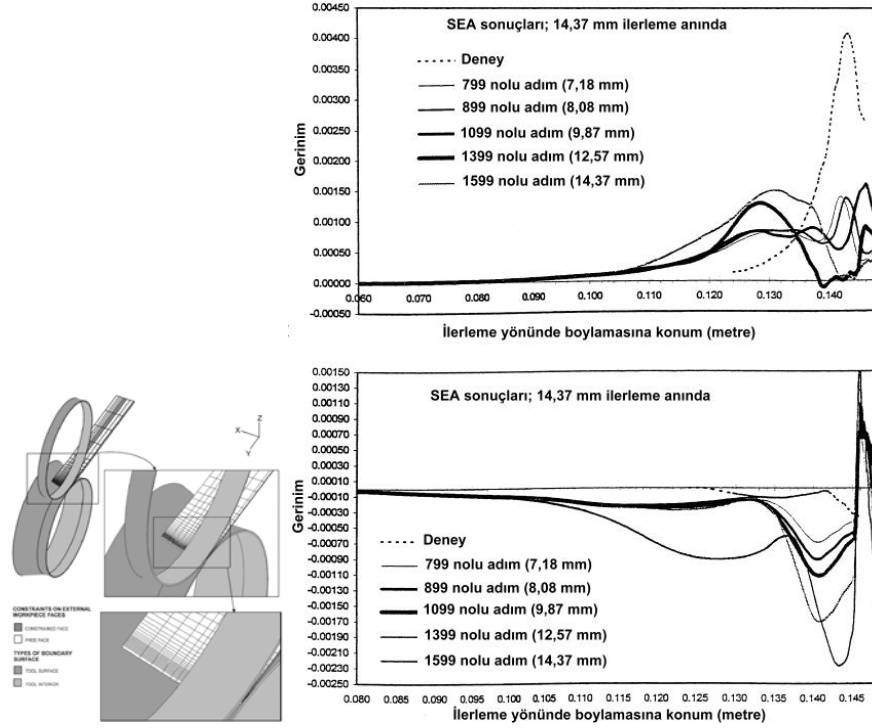
Livatyalı ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada modelleme simülasyonunun başarı ile yapılmasından sonra, tepe gerinim değerlerinin nasıl azaltılabileceği konusunda yeni yaklaşımlar, ilk olarak, PAM-STAMP programı kullanılarak, incelenmiştir. Birinci yaklaşımda, son makara istasyonunda üst ve alt makara köşelerindeki keskin kenarların çapları artırılarak daha yuvarlak bir geometri elde edilmiş, tepe gerinim değerleri 0,23 düzeyinden 0,18 düzeyine çekilmiş olmasına rağmen bu değer çatlak oluşmasını önlemek için gerekli 0,13-0,14 düzeyine ulaşmadığı görülmüştür [20].

İkinci yaklaşımda ise son makara istasyonuna giren şeklin değişik olması durumu incelenmiştir. Ancak bu denemelerde de başarılı bir sonuç alınamamıştır. Bunun yerine bölgesel burkulmayı daha iyi gösteren katı sonlu elemanlar kullanılması için, 2-boyutlu DEFORM programı kullanılmıştır. Yapılan yeni denemelerde, son makara istasyonunda aynı yaklaşımlar tekrarlanmıştır [20].

Son makara istasyonuna girecek şekil üzerindeki değişikliklerin çok etkili olduğu ve son makara istasyonunda makaralar arasındaki mesafenin artmasının köşelerde gerilmeleri azalttığı ve daha iyi sonuç verdiği ifade edilmektedir. Ayrıca, makaralardaki keskin kenarlarda çapın 1,98 mm'den 2,5 mm'ye çıkarılması ve makara eğiminin 52°'den 48°'ye düşürülmesinin çok daha iyi sonuçlar verdiği bildirilmektedir [20].

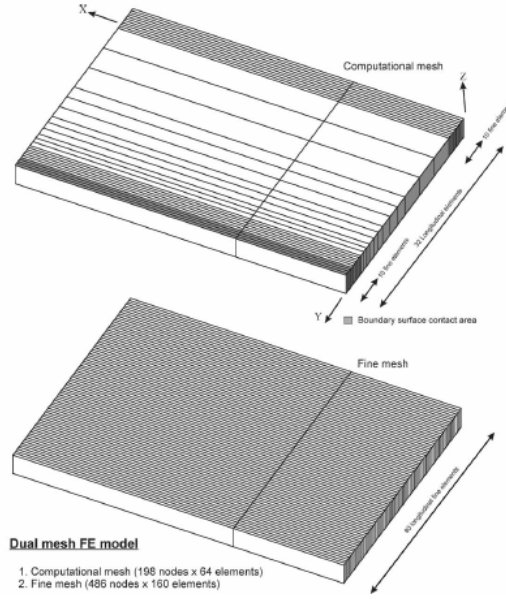
2001 yılında 6. LS-Dyna Kullanıcılar Konferansında sunulan Jan ve Onipede tarafından LD-DYNA programıyla yapılan simülasyon çalışmasında, sabit kalıplar (sac ile temas ettiği küçük dilimler kullanılmış) ve geriden ittirilen sac parça kullanılmaktadır. Sonuç olarak, sac levha üzerinde makaralı bükme işlemi sonunda gerilmeler kaldığı gösterilmiştir. 500x1500 mm (yarısı modellenmiş) sac levhanın, 500 mm ve 300 mm yarıçaplı kalıplarda makaralı bükme işlemi simülasyonu ve analizi yapılmıştır. Daha küçük (\downarrow) makara çapları ve makara istasyonlarının arasındaki mesafenin azaltılması ile daha iyi sonuçlar alındığı bildirilmektedir [21].

Alsamhan, Hartely ve Pillinger tarafından 2003 tarihli çalışmada, 3 boyutlu kapalı bir algoritma kullanan EPFEP3 yazılımı (Pillinger tarafından geliştirilmiş) kullanılarak makaralı bükme işlemi analizi yapılmıştır. Tek geçiş ve 20°'lik bir bükme açısı ile makaralı bükme işlemi modellenmiştir. Kararlı bir makara ve malzeme yapışması için sürtünme katsayısı 0,5 alınmıştır. İlk olarak üstteki makara aşağıya düşey olarak inmekte sonra ise makaralara dönme yer değiştirmesi uygulanmaktadır. Program, daha sonra sac malzeme 23 mm ilerleyecek şekilde çalıştırılmıştır. Malzemede görülen Şekil 2.15'te üstte verilen dağılımın taban kısmında olmaması gereken gerinim değerleri olduğu, gerçekte bunun görülmemesi ya da çok az olması gerektiği ve bunun makara modellemesinde temas sağlanabilmesi için makaraların malzeme içine girmesi neticesinde olduğu, yazarlar tarafından ifade edilmektedir. Bunun sonucunda kalınlık azalması olduğunu, modeldeki bu sonucun gerçek bir makaralı bükme işleminde görülmediğini vurgulamaktadırlar. Model zamanı olarak 1899 adımın, yaklaşık 100 saate tekabül ettiği belirtilmektedir. Maksimum plastik gerinimin bükme alanında olduğu, bunun da pratikte karşılaşılan durumla aynı olduğu vurgulanmaktadır. Yazarlar, modelleme ile verimli bir tasarım için fikir verdiğini ve modelin kullanılan değişkenlerle optimize edilebileceğini ifade etmektedirler [22].



Şekil 2.15: Model geometrisi, 1899. adımda gerinim dağılımı; Kenar üzerinde kabuk gerinim değerlerinin dağılımı (üstte), taban kısmında kabuk gerinim değerlerinin dağılımı (altta) [22].

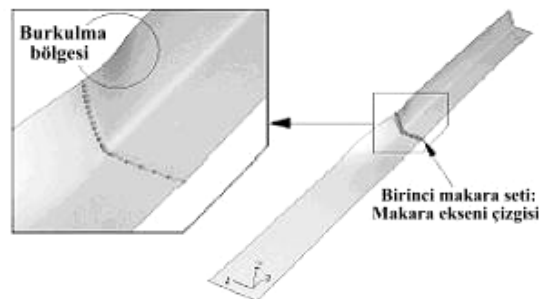
Alsamhan, Pillinger ve Hartely, 2004 tarihli çalışmalarında, Şekil 2.16'da gösterildiği şekilde SEA ile gerçek zamanlı ve yeniden sonlu eleman boyutlandırması (re-meshing) ile modellerini bir önceki çalışmalarına göre geliştirmişlerdir. Yazarlar genel olarak SEA çalışmalarında 3 yaklaşımı: 1) Sürtünmesiz bir ortamda ilk önce makara hareketi ile ilk şekli alan malzemenin sonrasında makaraların arasından, ucundan çekilmesi ile modelleme yapıldığını, 2) İlk hali düzgün bir sac malzemenin yine ucundan çekilmek suretiyle makaraların arasından geçerek incelendiğini, 3) Sac malzeme makaraların arasından geçirilmeden, geçeceği makaralarda uğrayacağı yer değiştirmelerin hesaplanarak, sac malzemeye o yer değiştirmelerin uygulanması, olarak belirtmektedirler. Bu çalışmada da yine bir önceki çalışmada olduğu gibi EPFEP3 programı kullanmışlardır. İkili eleman boyutlandırma ve yeniden eleman boyutlandırma teknikleri uygulayıp bir önceki çalışmalarından [22] farklı olarak hesaplama zamanında büyük düşüşler elde etmişlerdir. Sonuçların makul doğruluk ölçeğinde kalmış olduğu yazarlarca ifade edilmektedir [23].



Şekil 2.16: İkili (sonlu) eleman boyutlandırması; Hesaplanan (üstte) ve sıkı döşeme (fine mesh) (altta) [23]

Tehrani ve diğerleri 2006 yılında yaptıkları çalışmada gerinim burkulma sınırı (BLS) ile ilgili kenar yüzeyde inceleme yapmışlardır. Bhattacharyya ve Smith'in [7] makalelerinde sundukları deneysel sonuçlarla, ABAQUS (ver 6.4) programı ile yaptıkları SEA sonuçlarını kenar yüzeydeki burkulma için karşılaştırmışlardır. 300 x 20 mm boyutlarındaki sac levhayı 200 x 22 adet kabuk S4R elemanları ile modellemişlerdir. Malzeme olarak SAE 1020, sürtünme katsayısı olarak 0,2 değerini kullanmışlardır. Sac malzemenin makara setine girmesi için makaralardan birisi yukarıdan aşağı indirilip sac malzemeyi bükmekte ve daha sonra makaraların hareketi ile sac malzeme ittirilmektedir [24].

Tehrani ve diğerleri yaptıkları analizler sonucu, makara seti girişlerinde Şekil 2.17'de gösterilen burkulma ve iki makara istasyonu arasında makara aç farkının 30°'den fazla olduğunda kenar yüzeylerde dalgalanma gözlemlendiğini bildirmişlerdir [24].



Şekil – 2.17: Kenar burkulma modeli [24]

2.3.2 Kalın sac malzeme üzerine çalışmalar

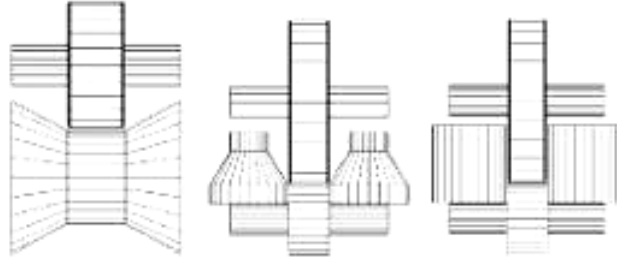
Heislitz ve diğerlerinin 1996 tarihli makalelerinde, ürün hatalarını bilgisayar ortamında göstermek ve tasarım/imalat sürecini kısaltmak için SEA ile gerilmeleri ve gerinim değerlerini hesaplamak üzere ticari bir paket program kullanarak yaptıkları çalışmayı sunmuşlardır. Dinamik açık algoritmalar kullanan PAM-STAMP programı yardımı ile yapılan modellemede, sac malzeme makaraların arasından çekilerek bükülmektedir. Analiz, kalın sac olması nedeniyle, kabuk elemanlar yerine analizde daha sağlıklı sonuç veren tek katman ve 8 düğümlü tuğla elemanlarla (8-node brick element) gerçekleştirilmiştir. Sac malzemenin sürtünmesiz makaraların arasından çekilmesiyle bükme işlemi yapılmış ve bükülen kenarda oluşan boylamasına gerinim sonuçları deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Yazarlar, sonuçların, deneysel sonuçlarla, yaklaşık %10'luk bir hata payı ile, uyumlu olduğunu belirtmektedirler [25].

Schmoeckel ve Sitzman tarafından yapılan 1996 tarihli çalışmada geliştirilmiş olan bilgisayar destekli tasarım, analiz ve simülasyon programından sunulmuştur. Çalışmalarında 3 mm ve 4 mm kalınlığındaki sacların makaralı bükme işlemi deneysel olarak alınan sonuçları kapalı algoritmalar kullanılarak MARC (implicit) programı ile modellenmiştir. Yapılan analiz ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmış ve sonuçlar destekleyici bulunmuştur [26].

Han, Liu, Lu ve Ren, 2001 tarihinde yayınlanan makalelerinde, B-spline sonlu şerit metodu (B-spline finite strip method) ile bükme açısı artışı, kalınlık, malzeme akma gerilmesi, dış kenar genişliği, cep genişliği ve iki makara istasyonu arasındaki mesafe gibi şekil-verme değişkenlerinin, makaralı bükme işleminde, u-kesitli geometri için, boylamasına kabuk gerinimini ve etkilerini araştırmışlardır. Sac malzemenin Prandtl-Reuss plastisite gerinim teorisi ve von Misses akma kriterleri ile uyumlu olduğu varsayılmıştır. Çalışmada, 1 geçişli, 15° açılı makara seti ve iki makara seti arası 400 mm olacak şekilde modellenmiştir. Ayrıca sac malzeme, 2 mm kalınlığında (akma gerilmesi 315 MPa) dış kenar yüksekliği 30 mm ve taban genişliği 20 mm olacak şekilde modellenmiştir. Yazarlar çalışmada şu sonuçları bildirmektedirler: Sac kalınlığının, akma gerilmesinin (σ_y) ve iki makara istasyonu arasındaki bükme açısının artması (\uparrow), bükülen malzemede tepe boylamasına zar uzamasının artması (\uparrow) ile sonuçlanmaktadır. Tam tersine, kenar yüksekliğinin, iki makara istasyonu arasındaki mesafenin ve taban genişliğinin artması (\uparrow) ile bükülen malzemede tepe boylamasına zar uzamasının azalması (\downarrow) ile sonuçlanmaktadır [27].

Hong, Lee ve Kim tarafından yapılan 2001 tarihli diğer bir makalede ise, makaralı bükme işleminde şekil verme uzunluğu ile ilgili parametrik bir çalışma sunulmaktadır. Çalışmada makaralı bükme işlemi simülasyon programı geliştirilmiş ve sonuçlar deneysel değerlerle karşılaştırılmıştır. Yazarlar, pekleşme üst sayısının şekil verilmemiş bir sac malzemedeki şekil verme uzunluğunun bulunmasında en önemli etkiyi yarattığını belirtmektedirler. Simülasyon programında 2 boyutlu ve 3 boyutlu karma bir programla çalışma yapılmış, malzeme düzlem-gerinim olarak modellenmiştir. İki boyutlu analiz, sac hızının herhangi bir anda ve sac kesitinin her noktasında aynı değerde olduğu varsayımına dayanmaktadır. COPRA-FE-RF programı kullanılmış ve Şekil 2.18’de gösterilen 0° – 30° – 60° – 90° açıları olan 3 makara seti kullanılmıştır [28].

Malzeme	AISI 1015
Sac kalınlığı	4.0 mm
Sac genişliği	236.0 mm
Makara hızı	0.1 m/s
Gerilme (MPa)	$\bar{\sigma} = 617.2(1.292 \times 10^4 + \bar{\epsilon})^{0.143}$
Sürtünme katsayısı	0.2 (varsayılan)

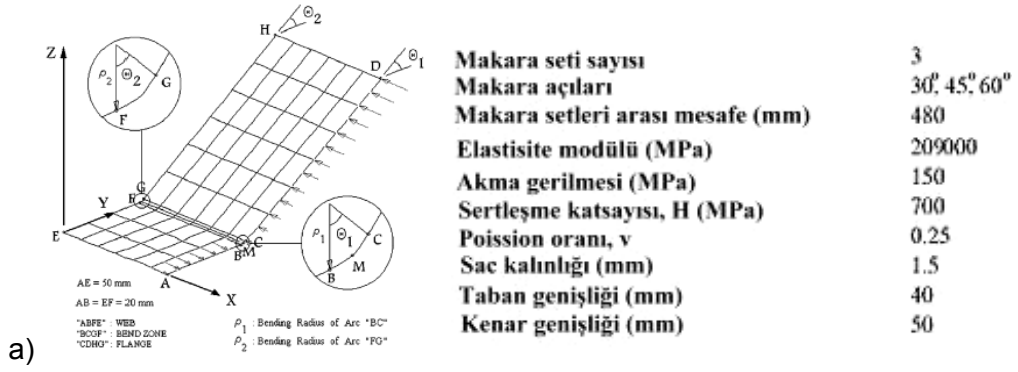


Şekil 2.18: Hong ve diğerleri tarafından kullanılan model [28]

Yazarlar, simülasyon çalışmasında, şu sonuçları elde ettiklerini bildirmektedirler: Pekleşme üst-sayısının büyük olması (↑) ile şekil verme uzunluğunun artması (↑) doğru orantılıdır. Malzemedeki büyük plastik gerinim değerleri arttıkça (↑) pekleşme üst-sayısı (↓) azalmaktadır. İşleme ile pekleşen malzemedeki şekil verme uzunluğunun azalması (↓), azami boylamasına gerinimin artmasına (↑) ve malzemeye şekil bozukluğu olmadan form verilmesinin zorlaşmasına neden olmaktadır. Çalışmalarında kullandıkları 2 veya 4 mm kalınlığındaki saclarda kalınlığın, şekil verme uzunluğuna etkisinin sınırlı olduğunu bildirmektedirler. İki makara istasyonu arasındaki mesafe azaldıkça (↓) burkulma ihtimalinin artacağını (↑) ve artması halinde ise geri yaylanmanın fazla olacağını belirtmektedirler [28].

Han, Liu, Lu ve Ren tarafından yapılan, 2002 tarihli makalede, kalın u-kesitli açık bir profil için, çoklu makara istasyonlarından geçişlerini simüle etmek üzere elastik-plastik büyük-deformasyon B-spline sonlu şerit metodu sunulmaktadır. Çalışmalarının sonuçlarını deneysel sonuçlarla karşılaştırarak geliştirdikleri yazılımın sağlıklı sonuçlar verdiğini bildirmektedirler [29].

Farzin, Tehrani ve Shameli, 2002 tarihinde yayınlanan makalelerinde, gerininin burkulma sınırı (buckling limit of strain, BLS) üzerine yoğunlaşmışlar, LUSAS 12.3 yazılımı ile SEA modellemesi yapmışlardır. Sonuçlarında, sac metalin gücünün sınırlayıcı olduğu durumlarda BLS analizinin pratik çalışmalarla uyumlu olduğu gösterilmektedir. BLS değerinin bilinmesi ile birlikte sac malzemenin kaç adımda hangi şekiller verilerek büküleceğinin (çiçek deseninin) bilinebileceği belirtilmektedir. Yazarların kullandıkları SEA modeli ve karşılaştırma için kullanılan çalışmadaki malzeme modeli ve değerleri Şekil 2.19'da gösterilmektedir [30].



a)

	Station no.		
	1	2	3
θ (°)	21	40	60
$\epsilon_{x,max}$ (%)	0.81	0.91	0.99

b)

Şekil 2.19: a) SEA modeli, b) 21°, 40° ve 60° makaralarda elde edilen maksimum gerinim değerleri [30]

Modelde EFGH hattında tutturulan bir saca ABCD hattındaki kenara yer değiştirme ile hareket kısıtlaması uygulanmaktadır. Sonuç olarak BLS değerinin verilen u-kesitli makaralı bükme işleminde bükme açısından bağımsız ve % 0,9 oranında olduğunu bildirmektedirler. U-kesitli açık profile, sadece kenar yüzeyin burkulma analizinde dikkate alınması gerektiğini taban alanının etkisinin sınırlı olduğunu belirtmektedirler. Kenar yüzey dikkate alınarak yapılan çalışmalarda, BLS değeri ile sac kalınlığı arasında doğru orantılı bir bağlantı olduğu bildirilmektedir [30].

Yazarlar, yazılım kullanarak yaptıkları analiz sonuçlarına göre hesapladıkları BLS değerlerini dikkate alarak Şekil 2.21’de verilen karşılık değerler ile makara açılarının hesaplamasını yapmışlar ve benzer teknik kullanılarak, BLS değerleri ile, başka geometrideki makara hesaplamalarının da yapılabileceğini belirtmektedirler [30].

Tajdari ve Farzin, 2002 tarihli makalelerinde, u-kesitli açık bir profilin makaralı bükme işlemini SEA yardımı ile incelemiştir. Bu çalışmada, kesme gerilme dağılımının, metal sac malzemesinin, elastik-plastik davranışında göz önüne alınmasını gerektirecek kadar önemli olduğuna dikkat çekilmektedir. Yazarlar sundukları çalışmada, tepe gerinim değerlerinin deneysel çalışmalarla uyumlu olduğunu ve bu tepe gerinim değerlerinin hat tasarımındaki en önemli değişken olması bakımından, yazılımlarının bu amaçla kullanılmasının hat tasarımına getireceği kolaylığı belirtmişlerdir [31].

Kim ve diğerleri tarafından yapılan 2003 tarihli çalışmada, kalın tüp makaralı bükme işlemi incelenmiştir. Geliştirdikleri Shape-RF programını kullanarak analiz yapmışlardır. Kalın sac bükmede karşılaşılan sorun olan kalınlık azalmasının kenar yüzeylerde oluşmasını önlemek için yaptıkları kenar optimizasyonu çalışmasını sunmaktadırlar [32].

Boman ve diğerleri tarafından yapılan 2006 tarihli çalışmada, SEA çalışmalarında yeni bir temas algoritması tanımlayarak makaralı bükme işleminin analizini yapmışlardır. Bu çalışmalarında ilk önce iki makara seti arasındaki sac malzeme alt makaraların ittirilmesi ile (bir nevi derin çekme gibi) form verildikten sonra temas alanlarındaki elemanlar sıklaştırılmış sonrasında sac malzemeye hareket verdirilmek suretiyle profil elde edilmiştir. Sac hareketi esnasında makaraların arasından geçtiği anda eleman sayısını sıklaştıran, temas alanından çıktıktan sonra eleman sayısını azaltan bir algoritmayı başarı ile denediklerini, ancak diğer çalışmalarla ve deneysel sonuçlarla karşılaştırmaya devam edeceklerini belirtmişlerdir [33].

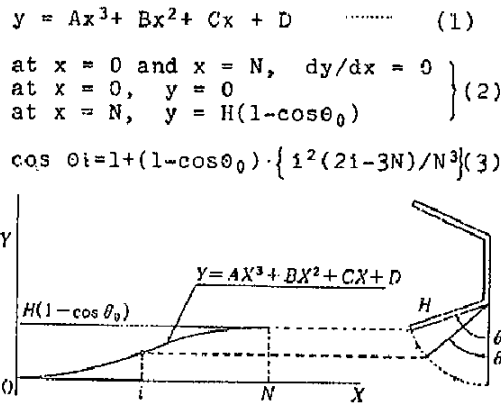
2.3.3 Yazılım geliştirme çalışmaları

Neubauer ve diğerleri, 1984 tarihli makalelerinde, üzerinde çalıştıkları bilgisayar yardımı ile makaralı bükme makara tasarımı konusundaki ilk örneklerden olan yazılımlarını anlatmışlar ve tasarım konusunda makaralı bükme işlemi ve çeşitli şekil verme işlemlerinin iç içe olduğu makinaların aşamalı tasarımını yapan programlarından bahsetmişlerdir [34].

Ona ve diğerleri, Neubauer ve diğerlerinin çalışmasına benzer bir şekilde makaralı bükme işleminin bilgisayar yardımı ile makara ve makina tasarımı konusunda deneysel çalışmaların sonuçlarını birleştirmiş ve hazırladıkları bilgisayar programı ile yapılan tasarımların elle yapılan hesaplamalar ile uyumundan bahsetmişler ve programın arkasındaki teorik ve deneysel sonuçları açıklamışlardır. Daha önce yazarların deneysel çalışmalarla oluşturduğu 2.25'te verilen formülünü

$$\cos\theta_i = 1 + (1 - \cos\theta_0) \times \left(\frac{i^2(2i - 3n)}{n^3} \right) \quad (2.24)$$

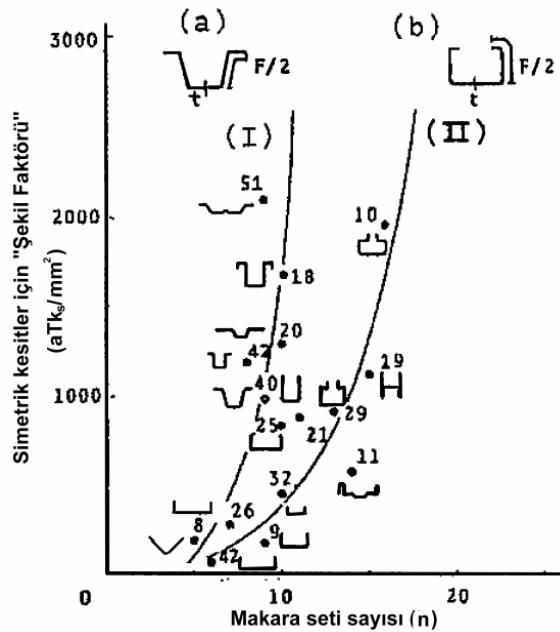
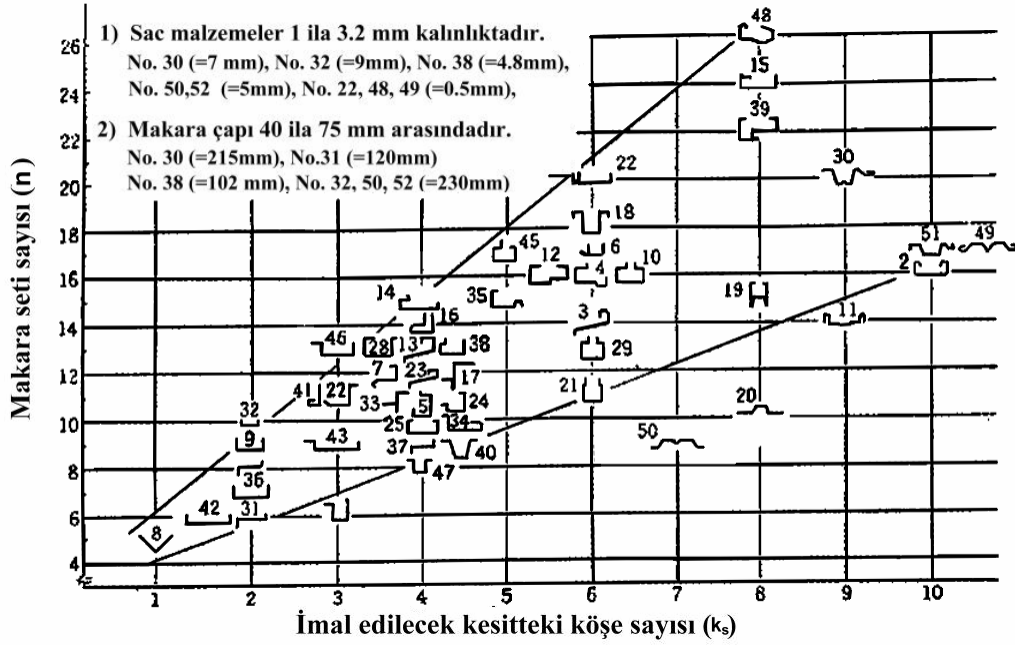
(θ_i : i sayılı istasyondaki bükme açısı, θ_0 : Son makara istasyonundaki bükme açısı, n : Toplam makara seti sayısı) yazılım içinde makara istasyonu hesabında kullanılmıştır. Pratik uygulamalarda edinilen deneyim ile uyumlu olarak son makara istasyonuna doğru bükme açılarının birbirine yaklaşması gereğinden hareketle, yazarlar, 3. dereceden bir denklemi Şekil 2.20'de verilen şekilde çözümü ile makara açılarının hesaplanmasında kullanılmasının uygun olabileceğini belirtmişlerdir [35].



Şekil 2.20: Ona ve diğerleri tarafından önerilen form açısı hesabı [35]

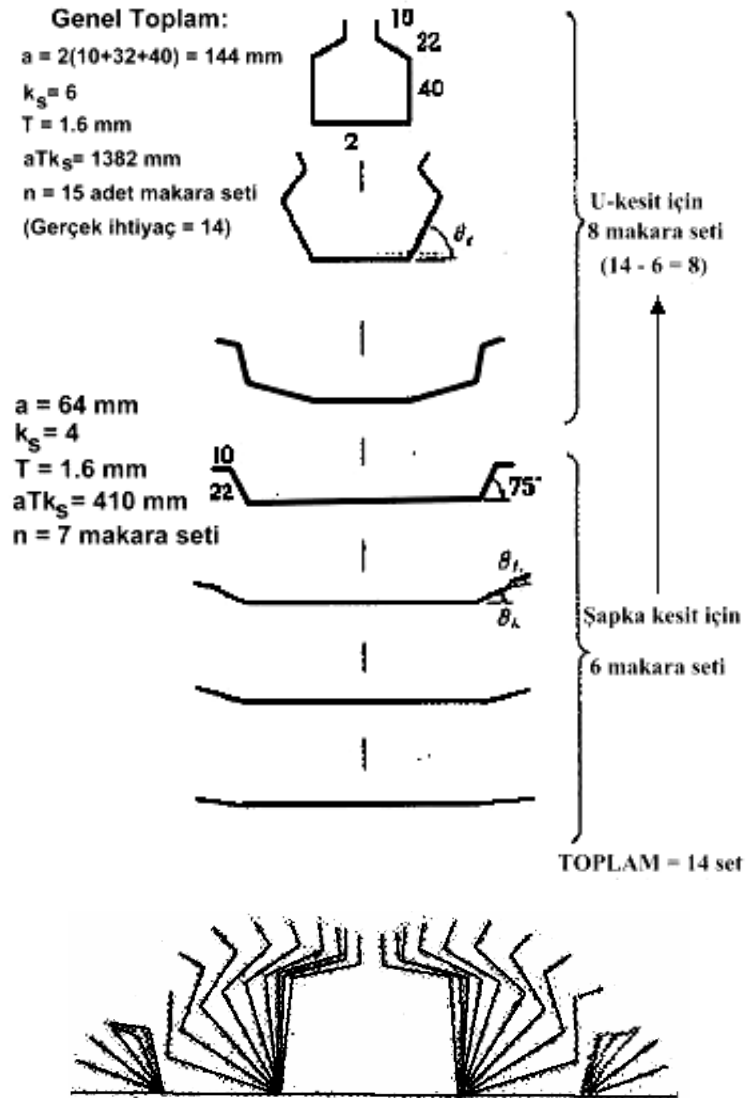
Yazarlar makara seti sayısını (n) bulmak için Hitachi Metals Ltd. Katalog No:265'te yer alan standart kesitler için Şekil. 2.21.a'da sunulan grafiği kullanmışlardır. Bu grafikte aTk_s (a : Kenar yükseklği, T : Sac kalınlığı, k_s : Kesitteki toplam köşe sayısı) şekil katsayısı (shape factor) hesaplanarak ilgili kesiti oluşturmak için gerekli makara istasyonu sayısı sunulmaktadır. İlk üründe elde edilecek şekil ile ilgili toplam makara sayısı hesap edilmektedir. Ardından gruplanmak suretiyle, ilk bükme işlemi için makara sayısı hesap edilerek sondan geriye doğru gidilmek suretiyle makara sayısı (n) hesaplanmaktadır. Örnek olarak makara istasyonu sayısı 4 ise ve son makara açısı 85° ise, makara açıları: 31° , 57° , 77° , 85° olarak hesaplanmaktadır [35].

Bu metod kullanılarak yapılan çalışmada Şekil 2.21'de verilen grafikte elde edilen makara sayısının gerekli olandan 1 adet daha fazla olduğunu belirtmektedirler. Dolayısıyla grafikten elde edilen makara sayısından 1 adet düşülerek gerçek ihtiyacın belirlenebileceği yazarlar tarafından ifade edilmektedir. Yazarlar Şekil 2.21.b'de verdikleri grafikte gibi C-tipi şekiller için V-tipi şekillere göre daha çok makara istasyonu gerektiğini belirtmektedirler [35].



Şekil 2.21: a) Hitachi Metals Ltd. Katalog No: 265'te yer alan standard kesitler için bitmiş üründeki köşe sayısı " k_s " ile bu şekli elde etmek için kullanılan makara seti sayısı " n " korelasyonu, b) Hitachi Metals Ltd. Katalog No: 265'te yer alan simetrik kesitler için Şekil Katsayısı " aTk_s " ile makara seti sayısı " n " bağıntısı [35]

Yazarlar örnek kullanım ile ilgili olarak Şekil 2.22’de sunulan kesit için toplam 14 makara seti sayısını şu şekilde bulmuşlardır: V kesimi için $n = 6$ ve C kısmı için kalan rakam $n = 8$ ($=14-6$) olarak aTk_s değerlerinden Şekil 2.21 yardımı ile bulmuşlardır. “n” değerlerinin bilinmesi ile V-tipi kesit için (0° ’den 75° ’ye bükülen kısım) $19^\circ \rightarrow 36^\circ \rightarrow 51^\circ \rightarrow 63^\circ \rightarrow 72^\circ \rightarrow 75^\circ$ açılarını kalan 8 istasyon için C-tipi bükme için de (0° ’den 90° ’ye) $17^\circ \rightarrow 33^\circ \rightarrow 47^\circ \rightarrow 60^\circ \rightarrow 72^\circ \rightarrow 81^\circ \rightarrow 88^\circ \rightarrow 90^\circ$ değerlerini bulmuşlardır. Bu değerlerin sonuna ise 90° ’yi geri yaylanma sonrası elde etmek için 15. makara olarak $93,1^\circ$ ’lik bir makara istasyonu ilave edileceğini belirtmişlerdir [35].



Şekil 2.22: Örnek uygulama [35]

Yuen tarafından yapılan çalışmada ise, makaralı bükme işlemi için bilgisayar destekli tasarım sistemi uygulaması önerilmektedir. Geliştirilmiş CADROF yazılımı ile makaralı bükme işlemi için makara tasarımı ve adım sayısı ile ilgili birikmiş tecrübeleri veritabanı ile tasarımcıya sunmaktadır. Yazar, edinilmiş tecrübelerle hızlı ulaşım ile tasarım sürecini kısaltmayı hedeflemiştir [36].

Rondal, çelik konstrüksiyon yapılarda kullanılan ve makaralı bükme işlemi ile hazırlanan malzemelerde makaralı bükme işleminin malzemede yarattığı iç gerilmeler gibi etkilerin, basma kuvveti altındaki elemanlara getirdiği davranış değişikliğini hesaplayabilmek için bir metod geliştirmeye çalışmıştır. İnşaat mühendisliği alanında kullanılan hesaplamalarda iç gerilmelerin hesaplanma zorunluluğunun getirilmesi bu çalışmanın tetikleyicisi olmuştur. Sonuç olarak yazar, temel bir formülasyonun daha geliştirilebileceğini, halihazırda ampirik olduğunu, ancak işlem sonrası iç gerilmeler ve geri yaylanma için iyi bir başlangıç noktası oluşturduğunu belirtmektedir [37].

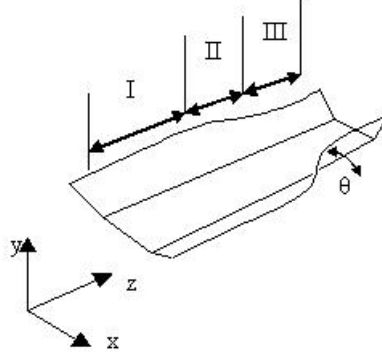
Haritos ve Ghosh, 1992 tarihli makalelerinde, ticari bir yazılım paketi olan PAFEC programına bir modül yazarak, bunu bir bilgisayar destekli tasarım/üretim sistemini makaralı bükme işlemi için kullandıklarını bildirmektedirler. Yazarlar, 8-düğümlü yarı eğimli bir eleman kullanmışlar ve bu elemanın ince duvarlı kesitlerde önemli ve en çok kullanılan malzeme olduğunu belirtmektedirler [38].

Panton, Zhu ve Duncan tarafından yapılan 1992 tarihli diğer bir çalışmada, temel olarak makaralı bükme işlemindeki 4 çeşit şekil değişikliği olan boylamasına esneme, boylamasına bükme, genişlik yönünde bükme ve kesme için gerinim ve iş formülleri geliştirilmiştir (Şekil 2.23) [39].

	Şekil değiştirme tipi	Gerinim	Birim uzunlukta yapılan iş	Hakim olan kesitsel özellik
1	Boylamasına esneme	$\frac{1}{2} r^2 \left(\frac{d\theta}{dz} \right)^2$	$\frac{J Y}{2} \left(\frac{d\theta}{dz} \right)^2$	J
2	Boylamasına bükme	$h \left(s \left(\frac{d^2\theta}{dz^2} \right) - p \left(\frac{d\theta}{dz} \right)^2 \right)$	$\frac{Yt}{4} \left(L \left(\frac{d^2\theta}{dz^2} \right) - K \left(\frac{d\theta}{dz} \right)^2 \right)$	L, K
3	Kesme	$p \left(\frac{d\theta}{dz} \right)$	$\frac{K Y}{2} \left(\frac{d\theta}{dz} \right)$	K
4	Genişlik yönüne bükme	$\frac{h}{r_0}$	$\frac{Yt^2}{4} (\theta - \theta_1)$	t

Şekil 2.23: Temel şekil değiştirme tipleri ve bölgesel özellikler [39]

Yazarlar kesme geriniminin diğerlerine oranla etkisinin çok daha büyük olduğunu belirtmektedirler. Yazarlar $\frac{d\theta}{dz}$ bükme açısı eğrisinin Şekil 2.24'te gösterilen II ve III numaralı alanlarda en hızlı değiştiğini ve bu değişkenin şekil verme zorluğunun en önemli göstergesi olduğunu belirtmektedirler.



Şekil 2.24: Makaralı bükme işlemi sırasında sac kenarında oluşan 3 farklı alan [39]

Yazarlar, Şekil 2.23'te gösterildiği üzere geliştirdikleri formülasyonu tablolastırmışlardır. Buna göre ilk etapta: Şekil 2.24'te görülen 1, 2 ve 3 numaralı bölgelerde $\frac{d\theta}{dz} \gg \left(\frac{d\theta}{dz}\right)^2$, olduğundan, kesme geriniminin en büyük ifade olduğunu ve dolayısıyla, kesme yönünde işin, boylamasına germe ve boylamasına bükme gerinim değerlerine göre çok büyük olduğunu belirtmektedirler. Buna göre, kesme gerinimi ile yapılan iş değerinde de yer alan "K" değerinin (polar first moment of area) minimize edilmesi (polar arm, p değerinin en küçük olması) kesme geriniminin de en aza indirilmesi sonucunu verecektir. Bu sonuç tecrübelerine göre, sac merkez çizgisine en yakın kısımları bükmeyle başlayıp, dışa doğru diğer bükme işlemlerini yaparak gidilmesi ile de uyum göstermektedir. Kesme yönünde yapılan iş büyük olduğundan malzeme bunu en aza indirecek şekilde bir şekil değişikliği tepkisi verecektir. Yazarlar elemanların, kesme yönü yerine, düzlem içine doğru burulması ile sonuçlanacağını bu nedenle genişlik yönünde kesitlerin düzlem olarak kalmayacağını bildirmektedirler. Yazarlar sonuç olarak makara istasyonlarını, aşırı kesme yaratmayacak ve burulmaya imkan verecek şekilde tasarlanmanın önemini büyük olduğunu belirtmektedirler [39].

Brunet ve Ronel tarafından yapılan 1994 tarihli çalışmada, düzlem akma kabuk elemanlarına (Plane strain shell elements) dayanan, kesit analizini, 2-boyutlu elastik-plastik davranışlı ve iki makara istasyonu arasında 3-boyutlu özel bir SEA metodu geliştirilmiştir. Coulomb sürtünme kanununu uygulayıp, kapalı algoritma ile analiz yapmışlardır [40].

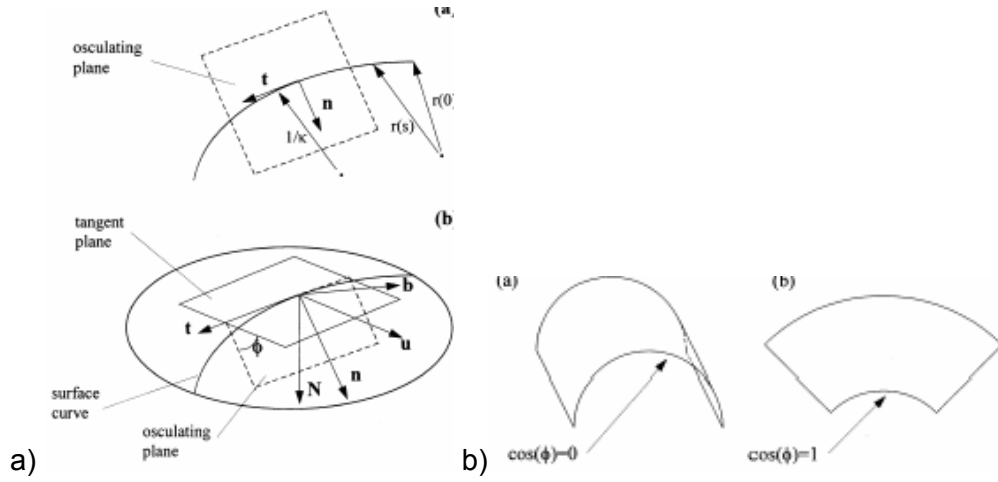
Yazarların çalışmalarında kullandıkları prosedür özetlenirse, boylamasına gerinim değerlerini daha iyi gözlemek için, Mindlin kabuk elemanlarından oluşan, daha az yoğun bir 3-boyutlu eğimli yüzeyi iki makara arasında kullanmışlardır. Hem 2-B hem de 3-B analizde, izotropik ve kinematik sertleşmeli, başlangıç anizotropik Hill modelini kullanmışlardır. Sonuçta kullandıkları SEA modeli ile deneysel modelin birbirlerini destekleyici şekilde uyumlu sonuçlar verdiklerini belirtmişlerdir [40].

Kiuchi, Abe, Onodera, 1995 tarihli makalelerinde, makaralı bükme işlemi için bir sayısal simülasyon metodu geliştirip, çeşitli makaralı bükme işlemlerinin simülasyonlarını yaptıklarını belirtmektedirler. Çalışmalarında deformasyona uğrayan kenar alanda analitik olarak hesaplanan uzama ile boylamasına gerinimi hesaplamışlar ve deneysel verilerle karşılaştırmışlardır. Veritabanı oluşturulursa, makara tasarımı ve çıkacak sonuçların hesap edilmesini sağlayacağını belirtmişlerdir [41].

Nallapati, 1996 tarihli doktora tezinde, makaralı bükme tezgah tasarımı yazılımı geliştirmek için kapsamlı bir derleme çalışması yapmıştır. Nallapati, uzunluk ile ilgili olarak makaralardaki koniklik yüzünden kaynaklanan yüzey hızı değişmesinin ($v=\omega \times R$; v : Sac ilerleme hızı, ω : Makara dönme hızı, R : Makara yarıçapı) uzunluk tolerans değerinde 8 ila 10 kat arasında artışa sebep olduğunu bildirmektedir. Makara setlerinin, gerekli çaplardan en az 1,6 mm ile 3,2 mm arasında daha büyük çaplı olarak imal edilmesinin, ileride taşlama ile yüzey pürüzlülüğünün giderilip makaraların birden fazla kullanımını sağlaması açısından önermektedir. Sonuç olarak, makaralı bükme işlemi ile imal edilecek bir parça için makara setlerini varolan bağıntılar ve tolerans değerlerine göre tasarlayan yazılımını sunmaktadır [5].

Panton ve diğerleri tarafından yapılan 1998 tarihli çalışmada, Şekil 2.25'te gösterildiği şekilde, "free-flowing" olarak isimlendirilebilecek yüzeyin özelliklerini tanımlamak amacıyla, geniş panellerin fiziksel modelleri incelenmiş ve asgari kısıtlama olduğunda yüzeylerin bir sıfır Gauss eğriliği olacak şekilde biçim değiştirmesinin gösterimi yapılmıştır. Yüzey eğiminin, makaralı bükme işleminden geçen bir malzemenin üzerinde bir noktanın, uzayda 3 boyutlu izlediği yola "uzay eğrisi", bu yolun genel sac yüzeyi ile uyumlu olması haline ise "yüzey eğrisi" denilmektedir. Bu yüzey eğrisinin, her hangi bir noktada, yüzey eğrisi ile örtüşen (3 den fazla noktadan geçen bir düzlem) düşey bir düzlem ile o noktada tanjant bir düzlem arasında izdüşümleri alınarak, normal eğrilik ve jeodezik eğri gösterimi $K_n(s)=K(s) \sin(\phi)$ ve $K_g(s)=K(s) \cos(\phi)$ olacak şekilde ve ana eğrilik olarak değerlerinin maksimum ve minimum oldukları yerde K_1 ve K_2 olarak gösterilmektedir. Ayrıca, ortalama eğrilik $H= (K_1+K_2) / 2$ ve Gauss eğriliği ise $G=K_1*K_2$ olarak gösterimi yapılmaktadır [42].

Yazarlar burada, Gauss eğriliğinin sıfır değerini alması halinde ($G=0$) (K değerlerinden birinin sıfır değerinde olması halinde) o yüzeyin geliştirilebilir bir yüzey olduğunu ve önemli bir özellik olarak, düz bir sac malzemedan uzama veya kesme gerinimi olmadan form verilebileceğini belirtmektedirler. Sonuç olarak yazarlar, makara şekli, aralıkları dahil olmak üzere makaralı bükme işleminin hesaplamalarında “ $\cos \phi$ ” açısının dikkate alınarak bu değer mümkün olduğu kadar 0 değerine yaklaştırılmasının iyi bir tasarım olacağını vurgulamaktadırlar [42].



Şekil 2.25: Geometrik gösterim, a) uzay eğrisi ve yüzey eğrisi, b) Yüzey dışına doğru bükme ve yüzey içinde bükme [42]

Shen ve diğerleri tarafından yapılan 2003 tarihli çalışmada ise, makaralı bükme işlemi için makara setleri tasarımı konusunda uzman sistem metodu ile çözüm aranmaktadır. Varolan tasarım birikimini ve deneyimleri toplayarak, benzer diğer şekillerin tasarımına karar veren bir program geliştirmeye çalışmışlardır. Yazarlar, tatminkar ve hızlı bir şekilde herhangi bir şeklin çiçek desenini dolayısıyla her makara istasyonunda yapılacak bükme işlemini kolaylıkla çıkararak tatminkar bir tasarım sisteminin elde edildiğini ifade etmektedirler [43].

2.4 Genel Değerlendirme ve Problemin Tanımlanması

Kenar dalgalanmaları, makaralı bükme işlemi esnasında en sık karşılaşılan sorunlardan biridir. Halihazırda yapılan çalışmalarda genel olarak kusur görülmemesi için makara adedi, bazı gerinim hesapları gibi genel ampirik yaklaşımlar sunulmaktadır. Kombinasyonların hepsinin aynı anda denenmesinin imkansızlığı nedeni ile ampirik modellemelerde bazı etkiler yok sayılmaktadır.

Çalışmalarda geometrik değişkenlerden bazılarını kullanarak veya gerinimi baz alarak makara tasarımının yapılması önerilmektedir. Bağıntılar kullanarak elde edilen sonuçlarda geometrik değişkenler kullanılarak hesaplanan Form açısı metodu, Bhattacharyya metodu, Form oranı metodu, Ona ve Jimma modeli gibi metodlarda bazı değişkenler kullanıcıya bırakılmakta veya malzeme özellikleri gibi değişkenler fazla etkisi olmadığı düşünüldüğü için devre dışı bırakılmaktadır.

Örnek bir hesaplamada, form açısı metodu (malzeme özellikleri dikkate alınmadan) ile 4 makara seti ile istenilen açıda bükme yapılabileceği hesaplanabilirken, form oranı metodu ile malzeme özelliği dikkate alındığında elde edilen makara sayısı 5 veya 6 olarak hesaplanabilmektedir. Makaralı bükme işlemlerinin çoğunluğunda sac malzemenin 2 veya üzerinde bükme işlemi yapıldığı düşünüldüğünde tasarımcı için makara sayısına karar verebilmek büyük önem taşımaktadır. Daha az makara seti ile kusuru gideremezken, fazla makara setleri ile ise daha pahalı, kurulum/hizalama açısından daha çok zaman gerektiren ve imalatçılar için fabrikalarında daha çok yer işgal eden bir makina ile dezavantajlı konuma gelebilmektedirler.

Teorik ve SEA çalışmaları, varolan deneysel çalışmalarda elde edilmiş maksimum gerinim değerlerinin SEA yöntemi ile doğru hesaplanmasına ile sınırlı kalmaktadır. Bu konuda UBECO veya COPRA-RF gibi hazır paket programlarda varolan ampirik analiz metodlarının yanına son yıllarda ticari SEA programları (Marc, Abaqus ..vb) tarafından analizi yapılacak şekilde girdi dosyası hazırlama modelleri de sunulmaya başlanmıştır. Ancak incelenen örneklerde daha kalın malzeme davranışı gösteren elemanlarla girdi dosyası oluşturulmakta ve sonuçlarda modelleme basitleştirme nedeni ile daha az kusur gözlenmektedir.

Halihazırdaki makale çalışmalarında ise daha önceki diğer araştırmacılar tarafından yapılan deneysel çalışmalarla karşılaştırıldığından bildirilen sonuçların gerinim değerleri ile sınırlı olması nedeni ile gerinim değerlerinin doğru hesap edilmesi ve bükme işleminin pürüzsüz bir şekilde düzgün çıktığı yönündedir.

Ancak maksimum gerinim değerlerinin doğru hesaplanması ile makaralı bükme işleminde kenar dalgalanmalarının olmayacağı varsayılması bu çalışmalardaki önemli bir eksikliklerdir.

Seneyake ve diğerlerinin 1994 tarihli çalışmaları [14] ile Tehrani ve diğerlerinin [24] çalışmasında makara öncesinde görülen bölgesel burkulma ve kenar dalgalanmasına etkisi gibi deneysel çalışmalarla tespit edilmiş şekil bozukluklarına neden olabilecek tespitler yapılmıştır; ancak deneysel bir veri ile karşılaştırılmadığı için sorun hakkında detaylı değerlendirmeler yapılmamıştır.

Watari ve Ona'nın 1998 tarihli çalışmalarında delikli saclar için kusurları inceledikleri çalışmalarda olduğu gibi sac malzeme davranışı ile ilgili değerli katkılar sağlanırken tek bir malzeme ile çalışmalar yapıldığı için malzeme etkilerinin olup olmadığı görülememektedir [6].

Sonuç olarak, yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde, deneysel olarak sac malzeme davranışına etki eden değişkenlerin etkileşimleri konusunda bir boşluk bulunmaktadır. Elde edilmiş deneyim ve klasik ampirik bağıntılar, günümüzde daha dar tolerans değerleri ve daha kusursuz ürün elde etme yönünde olan talebi karşısında yetersiz kalmaktadır. Kenar dalgalanma davranışlarının daha iyi anlaşılması ile bu kusuru kontrol etmede ve tasarım aşamasında önlem almada önemli bir boşluğu dolduracaktır.

Bu çalışmada ince sac malzemedede daha sık görülen kenar dalgalanma sorunu hakkında, simetrik u-tipi açık profil kesiti üzerinde, makara dizilişi, kenar yüksekliği ve malzeme etkilerinin ve aralarındaki etkileşimlerin deneysel olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Aynı zamanda SEA için geliştirilmiş dinamik açık algoritmalar kullanarak, gerinim hesabı ile kısıtlı kalmak yerine, doğrudan makaralı bükme işleminin bütünüün simülasyonu ve analizi yapılması suretiyle geometrik olarak elde edilecek profilin alacağı şeklin hesaplanması da amaçlanmıştır. Bu yöntemle geliştirilecek model ile pahalı deneyler yapma yerine bilgisayar ortamında deneysel çalışmanın yapılması veya makara tasarımına göre nihai ürün şeklinin hesaplanması amaçlanmıştır.

3. METODOLOJİ

Günümüzde makaralı bükme işleminden daha dar tolerans değerlerinin talep edilmesi ve gelen kesitlerin değişkenliğinin giderek artması ile makaralı bükme işlemine etki eden değişkenlerin daha detaylı incelenmesine ve yeni deney yaklaşımlarının tatbik edilmesi ile değişkenlerin ve etkileşimlerinin daha iyi anlaşılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. SEA yazılımlarının daha etkin kullanılması ve deneylerin bilgisayar ortamında daha güvenilir bir şekilde yapılması ile pahalı deney düzenekleri nedeniyle kısıtlı kalmakta olan çalışmalar zenginleşecektir.

Bu çalışmada makaralı bükme işlemi esnasında ince sac malzemedeki en sık karşılaşılan sorunlardan olan kenar yüzeylerde dalgalanma kusuru davranışının daha iyi anlaşılması ve bilgisayar ortamında analiz edilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca, kenar dalgalanma kusurlarının daha çok görüldüğü ince sac malzeme ve simetrik u-tipi açık profil temel alınarak deneysel çalışma yapılması ve deney sonuçlarını bilgisayar ortamında hesaplayacak bir SEA modeli geliştirilmesi amaçlanmıştır.

Bu çalışmada, makaralı bükme işleminde çok kullanılan u-tipi simetrik açık profil ile deneysel olarak çalışmaların yapılması ile kenar dalgalanma davranışlarının anlaşılması amaçlanmıştır. Deneysel çalışma ile makara dizilişi, kenar yüksekliği ve malzeme tipi değişkenlerinin kenar dalgalanmasına etkileri ve değişkenlerin arasındaki etkileşimlerin anlaşılması hedeflenmiştir. Söz konusu etki ve etkileşimlere dikkat edilerek tasarım aşamasında önlem alınması ile, kenar dalgalanmasının kontrol edilmesinde önemli faydalar sağlayacağı düşünülmektedir.

Deney sonucu elde edilmiş profillerdeki kusurların ölçülmesi ve bilgisayar ortamına aktarılması ile SEA sonuçlarını kıyaslama amacıyla kullanılacak referans veriler elde edilecektir.

Yeni bir SEA modelinin (mümkün olduğunda az hareket kısıtlaması kullanılarak, gerçek işleme en yakın şekilde) geliştirilmesi ile sac malzeme davranışının, bilgisayar ortamında, deneysel olarak elde edilmiş sonuçlarla uyumlu olarak, hesaplanması beklenmektedir. Ayrıca geliştirilmiş SEA modelinin, gerekli uyarlamalar yapılarak, iyileştirme hesabında da kullanılması amaçlanmaktadır.

3.1 Çalışma planı

Yukarıda da bahsedildiği üzere çalışmalar başlıca iki gruba ayrılmıştır. İki grupta aşağıdaki şekilde bir çalışma yapılması planlanmıştır.

1) Deneysel olarak kenar dalgalanmalarının incelenmesi

- i. Bu aşamada makaralı bükme işleminde kullanılan değişkenlerden makara dizilişi, kenar yüksekliği ile malzeme tipi etkileşimi incelenmesi amacıyla temel bir geometri olan u-kesitli açık profil üzerinde deneysel çalışma yapılarak kenar dalgalanmalarının davranışı incelenecektir. Taguçi yaklaşımı ile L8 tam eşleştirmeli deneysel yöntemi deney tasarımı ve incelemesi için seçilmiştir. Deney sonrasında elde edilen kusurlu profiller 3-boyutlu tarama cihazı ile nokta bulutu olarak taramadan geçirilecektir. Son aşamada elde edilen değerler L8 tam eşleştirmeli deneyleri inceleme metodu ile değerlendirilecektir. Bu yöntem ile geleneksel deneylerden farklı olarak birden fazla faktörün aynı anda incelenmesi ile faktörlerin birbirleri ile olan etkileşimini de verimli ve hızlı bir şekilde gözlemlemek mümkün olacaktır [44].

2) SEA modeli geliştirilmesi

- i. Birinci aşamada varolan SEA modelleri incelenmiş ve gerçeğe daha yakın bir modelleme için makaraların hareketi ile ilerleyen bir model geliştirilmiştir. Yayınlanmış makalelerde referans verilen temel bir geometri ve sonuçların yer aldığı Bhattacharyya ve Smith'in [7] çalışması ile SEA programı ile yapılan modellemenin sonuçları karşılaştırılacaktır.

Ayrıca modellemede daha büyük bir sistemin SEA analizinin makara hareketi ile daha gerçekçi yapılabileceği değerlendirilmiştir. 20°'lik makara girişinde elde edilen gerinim ile deneysel çalışma karşılaştırılarak modelin doğruluğu kontrol edilecektir.

- ii. İkinci aşamada ise birinci aşamada geliştirilen modelin deneysel çalışmada kullanılan geometriye göre düzeltilmiş u-kesitli simetrik açık profil için sonlu elemanlar yöntemi ile simülasyonu yapılacaktır. SEA modelinde mümkün olduğu kadar gerçekçi olması için temas sorunu yaşamayacağı en az kısıtlama ile deneyler sıra ile tekrarlanacaktır. Elde edilen sonuçlar ile deney sonuçları arasında karşılaştırma yapılacaktır.

- iii. Üçüncü ve son aşamada elde edilmiş modelin uyarlanması ile değişik makara geometrilerinin (15° - 30° - 45° - 75° ve 25° - 50° - 70° - 75°), sac malzemeden elde edilecek aynı profil kesiti için şekil bozukluklarının giderilmesinde hesaplaması incelenecektir.

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

Deneyler daha önce Panel 85 profili için imal edilmiş (Şekil 4.1) 2 kademeli ve 8 makara setinden (ilk set 0° makara seti) oluşan bir makinada gerçekleştirilmiştir. Deneylerde bu makinanın son 4 makara seti kullanılmıştır. Halihazırda varolan 15° - 30° - 45° makaraların yanı sıra istenilen ölçülebilir dalgalanmayı elde etmek için çıkış seti olarak 85° açılı ilave makara seti imal edilmiştir.

Deneysel çalışmada ilk etapta kontrol edilebilen değişkenlerin değerleri belirlenmiştir. Deney L8 metodu ile tam eşleştirmeli olarak yapılmasına karar verildiğinden belirlenecek 3 değişken için toplam 8 deney yapılmıştır. Deneylerde aşağıdaki değişkenler kullanılmıştır:

- 1) Makara dizilişi (A): $15^\circ - 30^\circ - 45^\circ - 85^\circ$ ve $15^\circ - 30^\circ - 85^\circ$
- 2) Kenar yüksekliği (Sac genişliği) (B) : 17 mm (110 mm) ve 12 mm (100 mm)
- 3) Malzeme (C) : Alüminyum ve sünek çelik

Deney metodu olarak şekil değişikliklerinin deney ardından 3-boyutlu nokta bulutu şeklinde tarama yaptırılması planlandığı için belli bir büyüklükte yüzey dalgalanması görülecek şekilde makara dizilişi tercih edilmiştir.

Bhattacharyya ve Smith'in çalışmalarında bahsettikleri 0° - 45° - 85° - 90° makara dizilişi ile gözle görülen bir şekil bozukluğu olmadan 0,6 mm kalınlıkta malzemedan makaralı bükme işlemi ile malzeme çekilmiş olduğunu bildirmektedir. Yazarlar tarafından maksimum açı değerini belirlemek için deneme yapılmasını ve bu değer belirlenmesinden sonra makara diziliş açılarını sıralaması önerilmektedir [7]. Ona ve diğerlerinin çalışmasında verilen metodoloji ile ise 85° 'ye kadar 4 makara istasyonu ile 31° - 57° - 76° - 85° önerilmektedir [35]. Bir başka çalışmada ise Tehrani ve diğerlerinin yaptıkları SEA analizi ile 30° üzerindeki analizlerde şekil bozukluğu gözlemlendiği bildirilmiştir [24]. Watari ve Ona'nın çalışmasında ise geniş paneller için genel uygulamaya gönderme yapılarak ilk girişte daha küçük açılarla bükmeye başlamanın kenar dalgalanmaları azaltıcı etkisinden bahsedilmektedir [4].

Bu değerlendirmeler ışığında makara dizilişini belirlemek ve elde edilen profillerin gözlenebilir şekil farkları yaratıp yaratmadığının belirlenmesi için ön-denemeler yapılmıştır.

Bu denemelerde makinanın kullanılacak kısmı olan son 4 makara istasyonunda ayarların bozulmaması için ilk 3 makara seti (15°, 30° ve 45°) A1 kombinasyonunda korunmuş ve 85° olan son makara setinde hizalama ve ayarlama yapılmıştır. A2 kombinasyonunda ise 45°'lik makara seti yerine 85° olan makara seti çıkış makaraları olarak hizalanmış ve bu şekilde hizalamadan kaynaklanabilecek kusurlar en aza indirilmiştir.

Kenar yüksekliği değişken değerleri, ölçülebilir farklı yüzey dalgalanmaları yaratacak şekilde belirlenmiştir. 110 mm genişliğinde sac malzemenin oluşturduğu B=17 mm'lik kenar halihazırdaki makinadaki en geniş kenar değeri olduğu için ilk değer olarak karar verilmiş, diğer değişken belirlenmesinde ise bir önceki kenardan 5 mm daha kısa malzeme ile yapılan denemelerin istenilen farkı yarattığı görüldüğü için değişken ikinci değeri olarak 100 mm sac genişliğine (12 mm kenar yüksekliği) karar verilmiştir.

Çalışmada EFS Makina'ya halihazırdaki makinanın kullanması için sipariş veren firmadan daha önce numune olarak verilen alüminyum rulo ve bir başka çalışma için yine numune olarak bırakılmış sünek çelik malzeme kullanılmıştır. Bu malzemeler deneylerde kullanılmak üzere istenilen uzunluk ve genişlikte kestirilmiştir.

4.1 Makaralı Bükme Tezgahı ve Makara Takım Bilgileri

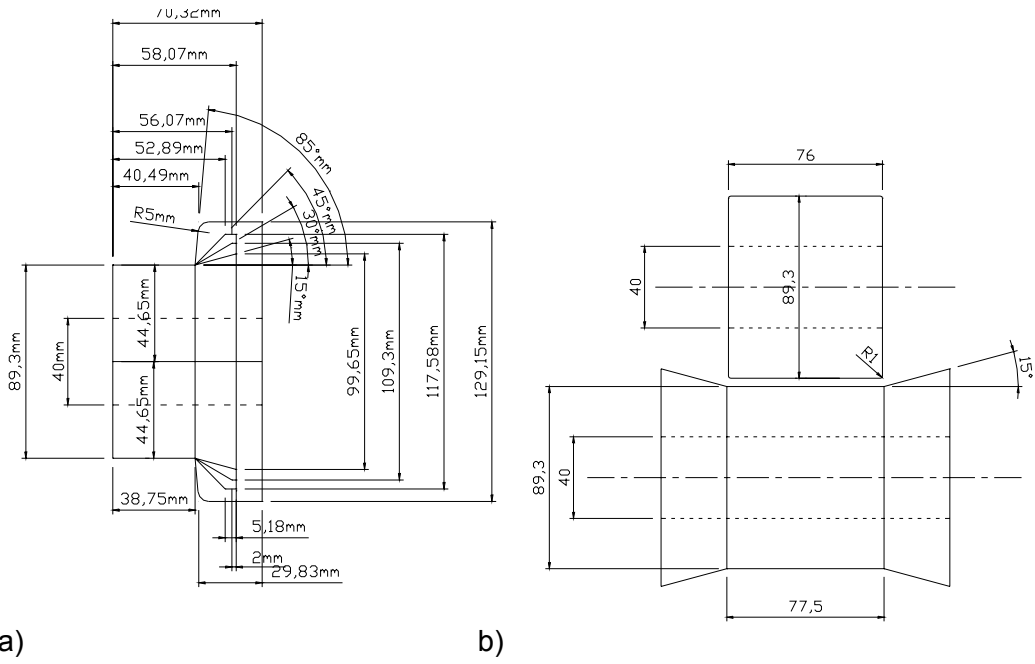
Tezgah, Şekil 4.1'de verilen Panel 85 profili imal edilmesi için sipariş edilmiş 8 makara istasyonundan oluşan ankastre bir makinadır. Tezgah ile ilgili bilgiler Tablo 4.1'de, makara geometrisi Şekil 4.2'de ve tezgah resimleri Şekil 4.3'te sunulmaktadır. Tezgah ilk olarak 0°-15°-30°-45° ile ilk bükme işlemini yaptıktan sonra ikinci bükme işlemini 15°-30°-45°-65° makara setleri ile tamamlamaktadır. Makara setleri %2 tolerans değeri ile imal edilmiştir. Tezgahta mevcut makaralar ısıl işleminden geçirilerek yüzey sertliği artırılmış haldedir. Sert çelikten imal edilen deney amaçlı 85° makarada ise deneylerin kısıllığı ve imalatta kullanılmayacak olması nedeni ile ısıl işlem uygulanmamıştır. Deney sonunda makara incelendiğinde iyi durumda olduğu gözlemlendiğinden deney sonuçlarına önemli bir etki yaratmadığı sonucuna varılmıştır. Makara setlerinin teknik resimleri ise EK-A'da sunulmaktadır.

Tablo 4.1: Deneylerde kullanılan tezgah bilgileri

Makina Tipi	Ankastre
Makara kenar genişliği	116 mm
Sac kalınlığı (T)	0,5 mm
Makara taban çapı	89,3 mm
İki makara arası mesafe (D)	130 mm
Besleme hızı	15 m/dakika = 250 mm/saniye



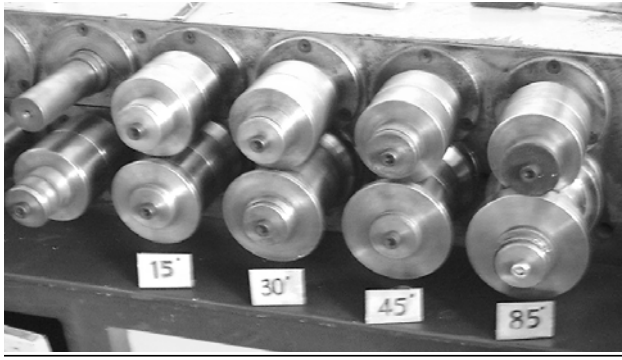
Şekil 4.1. Panel 85 profili



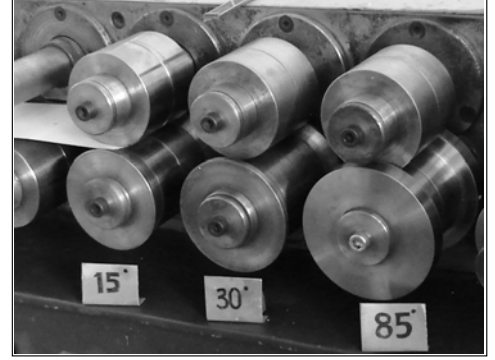
a)

b)

Şekil 4.2: Deneylerde kullanılan makara geometrisi, a) Makaraların geometrisi, b) Tezgah üzerinde kesit görünümü



a)



b)

Şekil 4.3: Deneylerde kullanılan makara dizilişleri, a) A1: 15°-30°-45°-85°, b) A2: 15°- 30°-85°

4.2 Deney Planlaması

Ön-testlerin tamamlanması ile kullanılması düşünülen malzemelerde çeşitli ölçülerde şekil bozuklukları elde edildikten sonra Tablo 4.2'de sunulan deney için kullanılacak değişkenlerin değerleri tespit edilmiştir. Deney yöntemi ve sonuçların incelenmesinde ise Şirvancı tarafından aktarılan yöntem benimsenmiş ve Tablo 4.3'te sunulan deney planlaması oluşturulmuştur [44].

Makaralı bükme işleminde tezgah ayarlarının iyi yapılmasının sonuçlar üzerinde çok büyük etkisi vardır. Bu nedenle deneylerin rasgele yapılması önerisinde istisnai olarak makara dizilişleri ayrı tutulmuş ve aynı makara dizilişine sahip diğer kombinasyonlar rasgele sayı yaratılarak sıraya dizilmiştir. Her makara seti değişiminden sonra ayarlar sac malzeme çekilerek tekrar kontrol edilmiştir.

Tablo 4.2: Deneylerde kullanılan değişkenler

Değişken Adı	1. Değeri	2. Değeri
A: Makara dizilişi	A1= 15°-30°-45°-85°	A2=15°-30°-85°
B: Kenar yüksekliği	B1= 17 mm	B2=12 mm
C: Malzeme cinsi	C1= Alüminyum	C2= Sünek Çelik

Tablo 4.3: Deney planlaması

Sıra No	Deney Kombinasyonu	Deney Sıra No	Yapılan deneylerin sırası (A1 ve A2 sırayla, diğer değişkenler rasgele seçilmiştir)
1	A1-B1-C1	5	A1=15°-30°-45°-85°
2	A1-B1-C2	6	
3	A1-B2-C1	8	
4	A1-B2-C2	7	
5	A2-B1-C1	3	A2=15°-30°-85°
6	A2-B1-C2	2	
7	A2-B2-C1	1	
8	A2-B2-C2	4	

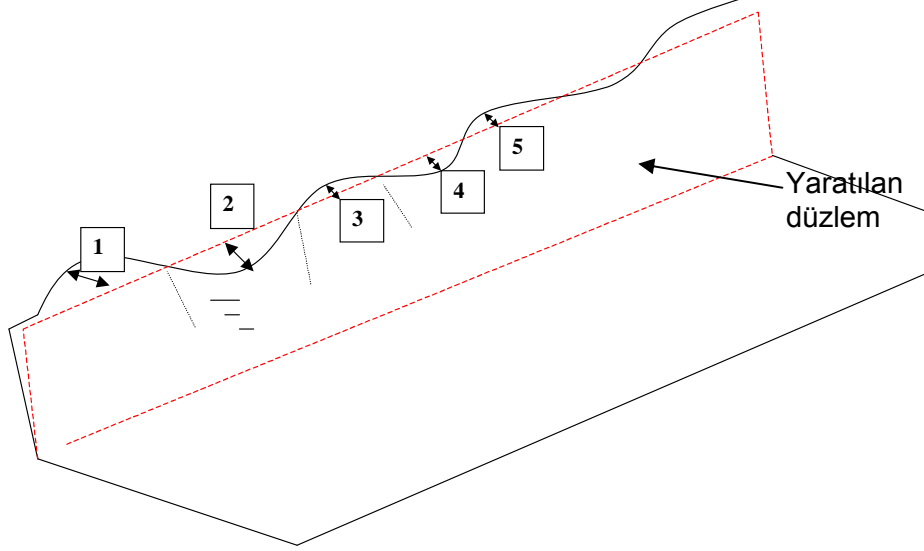
Deneylerin tamamlanmasının ardından İTÜ – ROTAM’da bulunan Şekil 4.4’te görülen Omacom Atos 3 boyutlu tarama cihazı ile parçalar yüzey taramasından geçirilmiştir. Cihaz, parça yüzeyine yapıştırılan küçük etiketleri referans olarak hassas olarak taradığı yüzeyleri birleştirmektedir. Bu tarama işleminde özellikle kenar uçlarının iyi çıkması için daha yavaş bir çalışma yapılmıştır.



Şekil 4.4: 3 boyutlu yüzey taramasında kullanılan cihaz

Tarama sonrasında inceleme Catia programı ile yapılmıştır. Taramadan geçirilen parçaların incelemesinde kenar yüzeylerde oluşmuş dalgaların boyları 0,01 mm’den küçük ise hesaba katılmamıştır.

Kenar yüzeylerde oluşan dalga değerleri örnek olarak Hira ve diğerlerinin çalışmalarında kullandıkları metodolojiye benzer şekilde ancak sac boyuna bölme yerine dalga adedine bölme şeklinde aritmetik ortalama almak suretiyle Şekil 4.5'te verilen resimde görüldüğü gibi alınmıştır [10]. Parçaların, giriş yönünde, ilk 300 mm'lik bir alandan ölçü alınmamıştır. Kalan alanda ise her parçada aynı kenar seçilmeye çalışılmış, eğer tarama esnasında kenar uçları daha az hassasiyette çıkan kısım varsa diğer kenarda ölçme işlemi yapılmıştır.



Şekil 4.5: Kenar dalga yüksekliği ortalaması yaklaşımı

Ölçme amacıyla Şekil 4.5'te sunulan kesik çizgili bir düzlem yaratılmakta ve kuşbakışı o düzlemin sağında olan (+) solunda olan ölçü ise (-) olarak işaretlenmektedir. Bunun ardından örnek olarak Şekil 4.5'te verilen rakamlar 1, 2, 3, 4, 5 için sırayla -5, +6,-3, +4 -2 rakamlar ölçülmüş ise, buradan sırayla 4 adet ölçü mutlak değer olarak alınmaktadır: $[-5 - 6]=11$, $[6 - -3]=9$, $[-3 - 4]=7$, $[4 - -2]=6$. Bunun sonunda da aritmetik ortalama alınarak ortalama kenar dalgalanması bulunmaktadır: $Ortalama = (11+9+7+6) / 4 = 33 / 4 = 8,25$

Ayrıca kenar dalga ortalama hesabının bir sağlaması olarak kenar ucunun toplam uzunluğu bilgisayar kontrollü koordinat ölçme makinası (CMM) ile taramadan geçirilmiş ve kenar ucundaki uzama miktarı milimetre cinsinden elde edilmiştir.

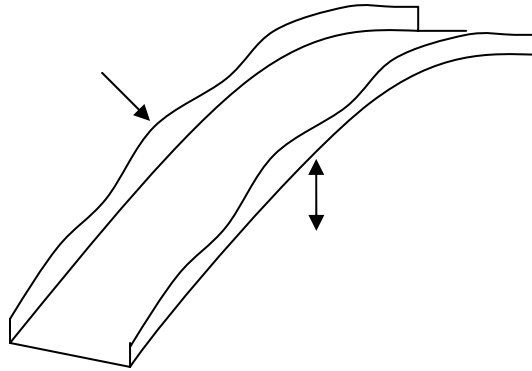
Bütün parçaların kenar ve taban alanlarındaki ortalama dalgalanma aynı metotla bulunduktan sonra deney sonuçlarının incelenmesine geçilmiştir.

4.3 Deney Sonuçları

Deney başlangıcında istatistiksel deney tasarımı L8 tam eşleştirmeli deney yöntemine göre çalışmanın yapılmasına karar verildiği için, seçilen 3 faktörle (A, B, C) ve 2 düzey sayısına göre, gözlem sayısı (n) $2^3=8$ olarak tam eşleştirmeli deney yapılmıştır.

Deney başlangıcında amaçlanan, Şekil 4.6'da gösterilen, kenar yüzeylerde ölçülebilir bir düzeyde kenar dalgalanmaları ve taban alanında düşey düzlemde eğilme elde edilmiştir. Bu amaçla son makara setinde kullanılan 40° ve 55° lik artışların istenen bozulmaları yarattığı düşünülmektedir. Elde edilen profillerde kenar dalgalanması ile birlikte düşey yönde eğim kenar dalgalanmaları ile aynı yöntem ile incelenmiştir. Kenar dalgalanmaları ile düşey eğim arasında korelasyon değeri bu çalışmada düşük çıkmıştır.

Deney sonrası sac malzemeler taramadan geçirildikten sonra CATIA programı yardımı ile kenar yüzeylerden Şekil 4.5'te verilen yöntem ile ölçülmüştür. Deney esnasında tekrarları başarılı olanların her ikisi de listelenmiştir ancak giriş esnasında kayma ya da tam hizalanamama gibi nedenlerle rahatsız edici düzeyde bozuk çıkan şekiller üzerinde inceleme yapılmamıştır.



Şekil 4.6: Deneylerde karşılaşılan kenar dalgalanma ve düşey düzlemde eğim kusurları

Tablo 4.4: Deney sonuçları kenar dalgalanmaları inceleme tablosu (mm)

	d5-t1= no1		d5-t2= no1		d6-t1= no2		d8-t1= no3		d8-t2= no3		d7-t1= no4	
	d5-t1		d5-t2		d6-t1		d8-t1		d8-t2		d7-t1	
Nokta-1	1,462		0,521		-0,288		0,044		0,074		0,868	
Nokta-2	0,597	0,865	-1,043	1,564	0,784	1,072	0,515	0,471	0,285	0,211	0,546	0,322
Nokta-3	1,888	1,291	0,699	1,742	-0,293	1,077	0,333	0,182	0,12	0,165	0,779	0,233
Nokta-4	0,84	1,048	-0,683	1,382	0,654	0,947	0,643	0,31	1,128	1,008	0,391	0,388
Nokta-5	1,632	0,792	0,493	1,176	-0,12	0,774	0,561	0,082	0,949	0,179	0,58	0,189
Nokta-6	-1,069	2,701	-1,264	1,757	0,427	0,547	1,543	0,982	1,023	0,074	0,362	0,218
Nokta-7	0,779	1,848	0,318	1,582	-0,306	0,733	1,166	0,377	0,748	0,275	0,469	0,097
Nokta-8	0,41	0,369	-0,998	1,316	0,341	0,647	1,396	0,23	0,0016	0,7464	0,111	0,348
Nokta-9	-1,578	1,988	0,557	1,555	-0,509	0,85	0,295	1,101			0,324	0,213
Nokta-10			-1,389	1,946	0,282	0,791	0,488	0,193			0,0025	0,3215
Nokta-11			-0,544	0,845	-0,395	0,677	0,338	0,15				
Nokta-12			-0,901	0,357	0,292	0,687	0,409	0,071				
Nokta-13			0,186	1,087	-0,389	0,681	0,049	0,36				
Nokta-14					-0,073	0,316						
Nokta-15					-0,488	0,415						
Nokta-16					0,028	0,516						
	ORT.	1,3628	ORT.	1,3591	ORT.	0,7153	ORT.	0,3758	ORT.	0,3798	ORT.	0,2688
Dalga Adedi		8		12		15		12		7		9
Maksimum Dalga		2,701		1,946		1,077		1,101		1,008		0,388
Minimum Dalga		0,369		0,357		0,316		0,071		0,074		0,097

	d7-t2= 4		d3-t1= no 5		d2-t1= no6		d2-t2= no6		d1-t1= no 7		d1-t2= no7		d4-t1= no8	
	d7-t2		d3-t1		d2-t1		d2-t2		d1-t1		d1-t2		d4-t1	
Nokta-1	0,485		-0,098		0,66		-0,152		0,002		1,926		0,131	
Nokta-2	0,697	0,212	-3,58	3,482	-0,934	1,594	0,139	0,291	1,029	1,027	0,926	1	0,642	0,511
Nokta-3	0,395	0,302	-0,403	3,177	0,354	1,288	-0,255	0,394	0,439	0,59	1,985	1,059	0,374	0,288
Nokta-4	0,62	0,225	-3,21	2,807	-1,17	1,524	1,401	1,656	1,208	0,769	1,197	0,788	0,838	0,464
Nokta-5	0,078	0,542	-2,685	0,525	0,383	1,533	-0,636	2,037	0,172	1,036	1,646	0,449	0,521	0,317
Nokta-6			-3,763	1,078	-0,702	1,065	1,212	1,848	0,572	0,4	0,776	0,87	0,721	0,2
Nokta-7			-0,347	3,416	0,673	1,375	-0,628	1,84	-0,07	0,642	1,259	0,483	0,039	0,682
Nokta-8			-2,686	2,339	-0,702	1,375	1,583	2,211	0,448	0,518	0,498	0,761	0,553	0,514
Nokta-9			-1,659	1,027	0,693	1,395	-0,402	1,885	-0,197	0,645	0,865	0,367	0,265	0,288
Nokta-10			-1,911	0,252	-0,775	1,468	1,548	1,95	0,488	0,685	0,443	0,422	0,639	0,374
Nokta-11			0,247	2,158	0,071	0,846	0,441	1,107	0,072	0,416	1,359	0,916	0,141	0,498
Nokta-12			-1,636	1,883	-0,445	0,516			0,468	0,396	0,269	1,09	0,597	0,456
Nokta-13			-1,155	0,481	0,01	0,455			-0,599	1,067	0,808	0,539	0,14	0,457
Nokta-14			-2,32	1,165					0,221	0,82	-0,003	0,811	0,639	0,499
Nokta-15			0,088	2,408					-0,177	0,398	0,858	0,861	0,212	0,427
Nokta-16									0,377	0,554	-0,006	0,864	0,971	0,759
Nokta-17									-0,044	0,421			0,341	0,63
Nokta-18									0,429	0,473			0,777	0,436
Nokta-19									0,154	0,275			0,193	0,584
Nokta-20									0,566	0,412			0,418	0,225
Nokta-21													0,235	0,183
Nokta-22													0,75	0,515
Nokta-23													0,008	0,742
Nokta-24													0,517	0,509
Nokta-25													0,056	0,461
Nokta-26													0,0372	0,0188
Nokta-27														
	ORT.	0,3203	ORT.	1,8713	ORT.	1,203	ORT.	1,532	ORT.	0,6076	ORT.	0,752	ORT.	0,44071
Dalga		4		14		12		10		19		15		25
Maksimum		0,542		3,482		1,594		2,211		1,067		1,09		0,759
Minimum		0,212		0,252		0,455		0,291		0,275		0,367		0,0188

Sonuçlarda ayrıca Watari ve Ona'nın, Seneyake ve diğerlerinin, Tehrani ve diğerlerinin, bahsettikleri, düşey eğilme gibi etkiler hem deneysel hem de SEA modeli ile yapılan çalışmalarda da gözlenmiştir [4,14,24].

Tablo 4.5'te sunulan kenar dalgalanmaları gözlem değerleri ile Tablo 4.6'da sunulan taban bölgesindeki düşey eğim değerleri arasında korelasyon değeri 0,24 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 4.5: Kenar dalgalanmaları için milimetre cinsinden gözlem değerleri.

SIRA NO	Yapılan deneylerin sırası			Gözlem Değeri
1	A1-B1-C1	d5	A1=15-30-45-85	1,361
2	A1-B1-C2	d6		0,715
3	A1-B2-C1	d8		0,378
4	A1-B2-C2	d7		0,290
5	A2-B1-C1	d3	A2=15-30-85	1,871
6	A2-B1-C2	d2		1,367
7	A2-B2-C1	d1		0,680
8	A2-B2-C2	d4		0,441
A1=15-30-45-85		A2=15-30-85		
B1= 110 mm		B2=100mm		
C1= Alüminyum		C2= Sünek Çelik		

Nallapati'nin çalışmasında düşey eğimin son makara setindeki açı farkından en fazla etkilendiği ve düzeltmek için bu açı farkının azaltılması gerektiği belirtilmektedir [5]. Düşey eğim ile ilgili olarak son makara setindeki açı farkının A2 kombinasyonunda 55°'den A1 kombinasyonunda 40°'ye inmesi ile belirgin bir azalma gözlenmiştir. Bu kapsamda Nallapati tarafından derlenmiş önerme ile uyumdan bahsedilebilir. Bu çalışmada kenar dalgalanması ve düşey düzlemde eğim değerleri arasındaki korelasyon değerinin düşük çıkmasının nedeni olarak, son iki makara seti arasındaki büyük açı farkının etkileşimi sönümlenmesi düşünülmektedir.

Tablo 4.6: Düşey düzlemde eğilme için milimetre cinsinden gözlem değerleri.

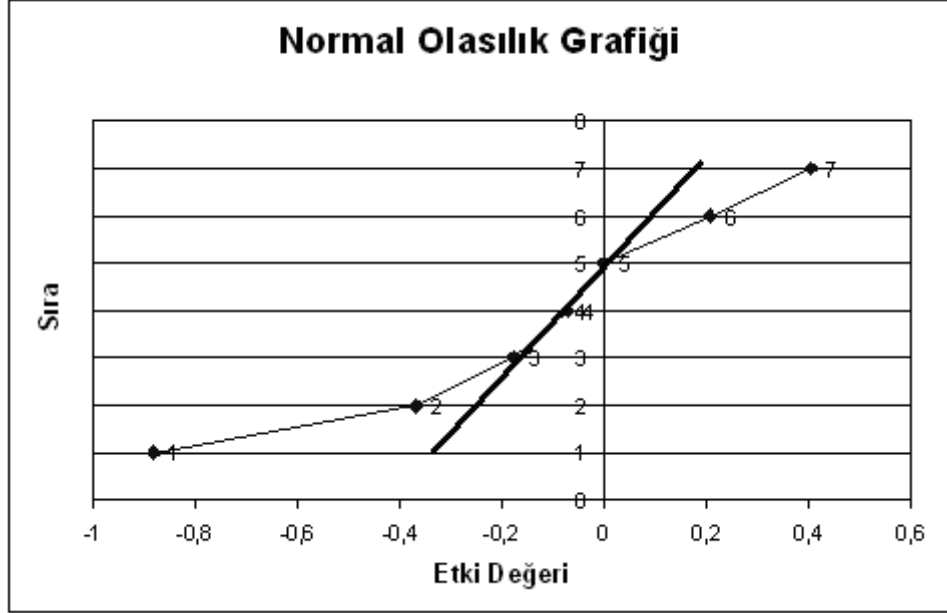
SIRA NO	Yapılan deneylerin sırası			Deney Gözlem Maksimum Değeri (mm)
1	A1-B1-C1	d5	A1=15-30-45	3,56
2	A1-B1-C2	d6		2,51
3	A1-B2-C1	d8		4,41
4	A1-B2-C2	d7		5,18
5	A2-B1-C1	d3	A2=15-30-85	12,26
6	A2-B1-C2	d2		11,21
7	A2-B2-C1	d1		10,57
8	A2-B2-C2	d4		14,94
A1=15-30-45-85		A2=15-30-85		
B1= 110 mm		B2=100mm		
C1= Alüminyum		C2= Sünek Çelik		

Şirvancı tarafından aktarılan Taguchi yaklaşımı doğrultusunda önerilen L8 inceleme tablosu bu çalışmada benimsenerek Tablo 4.7'de sunulduğu şekilde deney sonuçlarına göre kenar dalgalanma ortalama değerleri yerleştirilmiştir [44].

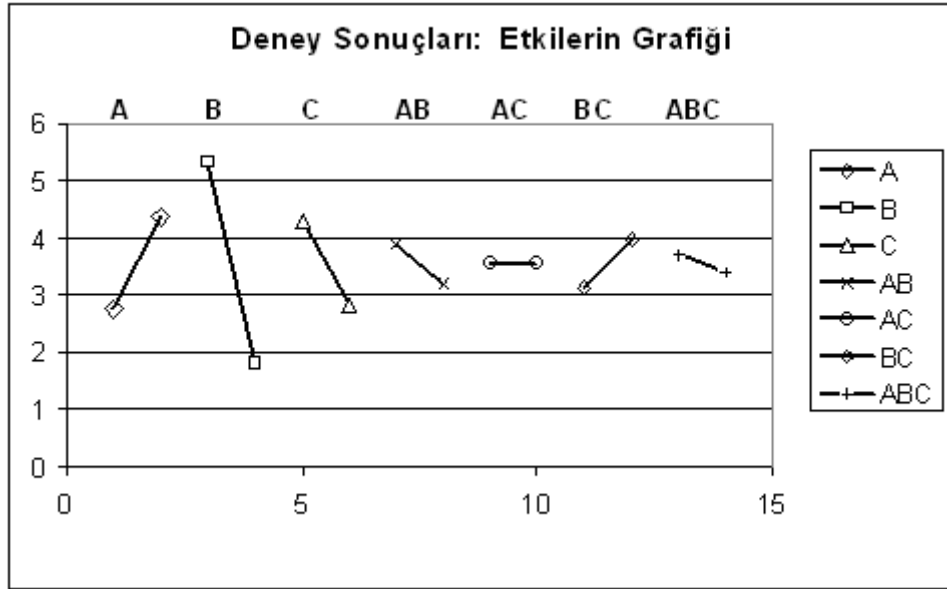
Tablo 4.7 Kenar dalgalanmaları ile ilgili deney sonuçlarının L8 inceleme tablosu içine yerleştirilmesi

Sıra	A		B		C		AB		AC		BC		ABC	
	A1	A2	B1	B2	C1	C2	AB1	AB2	AC1	AC2	BC1	BC2	ABC1	ABC2
1	1,361		1,361		1,361			1,361		1,361		1,361	1,361	
2	0,715		0,715			0,715		0,715			0,715			0,715
3	0,378			0,378			0,378			0,378				0,378
4	0,290			0,290		0,290			0,290			0,290		
5	1,871	1,871	1,871		1,871		1,871		1,871			1,871		1,871
6	1,367		1,367			1,367				1,367			1,367	
7	0,680			0,680				0,680		0,680				0,680
8	0,441			0,441						0,441				0,441
TOPLAM	2,744	4,359	5,315	1,788	4,290	2,813	3,906	3,197	3,556	3,547	3,140	3,962	3,698	3,405
SAYI	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
ORTALAMA	0,686	1,090	1,329	0,447	1,072	0,703	0,976	0,799	0,889	0,887	0,785	0,991	0,924	0,851
ETKI		0,404	-0,882		-0,369		-0,177		-0,002		0,206		-0,073	
SIRA		7	1		2		3		5		6		4	

Tablo 4.7’de hesaplanan etki değerlerinin küçükten büyüğe doğru numaralandırılmasından sonra Şekil 4.7’de karşılık gelen etki değerleri ile normal olasılık grafiği (NOG) çizilmiştir. Daha sonra etki değeri sıfıra yakın 3 veya 4 nokta dikkate alınarak bu noktalardan uzaklığı en az olan bir doğru çizilmiştir. Etkilerin istatistiksel önemi ise bu doğruya uzaklığına göre belirlenmiştir.



a)



b)

Şekil 4.7: a) Deney sonuçları normal olasılık grafiği (NOG), b) Tüm etkilerin grafiği

Çalışmada kullanılan alüminyum ve sünek çelik malzemelerinin kalıcı uzamalar için kritik gerinim değerleri geçiş bölgesinde değişkenlik göstermektedir $\epsilon_{\text{Alüminyum}} = 0,0021$ ila $0,0043$ ve $\epsilon_{\text{çelik}} = 0,003$ ila $0,0065$ olarak çekme deneylerinde tespit edilmiştir. Denklem 2.4 kullanıldığında basitleştirilmiş gerilme hesabına göre 40° ve 55° 'lik açı farkları ile 12 mm ve 17 mm 'lik kenar uzunluklarına karşılık gerinim değerleri varolan test düzeneğinde $\epsilon_{40, 12\text{mm}} = 0,002$, $\epsilon_{40, 17\text{mm}} = 0,004$, $\epsilon_{55, 12\text{mm}} = 0,0036$, $\epsilon_{55, 17\text{mm}} = 0,0073$ sonuçlarına karşılık gelmektedir. Burada denklem 2.4'te kabaca hesaplanan gerinimin gerçekte sinusoidal bir eğri izlemesi nedeni ile makaralı bükme işleminde gerçekleşecek gerinim değerlerinin daha yüksek olması beklenmelidir. Dolayısıyla denklem 2.4 ile hesaplanan değerlerin minimum gerinim değerleri olarak değerlendirilmesi gerekmektedir.

Deney başında alüminyum malzeme için A1 (15-30-45-85) ve B2 (12 mm kenar yüksekliği) kombinasyonunun gerinimin düşük olması nedeniyle $\epsilon_{40, 12\text{mm}} = 0,002 < \epsilon_{\text{Alüminyum}}$ ve $\epsilon_{\text{çelik}}$ en iyi sonuç beklentisi yaratmaktadır. Kenar dalgalanmalarının alüminyum malzemedeki daha çok görülmesinin geometrik olarak açı farkı ve kenar yüksekliği kombinasyonunda gerinimin kritik seviyenin altında olduğu sadece 1 kombinasyonun olmasıdır. Daha iyi bir hesaplama için Bhattacharyya ve Smith'in ve Bhattacharyya ve diğerlerinin çalışmalarında sundukları şekil verme uzunluğu ile denklem 2.11 kullanarak (12 mm ve 17 mm kenar uzunlukları ve A1 ve A2 dizilişindeki en büyük açı farkları 40° ve 55° 'ler) hesaplamalar yaparsak $L_{40,12\text{mm}} = 80,21\text{ mm}$, $L_{40,17\text{mm}} = 135,3\text{ mm}$, $L_{55,12\text{mm}} = 94,06\text{ mm}$, $L_{55,17\text{mm}} = 158,6\text{ mm}$ olarak hesaplanmaktadır. Buradan A1 ve A2 makara dizilişi ile uzun kenarlı sac malzeme işlenmesi esnasında iki makara seti 130 mm olduğu için 4. makara setine kadar uzanan bir şekil değişimi alanı hesaplanmaktadır. Bhattacharyya'nın maksimum gerinim önermesi ile yapılan hesaplama ($L = 130$ maksimum değer olarak alınmıştır) $\epsilon_{40, 12\text{mm}} = 0,0052$, $\epsilon_{40, 17\text{mm}} = 0,0040$, $\epsilon_{55, 12\text{mm}} = 0,0069$, $\epsilon_{55, 17\text{mm}} = 0,0073$ sonuçlarına tekabül etmektedir. Bu çalışmada kullanılan kritik gerinim değerleri $\epsilon_{\text{Alüminyum}} = 0,0021$ ve $\epsilon_{\text{çelik}} = 0,003$ için kıyaslandığında her kombinasyonda kritik seviyelere yaklaşıldığı veya elastik/plastik geçiş bölgesinde kalındığı görülmektedir. Elde edilen değerler A2 dizilişi için hem sünek çelik hem de alüminyum malzeme için gerinim değerleri plastik şekil değişimi yaratacak düzeyde kritik seviyenin üzerindedir [6-9].

Gerek basit gerinim hesabında gerekse Bhattacharyya tarafından iyileştirilmiş gerinim hesabında elde edilen değerler ortalama bir gerinim değerine karşılık gelmektedir. Bhattacharyya tarafından da belirtildiği üzere kenar yüzeyde uzama eşit olarak dağılmamakta bu nedenle tepe gerinim değeri daha yüksek olabilmektedir. Bhattacharyya ve diğerleri tarafından hem sünek çelik hem de alüminyum malzeme için geometrik olarak aynı makara setleri önerilmekte, alüminyum ve sünek çelik malzeme arasında yüzey kalitesinde fark olmaması beklenmektedir. Elde edilen sonuçlarda ise hem yüzey dalgalanması hem de iki ayrı malzeme ile iki farklı sonuç elde edilmiştir. Bu sonucun kullanılan sünek çelik ve alüminyum malzeme mekanik değerleri arasındaki farkın büyük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bhattacharyya ve diğerlerinin çalışmalarında malzeme özellikleri detaylı sunulmadığı için karşılaştırma yapılamamıştır [8,9].

Deney sonuçları yukarıda özetlenen beklentilerle uyumlu çıkmıştır. A1-B2 kombinasyonunda kenar yüzeyde beklenen gerinim değerlerinin alüminyum ve sünek çelik için kritik gerinimin altında olması nedeni ile elde edilen parçalarda kenar dalgalanmaları en az çıkmıştır.

Deney sonuçlarında Şirvancı tarafından aktarılan yöntem ile incelediğimizde ana etkileri ve etkileşimleri de daha ayrıntılı olarak görebilmekteyiz. Deneysel çalışmada seçilen değişkenlerin etkilerinin büyüklükleri Şekil 4.7'de görsel olarak sunulmaktadır. En büyük etki olarak kenar yüksekliği (B) değişiminin yarattığı etki Şekil 4.7.b'de göze çarpmaktadır. Diğer etkiler makara dizilişi ise seçilen kombinasyonlarda malzeme etkisi ile eşit etki olarak görülmektedir.

Sonuçlarda malzeme etkisinin de makara dizilişi kadar etkili olduğunun görülmesi Bhattacharyya form uzunluğu modelinde malzeme mekanik özelliklerinin önemli olmadığı önermesinin sadece form alanının hesaplanmasında kullanılabileceği; ancak elde edilecek profilin şekil bozukluğu açısından tahminde bulunmak için uygulanamayacağı düşünülmektedir. Bir başka deyişle geometrik olarak kenar ucundaki azami uzamayı hesaplayarak buradan gerinim hesabı girdisi açısından kullanılması ile sınırlı kalmaktadır [9]. Ancak yazarların da katıldığı diğer çalışmalarında malzeme etkisinin de bir şekilde ele alındığı deneysel bir yaklaşım olarak, malzemenin kenar dalgalanması yaratmayacak şekilde en fazla hangi açıyla bükülebildiğinin belirlenmesi ilk adım olarak önerilmektedir. Sonrasında ise bundan daha küçük bir açıyla her makara seti arasındaki açı farkına dikkat edilerek tasarım yapılması salık verilmektedir. Eğer 50° gibi büyük bir fark ile bükülebiliyorsa, 5°'lik bir fark ile son makara seti tasarlanmasını (örnek olarak 0°-45°-85°-90° gibi) önermektedirler [7].

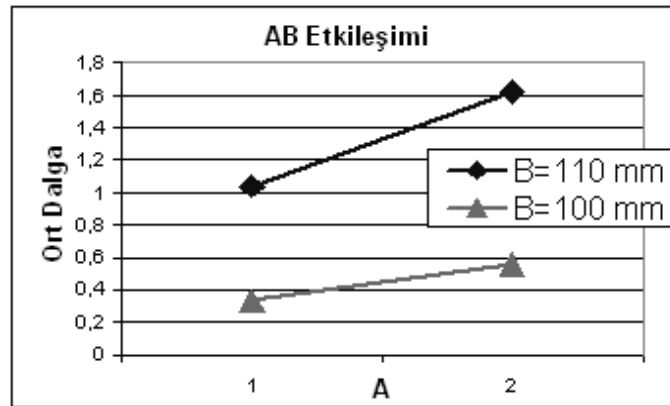
Deneysel çalışmalarda değişkenler arasında etkileşimden bahsedilmemiştir. Bu da deneysel yaklaşım olarak çalışmaların Taguchi tekniği ile inceleme yapılmasının güçlü yönü olarak değerlendirilmektedir.

Bu çalışmadaki deney sonuçlarını Şirvancı tarafından aktarılan yöntem ile tekrar detaylı olarak incelemeye başlarsak Şekil 4.7'de çizdirilen grafikler ayrıca AB ve BC etkileşimini de işaret etmektedir. Etkileşimlerin daha iyi anlaşılması ile tasarımcı tarafından kontrol edilebilen bir değişken ile işlem esnasında kontrol edilemeyen diğer bir değişkenin olumsuz etkisi azaltılabilir. Örnek olarak eğer üretimde kullanılan sac ruloların malzeme mekanik özellikleri üretim kalitesinin düşük olması nedeni ile değişiklik gösteriyorsa bir başka değişken kontrolü ile örneğin sac malzemenin kenar yüksekliğine dikkat ederek bu konuda etkilenme azaltılabilir.

Bu çalışmada elde edilen etkileşim sonuçlarından ilk olarak AB etkileşimini incelersek Şekil 4.8'de de görüldüğü gibi A1 dizilişi ortalama dalgayı, kenar yüksekliği değişkeni B'nin her iki değeri için de azaltmaktadır.

Tablo 4.8: AB etkileşimi için deney sonuçları inceleme tablosu

AB etkileşimi		B	
		1	2
A	1	1,361, 0,715	0,378, 0,290
		1,038	0,334
	2	1,871, 1,367	0,680, 0,441
		1,619	0,560

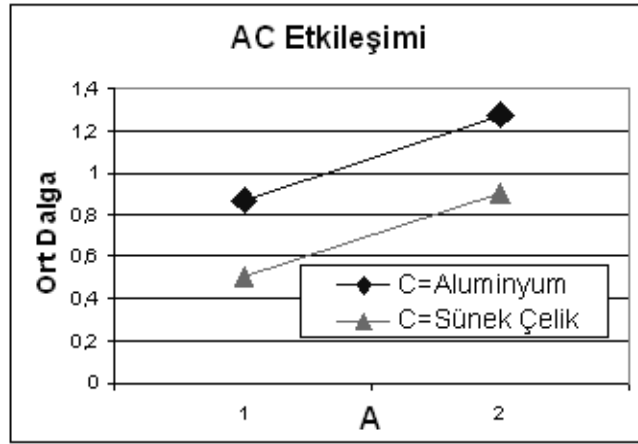


Şekil 4.8: AB etkileşimi grafiği

Deney sonuçlarında A ve C değişkenleri için Tablo 4.9 ve Şekil 4.9'dan görüleceği üzere artış ve azalmalar paralel şekilde olduğundan A ve C değişkenleri arasında bir etkileşim bulunmadığı sonucuna varılmaktadır.

Tablo 4.9: AC etkileşimi için deney sonuçları inceleme tablosu

AC etkileşimi		C	
		1	2
A	1	1,36,0,378	0,715, 0,290
		0,869	0,502
	2	1,871, 0,680	1,367, 0,441
		1,276	0,904



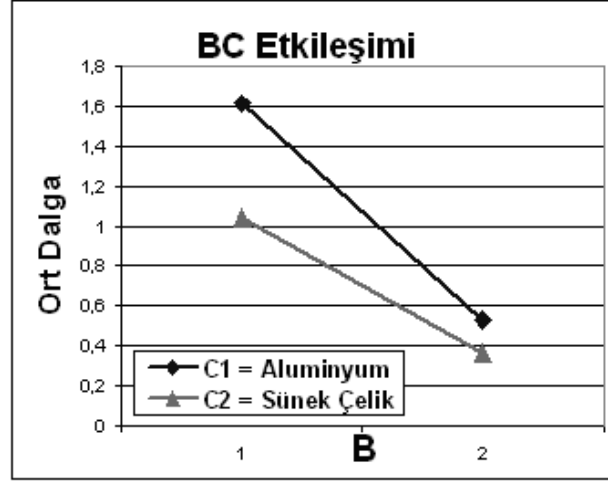
Şekil 4.9: AC etkileşimi grafiği

BC etkileşiminin incelenmesi sonucu Tablo 4.10 ve Şekil 4.10'da görüldüğü üzere önemli bir etkileşim tespit edilmiştir. B2 (kenar yüksekliği=100 mm) seçilmesi ile her iki malzeme için de ortalama yüzey dalgası azalmaktadır. Bu etkileşimin önemi daha kısa kenarlı bir tasarım seçildiğinde hem malzeme cinsinden hem de malzeme kalitesinden kaynaklanabilecek olumsuzlukları asgariye indirmektedir.

Bir başka deyişle benzer bir panel imalatında eğer kullanılan malzemenin mekanik özellikleri üretim kalitesi yüzünden her ruloda (veya rulo içinde) değişim gösteriyorsa ve kenar yüzey kalitesi önemli ise, tasarımcı kenar yüksekliğini kısaltarak imalat kalitesinin devamlılığını sağlayabilir. Ya da üretilmiş bir tezgahta değişik bir malzeme kullanıyorsa, kenar yüzey kalitesi için kenar yüksekliğini kontrol etmesi gerekmektedir.

Tablo 4.10: BC etkileşimi için deney sonuçları inceleme tablosu

BC etkileşimi		C	
		1	2
B	1	1,361, 1,871	0,715, 1,367
		1,616	1,041
	2	0,378, 0,680	0,290, 0,441
		0,529	0,365



Şekil 4.10: BC etkileşimi grafiği

Sonuç olarak BC etkileşimi açısından kısa kenarlı sac kullanımı malzeme mekanik özelliklerindeki değişkenliği kontrol etmede çok önemlidir. AB etkileşiminin ise ilave makaralar ve makaralar arasında daha az açı farkı ile kenar yüksekliği ile ilgili değişkenliğin yarattığı etkinin azaltıldığı yorumlanmıştır.

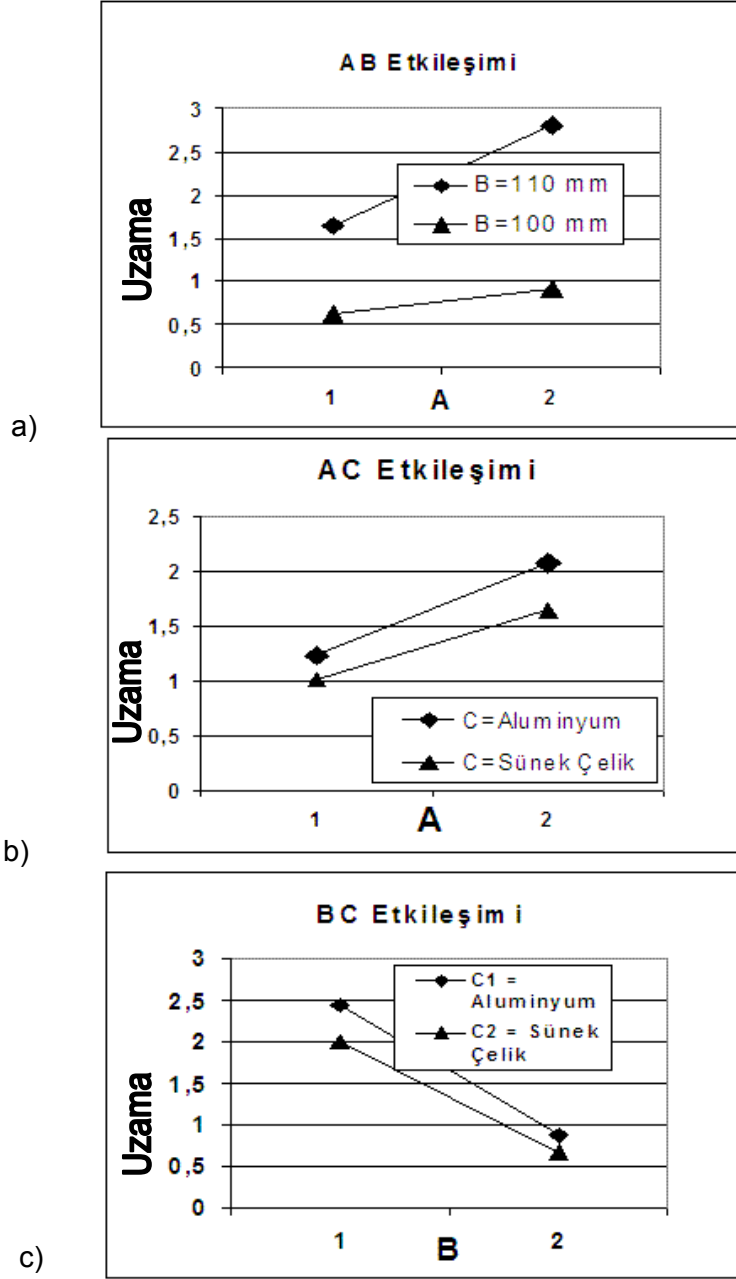
A1 (15-30-45-85) dizilişi, 100 mm genişlikteki sac ile hem alüminyum hem de sünek çelik malzeme için kenar dalgalanmaları açısından en iyi sonuçlar elde edilmektedir.

Yukarıda kullanılan kenar dalga ortalaması ayrıca deney sonrası elde edilen dalgalı profil kenar uçları da bilgisayar kontrollü koordinat ölçme cihazı ile taramadan geçirilmiş ve makaralı bükme işlemi sonrası bükülen kenar ucu uzunluk değerleri ölçülmüş ve orijinal uzunluktan çıkarılmak suretiyle uzama miktarları hesaplanmıştır. Tarama hassasiyeti olarak 0,5 mm (eğer keskin bir yükselme söz konusu olursa 0,4 mm) aralıklarla (1000 mm uzunluğundaki sac malzemelerin her kenar ucu için 2000 noktadan fazla) nokta bulutu oluşturulmuştur. Söz konusu noktalardan geçirilen eğri uzunlukları aynı şekilde 8 kombinasyon için de ölçülmüştür. Bu çalışma sonrasında elde edilen değerler Tablo 4.11'de sunulmaktadır.

Tablo 4.11: Dalgalı kenar ucu ölçümleri tablosu (milimetre)

Deney No:	1	2	3	4	5	6	7	8
Uzama (mm)	1,84	1,425	0,609	0,613	3,043	2,567	1,107	0,706

Elde edilen değerler L8 tam eşleştirmeli deney yöntemi ile incelenmesi ile aşağıda Şekil 4.11’de a ila c’de sunulan etkileşim grafikleri elde edilmiştir.



Şekil 4.11: a) AB etkileşimi grafiği, b) AC etkileşimi grafiği, c) BC etkileşimi grafiği

Şekil 4.11'de gösterilen grafikler incelendiğinde AB etkileşimi aynı şekilde ve yönlerde elde edilmesine rağmen AC ve BC etkileşimleri için kenar dalga ortalaması yaklaşımı ile kenar ucu uzama hesaplaması yaklaşımı arasında bazı farklar bulunmaktadır. Bunlar BC etkileşiminin azalması ve grafikteki paralelliğin hafifçe bozulması nedeni ile AC etkileşiminin ise az da olsa görülmesi şeklindedir. Bununla birlikte her üç grafikte de iyileşme yönlerinin aynı olması kenar dalga ortalaması yaklaşımının doğruluğunun teyidi şeklinde yorumlanmıştır. Kenar dalga ortalama yaklaşımında bir çok dalganın ortalama değerinin bulunmasına karşılık, uzama değeri olarak tek bir değer ölçme hassasiyetine bağlı hata payının daha yüksek olduğu değerlendirildiğinden bu çalışma sonuçlarında kenar dalga ortalaması ile elde edilen sonuçlar vurgulanacaktır.

Son olarak uzama değerleri ile düşey düzlemde eğim değerleri arasında korelasyon değeri 0,26 olarak bulunmaktadır. Bu da bir önceki kenar dalga ortalaması ile düşey eğim değerleri arasındaki korelasyon değerine yakın bir değerdir. Bu bağlamda son iki makara setindeki açı farkının çok yüksek olmasının yarattığı sönümlenme nedeniyle korelasyon düşük gözlenmektedir.

4.4 Sac Malzeme Mekanik Özellikleri

Deney sonrasında çekme testleri ASTM E8M–03 standardına göre İTÜ Makina Fakültesi Mekanik Deneyler Laboratuvarında yapılmıştır. Deneyler esnasında kullanılan sünek çelik ve alüminyum malzemelerin özellikleri tespit edilmiştir. Çekme deneyinde kullanılan cihaz, kuvvet ve karşılık gelen birim uzamaları listeleyerek sonuçları bir tablo halinde vermektedir. Buradaki ilk sonuçlardan sünek çelik için $E=109,7$ GPa, akma gerilmesi $\sigma_y=301$ MPa ve alüminyum için $E=64,3$ GPa, akma gerilmesi $\sigma_y=139$ MPa olarak bulunmuştur.

Kullanılan SEA yazılımında istenilen değerler plastik alan için gerçek gerilme-gerinim değerleri olduğu için söz konusu değerlerin plastik alanda gerçek gerilme-gerinim değerleri bir çok çekme deneyi ile uyumlu sonuç gösteren aşağıda 4.1 numaralı denklemde gösterilen Holloman denklemi kullanılıp gerçek gerilme-gerinim grafiği çizdirilerek bulunmuştur.

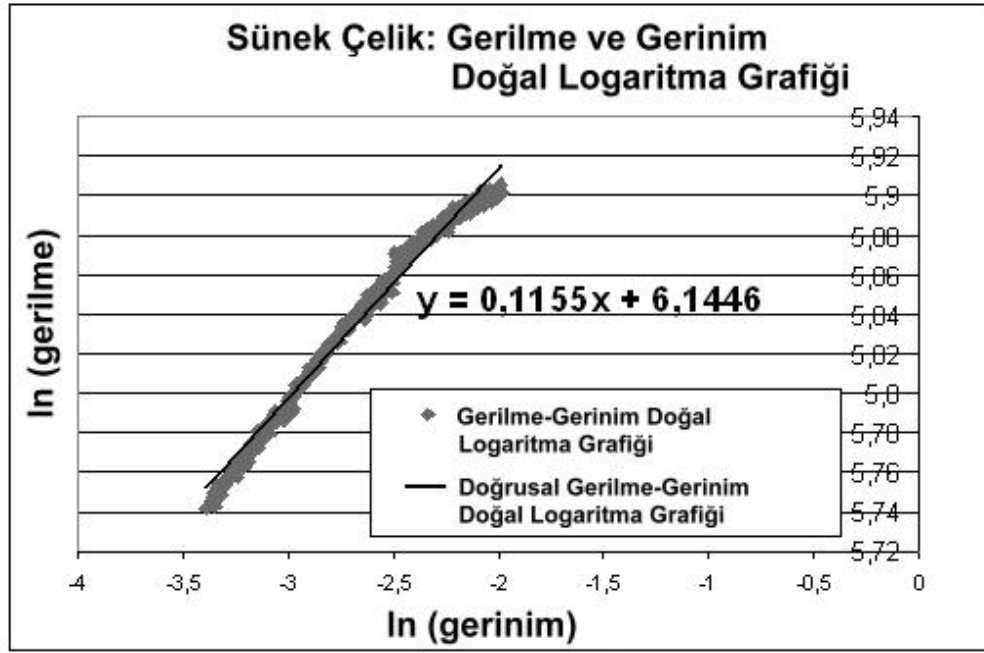
$$\sigma_{gercek} = K * \varepsilon_{gercek}^n \quad (4.1)$$

n: Pekleşme katsayısı K: Pekleşme modülü

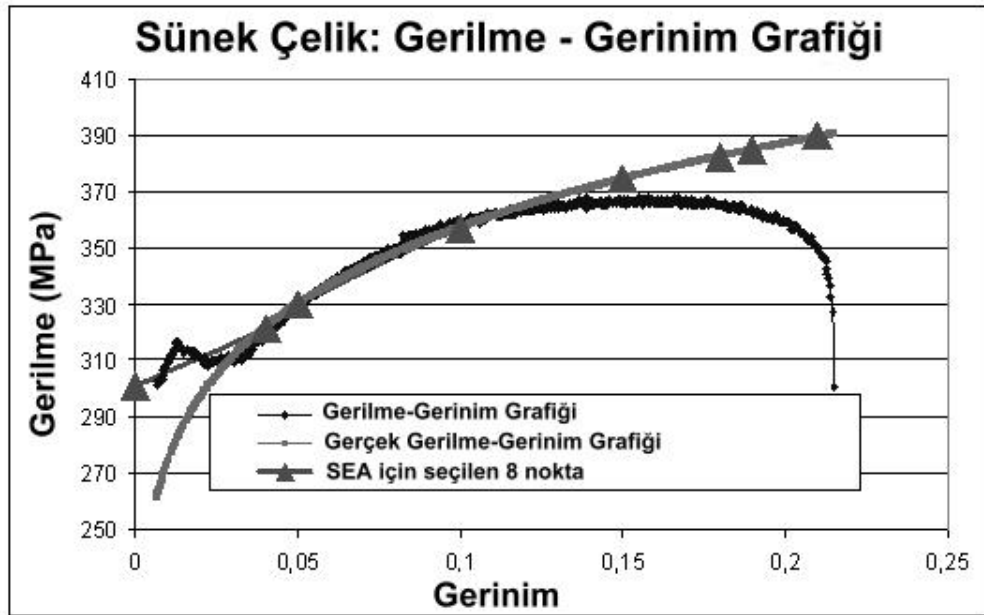
Deney sonuçlarında cihaz tarafından kuvvet ve toplam uzama ölçüldüğü için ilk aşamada mühendislik gerilmeleri çekme deneyi öncesindeki kesit alanı hesaplanıp ölçülen kuvvete bölünmesi ile hesaplanmıştır. Gerinim değerleri de cihaz tarafından ölçülen uzamaların orijinal numune boyuna bölünerek hesaplanmıştır. Sonraki aşamada denklem 4.1 doğal logaritması alınması ile aynı şekilde hesaplanan gerinim değerlerinin ve gerilmelerin doğal logaritmaları alınmış ve gerinim kuvveti ile maksimum kuvvet arasındaki alan grafik kağıdına çizdirilmiş ve denklem 4.2'ye karşılık gelen eğri denklemi buldurulmuştur.

$$\ln \sigma_{gercek} = \ln K + n * \ln \varepsilon_{gercek} \quad (4.2)$$

Denklemin bulunması ile birlikte gerçek gerilmeler Holloman denklemi kullanılarak hesaplanmıştır. Aynı işlemler daha sonra alüminyum malzeme için de sırayla tekrarlanmıştır. Hesaplanan gerilmeler Şekil 4.12.a ve b'de sünek çelik için ve Şekil 4.13.a ve b'de alüminyum malzeme için gösterilmektedir. Sünek çelik için $K = 466,19$ MPa ve $n=0,1155$ ve alüminyum için $K=186,36$ MPa ve $n=0,0486$ hesap edilmiştir.



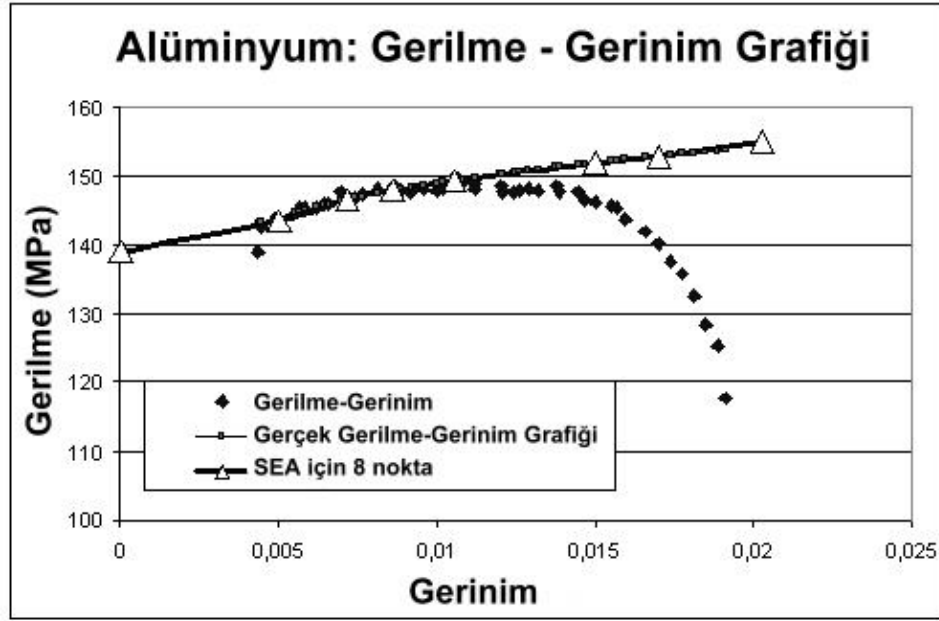
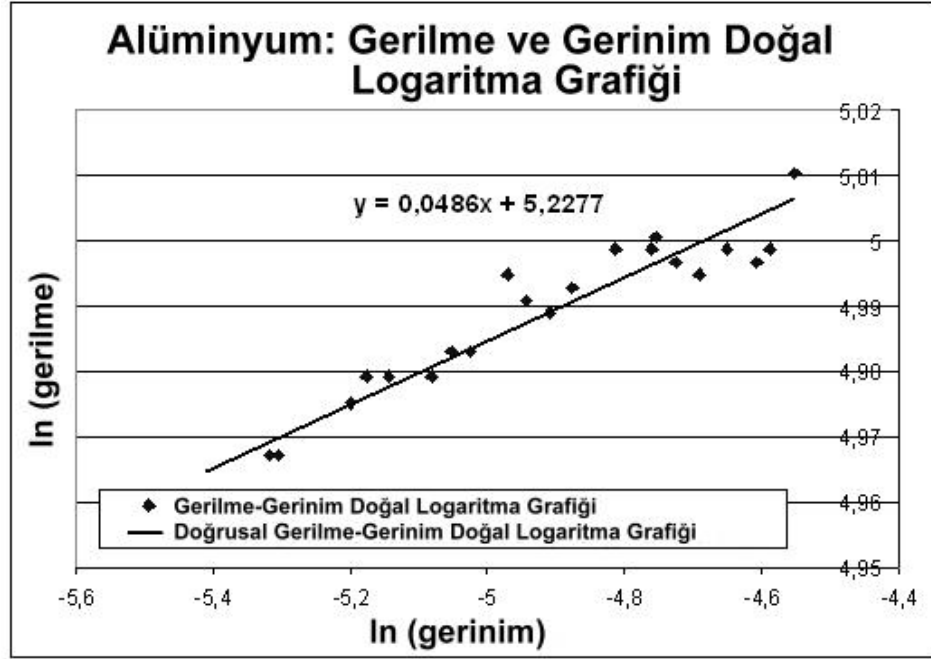
a)



b)

Gerilme	301	321	330	357	374,44	382,34	385	390
Gerinim	0	0,04	0,05	0,1	0,15	0,18	0,19	0,21

Şekil 4.12: a) Deneylerde kullanılan sünek çelik malzemenin K ve n değerleri için oturtulan eğri denklemi, b) Deneylerde kullanılan sünek çelik malzemenin gerilme-gerinim eğrisi ve SEA için seçilen değerleri



Gerilme	139	143,6	146,56	147,86	149,33	151,96	152,88	154,97
Gerinim	0	0,005	0,00713	0,00856	0,01054	0,015	0,017	0,02028

Şekil 4.13: a) Deneylerde kullanılan alüminyum malzemenin K ve n değerleri için oturtulan eğri denklemi, b) Deneylerde kullanılan alüminyum malzemenin gerilme-gerinim eğrisi ve SEA için seçilen değerleri

5. SONLU ELEMANLARLA ANALİZ VE SİMULASYON

5.1 Dinamik Açık Algoritma Seçimi

Kısa zamanda büyük şekil değişimi gerektiren, yarı-durağan büyük şekil değişimi, birden fazla doğrusalsızlık veya karmaşık sürtünme/temas/çarpma problemleri ya dinamik açık veya kapalı algoritmalar ile çözüm teknikleri gerektirmektedir.

Dinamik açık veya kapalı algoritmalar yer değiştirmeleri birim zamanlarda hesap edip toplayarak zamana bağlı sayısal bir yöntemle sonuca ulaşmaya çalışırlar. Bu yer değiştirmelerin hesabından sonra ilgili gerinim değerlerini ve gerilmeleri hesap ederler. Kapalı yöntemlerde (örnek olarak ANSYS programında Newmark Forward Differencing Method) sabit bir ortalama ivme ilgili zaman adımında kullanılır. Birim zaman sonundaki ivmeler ve hız hesaplanır ve daha sonra birim zaman sonundaki yer değiştirmeler hesaplanır.

Dinamik açık algoritmalar kullanan yazılımlar ise birim zaman adımında doğrusal bir yer değiştirme hesaplar. Daha sonra denklemleri birim zamanın başında hesaplayıp, ivme ve hızları bulunur. Daha sonra birim zaman sonundaki yer değiştirmeleri hesap eder.

Yukarıda vurgulandığı gibi birim zaman sonundaki yer değiştirmeleri hesap etmede büyük bir farklılık vardır. Kapalı çözüm yönteminde rijitlik matrisinin tersinin alınması gerekir ancak bu dinamik açık algoritmalar için gerekli değildir. Kapalı algoritmalar için büyük zaman adımlarında bile şartsız düzgün olan sonuçlar olmasına rağmen dinamik açık algoritmalar için zaman adımının analiz edilen yapı için kritik zaman adımından küçük olması gerekmektedir. Sönümlenmemiş kritik zaman adımı $2/w_n$ (w_n : en büyük dairesel doğal frekans) olarak hesaplanan çok küçük bir değer olmaktadır. Bu küçük zaman adımı çok kısa süreli çalışmalar için uygun görülmektedir.

Ancak dinamik açık algoritmalar için zaman adımları sayısının çok olmasına rağmen çözüm matrisinin (eleman sayısı arttıkça çözüm zamanı da geometrik olarak artmaktadır) her adımda tersini almak gerektirmedikinden kapalı algoritmalara göre problem büyüdükçe ve karmaşıklıklaştıkça avantajı artmaktadır. Bu nedenle dinamik açık algoritmalar metal şekillendirme, çarpışma gibi alanlarda tercih edilmektedir.

Biraz daha derinlemesine bakarsak sonlu elemanlarla analiz kısmi diferansiyel denklemlerin çözümü tekniğidir. Yer değiştirme esaslı sonlu elemanlarla analiz yönteminin ana amacı kuvvetlerin etkisi altındaki katı cisimde oluşan yer değiştirmeleri hesap etmektir. Yer değiştirmelerin hesap edilmesi ile gerinim değerleri ve gerilmeler de hesap edilebilir. Çoğu zaman sonlu elemanlarla analizde dengede olan durağan cisimler analiz edilmektedir. Ancak günümüzde dinamik modeller de bu yöntemle çözülmektedir. Bu şekilde katı cismin zamana bağlı hareketini hesap etmek gerekir ki bu çok daha karmaşıktır.

Dinamik bir problem için düğüm yer değiştirmelerinin $U(x,t)$ zamanın bir fonksiyonu olarak hesap edilmeleri gerekir. Hareket denklemi:

$$M \frac{d^2 u}{dt^2} + C \frac{du}{dt} + Ku = F(t) \quad (5.1)$$

M : Kütle matrisi, **C**: Sönümlenme matrisi, **K**: Rijitlik matrisi

Açık algoritmalar için $t=0$ anında u ve $v=du/dt$ bilinmektedir. Dolayısıyla $t=0$ anında M ve K matrislerini oluşturup ivme $a=d^2u/dt^2$ hesap edilebilir.

$$a = M^{-1} (F(t) - C du/dt - K u) \quad (5.2)$$

Kütle matrisi (M) genellikle diyagonal bir matris olarak modellendiği için tersini hesaplamak hızlı bir şekilde yapılabilmektedir. Daha sonra ise ivme değeri ile birim zaman sonundaki hızı $v(\Delta t)$ ve yer değiştirme $u(\Delta t)$ hesap edilebilir:

$$v(\Delta t) = v(0) + a \Delta t \quad \text{ve} \quad u(\Delta t) = u(0) + v(0) \Delta t + \frac{1}{2} a \Delta t^2 \quad (5.3)$$

Bu şekilde her bir zaman birimi sonunda aynı işlemleri uygulayarak çözüme ilerlenir.

Kapalı algoritmalar ile çözüm yönteminde ise kütle ve kuvvet matrislerini $t=0$ anında hesaplayıp ivmeyi bulmak yerine, bu değerler birim adım sonu için Δt zamanında hesaplanır. Bu çözüm çok daha fazla zaman isteyen bir işlemdir çünkü çözüm için denklemlerdeki matrislerin tersinin alınması gerekir.

Daha detaylı bir gösterimle dinamik açık algoritmalar için kapalı algoritmalara göre çok daha küçük bir zaman adımı gereklidir. Kullanılması düşünülen paket programda kabuk elemanlar için bu değer aşağıdaki gibi bir yöntemle hesap edilir :

$$\Delta t < \frac{L_s}{\sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}}}, \quad (5.4)$$

L_s = Karakteristik uzunluk ($L_s = \frac{A_s}{\max(L_1, L_2, L_3, L_4)}$) A_s = Alan, ρ = özgül ağırlık

ν = Poisson oranı

Kapalı algoritmalarda denklemlerdeki matrislerin tersini hesaplama gibi uzun zaman gerektiren işlemler kısa süren ve büyük şekil değişimi olan çalışmalar için dezavantaj oluşturmaktadır ve başlangıçtaki büyük birim zaman adımı avantajını kaybetmektedir. Dolayısıyla metal şekillendirme işlemlerinin çoğunda büyük yer değiştirmeler olduğu için tercih edilmemektedir.

Eleman sayılarının onbini geçmesi, temas, sürtünme, kayma gibi ilave olarak hesaplamaları karıştıran ve problem süresince devam eden durumlarda kapalı algoritmaların daha büyük zaman adımlarında bile daha dengeli olmalarına rağmen, problem çözüm zamanı süresince ortaya çıkan hesaplama zamanı dinamik açık algoritmalara göre çok daha uzun sürebilmektedir.

Bu çalışmada düşünülen modelde başlıca

1. Büyük şekil değişimleri: Kenarın 90°'ye yakın bükülmesi
2. Birden fazla katı cisimle aynı anda temas: Toplam 10 adet makara ile temas eden sac malzeme ve makaraların üzerindeki dönme hareketi ile her elemanla temas kombinasyonları
3. Sürtünme ve sürtünme ile hareket: Makara hareketi ile hareket verildiğinden her makara ile temasında statik ve dinamik sürtünme tanımı
4. Büyük yer değiştirmeler: Sac malzemenin 180 mm/s hızla ilerletilmesi, makaraların saniyede 4,3 radyan hızla dönmesi, makara girişlerinde hızlı giriş neticesinde çarpışma etkisi gibi burkulma veya ani şekil değişiklikleri
5. Eleman sayısı: Eleman sayısının fazla (10.000) olması

özellikleri yer aldığından bu modelin dinamik açık algoritmalar kullanılarak çözülmesinin kapalı algoritma ile çözüme göre çok daha hızlı olacağı için dinamik açık algoritma kullanılmasına karar verilmiştir.

Model geliştirme için LS-DYNA3D ® programı seçilmiştir. Sonlu-elemanlar ile analiz yapan programlar arasında dinamik açık algoritmalarının sağlıklı sonuçlar vermesi bakımından bir çok alanda kullanılmaktadır. Programla ilgili olarak sağlanan örneklerde derin çekme, dövme, gibi klasik metal şekillendirme işlemlerinin yanında, çarpışma, yırtılma, kesme, otomobillerde kullanılan hava yastıkları gibi analizler bulunmaktadır. Bu çalışmada kullanılmak üzere, 10.000 eleman ile sınırlı öğrenci versiyonu (diğer fonksiyonları ticari programla aynı) modelleme, simülasyon ve analiz için kullanılmıştır.

5.2 Birinci Aşama: SEA Model Geliştirilmesi

Bazı çalışmalarda makara gibi bir şeklin çok kısa süre ile uygulanması sonucu anlık oluşan uzama dağılımları sunulmuş, problem zamanına etki eden sönümlenme, eleman sayısı, gerçek problem zamanı gibi etkiler yok sayılmıştır. Çalışmaların sonunda elde edilen gerinim değerleri deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu sonuçlardan bir iki çalışma hariç tutulursa sac üzerinde şekil bozukluklarından bahsedilmemektedir.

Bu çalışmalar incelendikten sonra, daha gerçekçi bir SEA modeli geliştirilip, numunedeki bölgesel gerinim dağılımlarının hesaplanmasının yanı sıra sac malzeme şekil bozukluklarının hesaplanmasında da kullanılabileceği değerlendirilmiştir. Bu amaçla mümkün olduğu kadar gerçeğe yakın bir modelleme yapılması için makaraların hareketi ve ortamdaki sürtünme ile ilerleyen bir model geliştirilmiştir. Makaralar daha çok sayıda elemanla modellenmiş ve 5 makara setinden de geçmek suretiyle şekil verilen sac malzemeye gerçek hız verilerek SEA modeli oluşturulmuştur.

İlk aşamada ince sac malzeme modellemesi için örnek olarak seçilen çalışma en çok referans verilen Bhattacharyya ve Smith'in çalışmasıdır [7]. Bazı çalışmalarda ise Seneyake ve diğerlerinin çalışmasında olduğu gibi ince sac malzeme üzerine yapılmış deneysel ve SEA çalışmaları ile ilgili makara geometrisi, sac malzeme kalınlığı, makaraların devir sayısı gibi değişkenler yer almadığından bu çalışmalarla bir karşılaştırma yapma imkanı bulunamamıştır [14]. Bu nedenle ince sac malzemelerle yapılmış Bhattacharyya ve Smith'in çalışmasındaki deney geometrisi ve sonuçları karşılaştırabilmek için bir SEA modeli geliştirilmiştir.

Söz konusu çalışmada karşılaştırma için kullanılan ve bu çalışma için de kullanılan ölçüler Tablo 5.1.'de ve makara geometrisi Şekil 5.1'de gösterilmektedir.

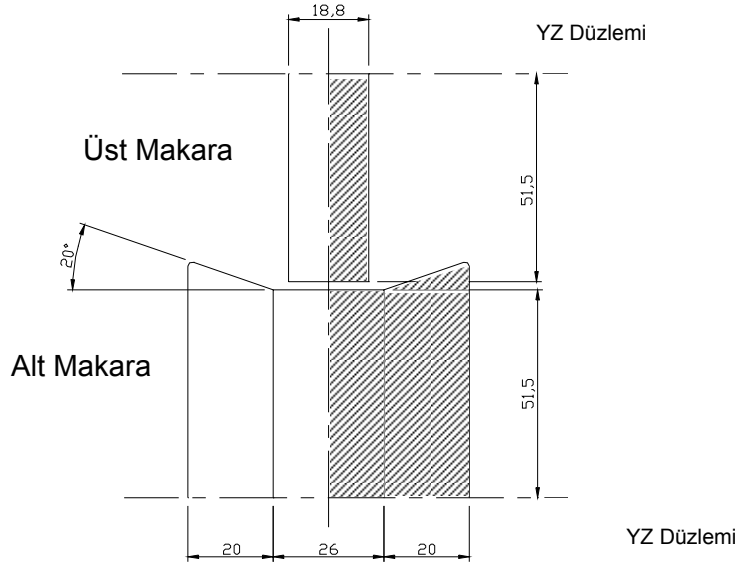
Tablo 5.1. Deneylerde kullanılan tezgah bilgileri [7,15]

Tezgah Türü	Ankastre
Sac uzunluğu (L)	400 mm
Sac genişliği (sg)	40 mm
Sac kalınlığı (T)	0,6 mm
Makara ana çapı	106 mm
Adım hızı	2,6 m / dakika (=43 mm/s)

Şekil 5.1’de gösterilen şekilde makara geometrisi sırayla 20°–40°–60°–85° olarak geliştirilmiştir. Son iki makarada setinde, parçanın kolayca geçebilmesi için, yarıçapı 103 mm olan iki yan makara ilave edilmiştir.

Duggal ve diğerlerinin çalışmasında belirtilen 0,6 mm kalınlığında 40 mm genişliğinde ve 500 mm uzunluğunda sac malzeme boyutları, daha küçük boyutlu eleman kullanmak için boyu 400 mm ve simetri nedeni ile de genişliği 20 mm olarak modellenmiştir [15].

Simülasyonda kullanılan detayı aşağıda Şekil 5.2.’de verilen makaraların, aynı mantıkla XY düzleminde simetrik olduğundan, yarısı modellenmiştir.



Şekil 5.1. Makara seti geometrisi (ölçüler milimetre cinsindedir) [7,15]



Şekil 5.2. Simülasyonda kullanılan makara setleri yerleşimi. (XY düzleminde simetrik olduğu için yarısı modellenmiştir. Sac kalınlığı (T) 0,6 mm alınmıştır.)

Makara çapları Bhattacharyya ve Smith'in çalışmasında belirtilen 106 mm çap yerine Duggal ve diğerlerinin çalışmasındaki gibi 103 mm olarak hazırlanmıştır. İlk makara seti ise 0° olarak, bazı tezgahlarda olduğu gibi, sacı ilk ittiren makaralar olarak modellenmiştir.

5.2.1 Temel varsayımlar

Modellemede kullanılan temel varsayımlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Makaraların hiçbir zaman deformasyona uğramadıkları varsayılmıştır (Makara elemanlarının hareketleri sadece z-ekseninde dönme amacıyla serbest bırakılmıştır),
- Makara merkezlerinde kayma olmadığı varsayılmıştır (Makara çiftlerinin merkezleri aynı doğrultuda ve saca dik olarak yerleştirilmiştir),
- Sürtünme bütün yüzeylere eşit olarak uygulanmıştır (Statik sürtünme katsayısı olarak (F_s) 0,280 ve dinamik sürtünme katsayısı olarak (F_d) 0,08 değerleri diğer çalışmalarda kullanılan değerlerle uyumlu olarak ve yapılan SEA modeli denemeleri ile malzemenin makaralar arasından geçerken daha gerçekçi bir davranış göstermesi nedeniyle seçilmiştir [24, 28]),
- Yerçekimi yok sayılmıştır,
- Sac elemanlarının kabuk olarak modellenmesi uygun bulunmuş ve 4-düğümlü kabuk elemanları ile modellenmiştir,
- Isı etkisi yok sayılmıştır,
- Malzemede metalürjik bozuklukların bulunmadığı varsayılmıştır.

5.2.2 Kullanılan birimler

LS-DYNA Programında kullanılan birimlerin bütünlüğü açısından Tablo 5.2'de verilen sistematığe uyulmuştur.

Tablo 5.2. SEA modelinde kullanılan birimler ve örnek değerler [45]

Ölçü Cinsi	Birim
Uzunluk	Milimetre
Zaman	Saniye
Kütle	Ton
Kuvvet	Newton
Elastisite Modülüsü (MPa)	210,0 E+03
Çelik özgül ağırlığı (ton / mm ³)	7,85 E-09
Sünek çeliğin akma gerilmesi (MPa)	210
Yerçekimi ivmesi (mm/s ²)	9,81 E+03

5.2.3 Eleman seçimi

Yapılan modellemede makaralarda ve sac modellemesinde Belytschko-Tsay 4 düğümlü kabuk elemanları kullanılmıştır. Sac boylamasına 125 elemandan ve genişlik yönünde 20 elemandan oluşmaktadır ve sac üzerindeki eleman ölçüsü 4 x 1 mm'dir. Detaylar Tablo 5.3'te sunulmaktadır.

Tablo 5.3. Modelleme kullanılan eleman sayısı ve çeşitleri

	Eleman sayısı	Kabuk Eleman Formülasyonu	Entegrasyon nokta sayısı
Üst Makaralar	200 x 1	Belytschko-Tsay 4 düğümlü kabuk elemanları (Eleman no 2)	5
Alt Makaralar	100 x 1		
Son iki yan makaralar	100 x 1		
Son üst makara kaplaması	10 x10	Belytschko-Tsay 4 düğümlü kabuk elemanları (Eleman no 2)	5
Sac	400 x 20	Belytschko-Tsay 4 düğümlü kabuk elemanları (Eleman no 2)	7

Metal şekillendirme çalışmalarında hızı ve tutarlılığı açısından 2 numaralı kabuk tipi olan Belytschko-Tsay kullanılmıştır [45,46]. Şekillendirme çalışmalarında geri yaylanmayı daha iyi göstermesi ve işlemci zamanlarındaki gelişmeden ötürü 5 adet entegrasyon noktası tercih edilmiştir [45].

5.2.4 Modelleme malzeme seçimi

Makaralı bükme işleminde makaralarda deformasyonun olmadığı varsayılmış ve makaralar katı cisim olarak modellenmiştir. Kullanılan yazılımda tavsiye edilen şekilde, kalıplar, deformasyona uğramayan 20 numaralı katı cisim malzeme tipi (*MAT_RIGID) ile modellenmiştir [45]. Bu malzemenin özellikleri Tablo 5.4.'de sunulmaktadır.

Tablo 5.4. Makara malzemesi özellikleri (Malzeme No: 20)

Ölçü Cinsi	Birim
Çelik özgül ağırlığı	7,38E-09
Elastisite Modülüsü	207 E+03
Poisson Oranı (ν)	0,280

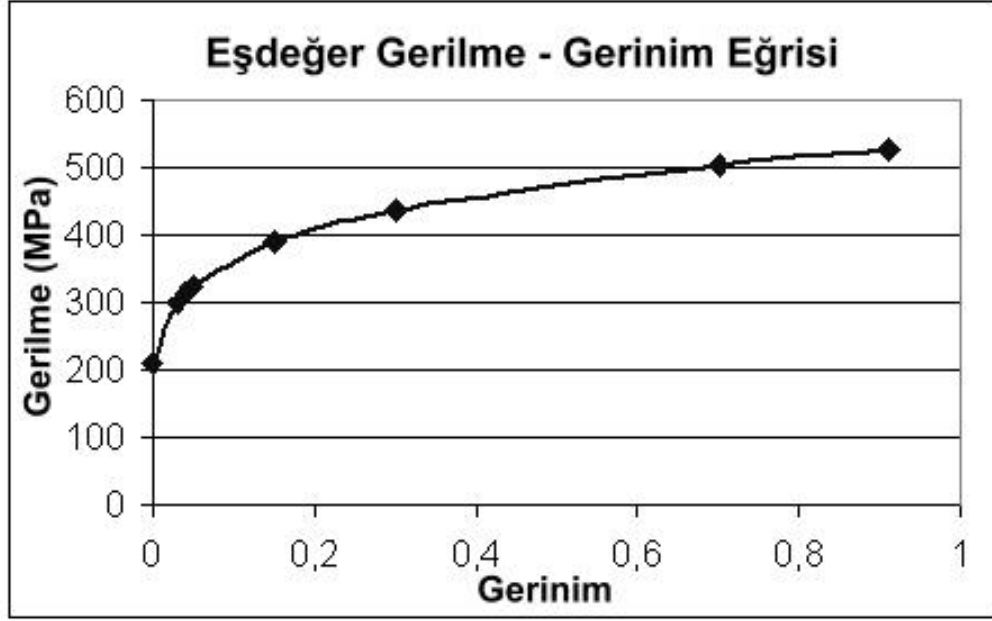
Makaraların üzerinde yer alan sonlu elemanların her yönde (düzlemsel ve dairesel) hareketleri kısıtlanmıştır. Makaraların dönmesini sağlayacak şekilde sadece Z-ekseni yönünde dönme kısıtlaması kaldırılmıştır. Bu şekilde makaralara verilen dairesel yer değiştirme hareketi ile makaralar sac malzemeyi itirmektedir.

Sac üzerindeki malzeme için sünek çelik özellikleri olan malzeme değerleri girilmiştir. Malzeme tipi No:24 "piecewise-linear-plasticity" seçilmiştir. Özellikleri Tablo 5.5'te ve Şekil 5.3'te sunulmaktadır.

Tablo 5.5. Sac malzemesi mekanik özellikleri (Malzeme No: 24)

Çelik özgül ağırlığı	7,38E-09							
Elastisite Modülüsü (MPa)	207 E+03							
Poisson Oranı (ν)	0,280							
Akma Gerilmesi (σ_y , MPa)	210							
Eşdeğer Gerilme Değeri (σ, MPa)	210	300	314	325	390	438	505	527
Eşdeğer Gerinim Değeri (ϵ)	0	0,0309	0,0409	0,05	0,151	0,301	0,701	0,910

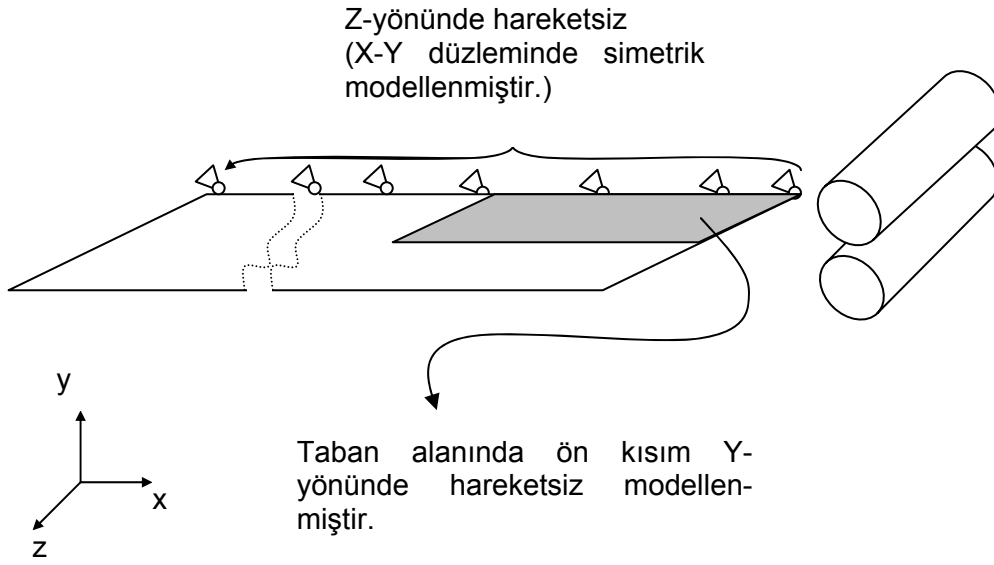
24 nolu malzeme çeşidinin seçilmesinde etkili olan özellik kullanıcı isteğine bağlı olarak bir gerilme-gerinim eğrisi değerleri girmeye olanak vermesidir. Plastik şekil değişiminin olduğu alanda 7 ek gerilme-gerinim değeri girilebilmektedir.



Şekil 5.3: Sünek çelik örnek eşdeğer gerilme–gerinim eğrisi

5.2.5 Sac hareketi için uygulanan kısıtlamalar

Bütün makaraların Z-ekseninde dönme hariç, her yönde hareketleri kısıtlanmıştır. Sadece Z-ekseninde hareket ederek sac malzemeyi hareket ettirmektedirler. Sac malzeme 400 x 20 elemanla modellenmiştir. Taban alanında sarı ile gösterilen yerler y-yönünde hareketsiz modellenmiştir. Kalıp girişlerinde sorun yaşandığından bu alanda hareket kısıtlaması parçanın modelde daha kolay akmasına olanak vermektedir. Simetri eksenini geçen kenarda ise boydan boya sac hareketi z-yönünde kısıtlanmıştır.



Şekil 5.4: Sac malzeme hareket kısıtlamaları

5.2.6 Model Ls-Dyna girdi dosyası diğer parametreleri

Aşağıda Tablo 5.6.'da hazırlanan modelle ilgili olarak varsayılan değerlerin kullanıldığı diğer değişkenler yer almaktadır.

Tablo 5.6. Ls-Dyna modeli girdi dosyası bazı parametreleri

Statik sürtünme (Fs) katsayısı	0,280
Dinamik sürtünme (Fd) katsayısı	0,08
Sönümlenme katsayısı (VDC)	20

Daha önce vurgulandığı gibi sürtünme katsayısı benzer çalışmalarda vurgulanan değerler dikkate alınarak yaklaşık bir değer olarak seçilmiştir [24,28]. Dinamik sürtünme katsayısı (Fd) Ls-Dyna programında, temas halindeki yüzeylerin göreceli hızlarına (v_{rel}) bağlı olarak hesaplanmaktadır:

$$\mu_c = Fd + (Fs - Fd)e^{-DC|v_{rel}|} \quad (5.5)$$

DC: Üstel azalma katsayısı (*Exponential decay coefficient*)

Sönümlenme katsayısı (VDC) yüzeylerin teması esnasında istenmeyen titreşimleri engellemek için (sac şekillendirme işlemleri gibi), temas eden yüzeylere dik olarak uygulanır. LS-Dyna programında kullanılan hesaplama:

$$\text{Sönümlenme katsayısı: } \zeta = \frac{VDC}{100} \cdot \zeta_{wd} \quad \text{Örnek: VDC=20} \quad (5.6)$$

ξ_{kritik} LS-Dyna programında aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\xi_{kritik} = 2mw; m = \min(m_{slave}, m_{master})_{\text{resp.slavenode}}^{massofmaster} \quad (5.7)$$

$$w = \sqrt{k \cdot \frac{m_{slave} + m_{master}}{m_{slave} \cdot m_{master}}} \quad k : \text{arayüz rijitliği} \quad (5.8)$$

5.2.7 Model ile ilgili diğer bilgiler

Problem çözüm saati ve diğer ilgili özet bilgiler aşağıda listelenmiştir:

- Modelde kullanılan toplam düğüm sayısı: 11070
- Modelde kullanılan toplam kabuk elemanları (4 noktalı): 9439
- Problem zamanı: 25 saniye
- Problem toplam işlemci (CPU) süresi: 37584 saniye (10 saat 26 dakika 24 saniye)
- İşlemci sayısı / cinsi: 1 CPU; Pentium IV 2.8 Ghz

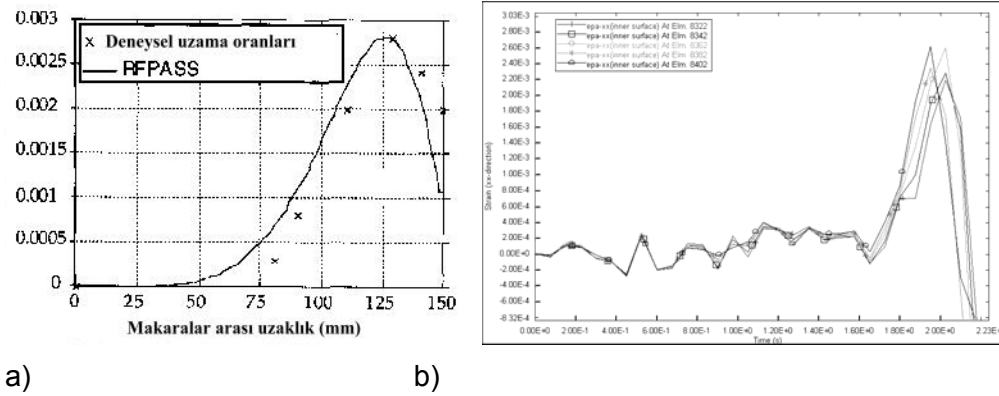
Ls-Dyna programında kullanılan anahtar kelimeler sıra bağımsız olarak program tarafından algılanmaktadır. Dosya metin türünde olup, kelime editör programları ile ilgili anahtar kelimeler elle yazılarak girilebilmektedir. Bu çalışmada ise, Ls-Dyna programı içinde yer alan FEMB PC 1.2 arayüz programı kullanılarak, AutoCad programından *.dxf olarak tel kafes alınıp, üzerinde eleman döşeme, malzeme özellikleri tanımlama gibi işlemler yapılmıştır.

5.2.8 Model temel özellikleri

- a) Gerçek zamanlı modelleme (25 saniye)
- b) Sac malzemelerin makaraların hareketi ile sürtünerek ilerletilmesi.
- c) Sac malzemenin 1x1 mm kabuk elemanları ile modellenerek daha gerçekçi bir şekil değişmesinin gözlenmesine olanak verilmesi.
- d) Makaraların hepsine eşit hız verilmesi.
- e) Kullanıcının kontrol edebildikleri :
 - i. Makara hızı: Makaraların hepsine aynı hız yerine istenirse her makaraya farklı hız verilebilir,
 - ii. Sürtünme değerleri,
 - iii. Sönümlenme oranları (temas ve genel),
 - iv. Makara ve sac malzeme özellikleri,
 - v. Kısıtlamalar.

5.2.9 İlk aşama sonuçları

İlk aşama olarak Şekil 5.5'te verilen sonuçlar elde edilmiş ve Bhattacharyya ve Smith'in [7] çalışmasında bildirdikleri 0,0028 değeri ile yakın bir değerde 20° makara girişinde yaklaşık 0,0025 tepe gerinim değeri bulunmuştur. Bu değer sağlıklı bir sonuç olarak değerlendirilmiştir. Bu değer düşük hesaplanmasının nedenleri arasında, malzeme olarak bildirilen SAE 1020 için imalatçıların ellerinde çok farklı malzeme özellikleri olan ve SAE 1020 olarak anılan sünek çelik malzeme olması ve makaraların 100 elemanla modellenmesinden kaynaklanan ilave olarak çapta 0,06 ila 0,1 mm arasında bir küçülme sayılabilir.

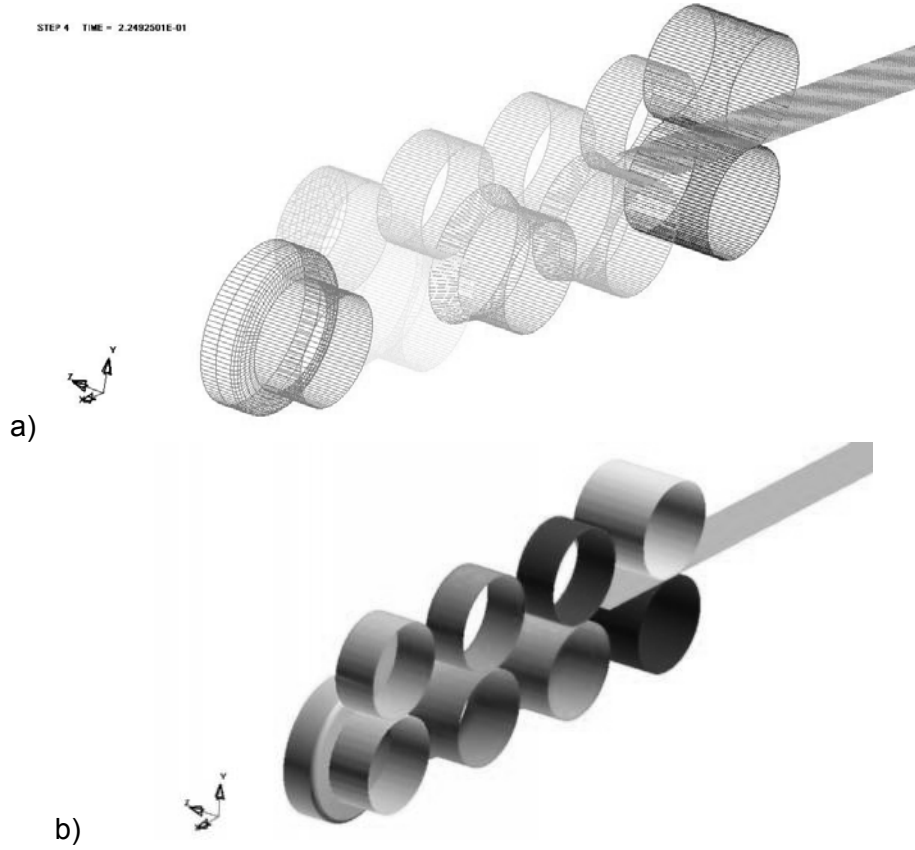


Şekil 5.5: a) Duggal ve diğerlerinin çalışmasında sundukları 20° makarada oluşan gerinim değerleri, b) SEA sonucu 20° makarada elde edilen gerinim-gerinim grafiği

5.3 İkinci Aşama: Geliştirilmiş SEA Modeli

İkinci aşamada ise birinci aşamada oluşturulan model deneysel çalışmada kullanılan geometriye göre düzeltilmiş ve ilave olarak model içinde geliştirmeler yapılmıştır. Bu şekilde deney sonuçlarına daha yakın sonuçlar elde eden bir model geliştirilmiş ve sonlu elemanlar yöntemi ile deney kombinasyonları tekrar edilerek birebir simülasyonları yapılmıştır.

Model geliştirme esnasında özellikle 85°'lik makara girişinde yaşanan aşırı zorlanma yüzünden son makara köşeleri yuvarlatılmak suretiyle yeniden modellenmiştir. Ayrıca, çıkış makarası daha çok elemanla (960 eleman) modellendikten sonra yapılan çalışmada daha iyi sonuçlar alınmıştır. A2 makara dizilişi modeli, A1 makara dizilişi modeli içindeki 4. makara setinin çıkartılması ve 5. makara setinin kaldırılması ile hazırlanmıştır. Her iki makara seti de Şekil 5.6'da gösterilmektedir.

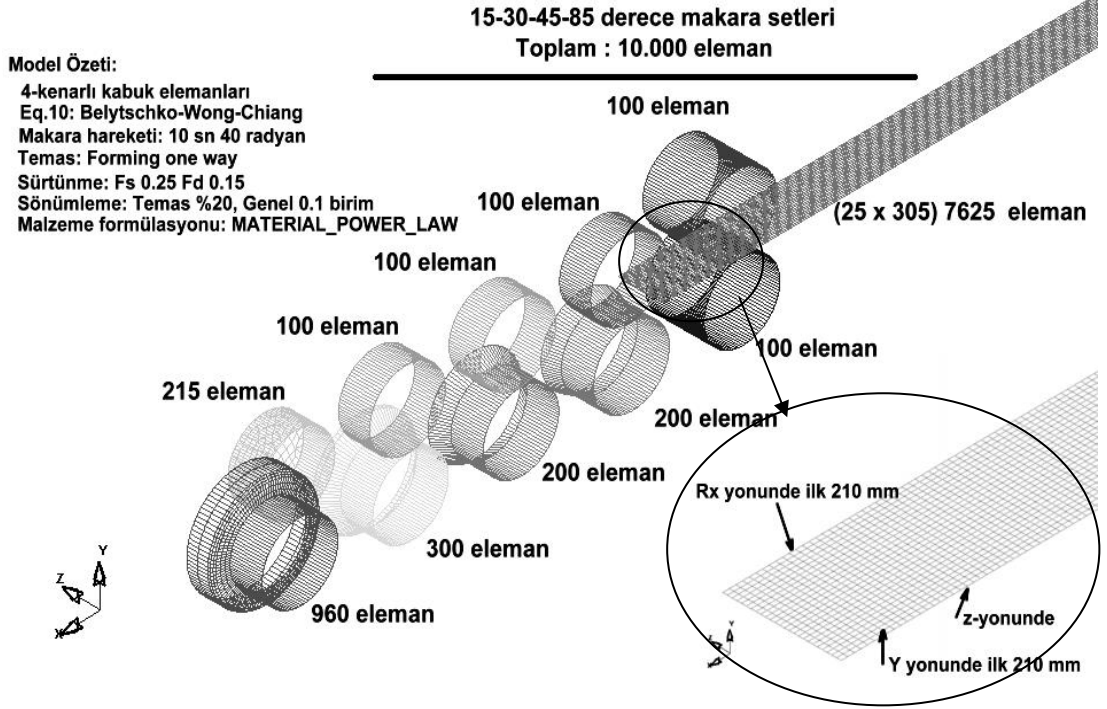


Şekil 5.6: a) A1 (15° - 30° - 45° - 85°) makara dizilişi, b) A2 (15° - 30° - 85°) makara dizilişi

İlave olarak, makaralı bükme işleminin doğasında olan çekme ve basma yönündeki gerilmeler karşısında klasik kabuk elemanların algoritmalarındaki baskı kuvvetleri karşısındaki davranış bozukluğu ilk aşama çalışmasında gözlemlendiği için daha gerçekçi bir kabuk eleman olan Eq.10: Belytschko-Wong-Chiang ikinci aşamada kullanılmıştır. Birinci aşamadaki modelde yaşanan sorunlar (abartılı şekil bozuklukları, sonuç alınamama ..vb) bu eleman kullanıldığında son derece azalmış ve sac malzeme davranışında önemli ölçüde iyileşme gözlemlenmiştir.

Lisanslı programın eleman sayısının 10.000 elemanla kısıtlı olması nedeni ile 85° 'lik makaranın eleman sayısı artırılınca deneylerde 1000 mm olarak kullanılan sac malzeme SEA için 915 mm olarak modellenmiştir. Aynı makara setlerinin kullanılması nedeni ile sac malzeme hem 100 mm hem de 110 mm genişlikleri için genişlik yönünde 25 elemanla modellenmiştir. Dolayısıyla sac malzeme toplam olarak $25 \times 305 (= 7625)$ eleman ile modellenmiştir. Makaralarla ilgili modellemede kullanılan eleman sayıları Şekil 5.7'de detaylı olarak gösterilmiştir. Toplamda 10.000 elemana 5 makara setinden oluşan A1 dizilişinde ulaşılmıştır. A2 dizilişinde makara veya sac malzeme davranışının etkilenmemesi için eleman sıklaştırma yapılmamıştır ve modelde 45° 'lik makara setine karşılık gelen 400 eleman azaltılmış halde toplam 9600 elemanla modellenmiştir.

Başlangıç hareketini yapan ilk set makara 2 saniye sonra kapatılmaktadır ve hareket diğer makaraların hareketi ile devam etmektedir. Diğer değişkenler ilk modelde olduğu gibi X-Y ekseninde simetrik alındığı için yarısı modellenmiştir. EK-A'da verilen resimlerde görsel olarak daha rahat anlaşılmasına yardımcı olduğu için aynalı görüntüsü alınmıştır.



Şekil 5.7: Geliştirilmiş SEA model özeti

Hareket kısıtlamaları ise şu şekildedir:

- 1- XY eksenini boyunca simetri için kayma olmayacak şekilde taban kenar çizgisindeki bütün düğümlere z-yönünde hareket kısıtlaması getirilmiştir.
- 2- İlk 210 mm (70 eleman) için sac malzemenin taban kısmındaki kenarına ve yanındaki düğümlere ilave Y yönünde makaralara kolay girişi amacıyla kısıtlama getirilmiştir. (Bu alan ilk modele göre daraltılmıştır).
- 3- İlk 210 mm (70 eleman) için sac malzemenin bükülen kenar ucu boylamasına yönde (x-yönünde) dönme (Rx) kısıtlaması son makaraya kolay girişi amacıyla uygulanmıştır.
- 4- Makara hareketi ise sadece z-yönünde dönme yapacak şekilde kısıtlanmıştır.

Maker ve Zhu tarafından LS-Dyna programı için form verme işlemlerinde kullanılması tavsiye edilen algoritmalar dikkate alınmıştır [47]. SEA modelinde kullanılan diğer değişiklikler şu şekildedir:

1- Kabuk Eleman Teorisi :

Eq.10: Belytschko-Wong-Chiang fonksiyonu kullanılmıştır. Bu eleman Şekil 5.8'de gösterilen çarpılma (warping) etkisini de dikkate almaktadır. Aynı konuda Hughes-Liu kabuk elemanına göre çarpılmayı dikkate alarak daha kısa zamanda sonuç vermektedir.

Gerçek bir makaralı bükme işleminde istenmemekle birlikte en çok gözlenebilen sorunlardan olan çarpılma etkisinin modelde de mutlaka hesaba katılması gereklidir. Bu nedenle bu çalışmada Belytschko-Wong-Chiang elemanı seçilmiş ve daha iyi sonuç alınmıştır.



Şekil 5.8: Çarpılma etkisi [46]

2

- Makara Hareketi

Makara hareketi Boundary_Prescribed_Motion_Rigid fonksiyonu ile yaptırılmıştır. Hareket tipi olarak problem zamanı 10 saniye sonunda 40 radyan olacak şekilde dönme hareketi uygulanmıştır. Bu da yaklaşık olarak 180 mm/s boylamasına yönde hıza karşılık gelmektedir.

3- Temas Formülasyonu

Metal işlemede daha iyi ve hızlı sonuç veren Forming_One_Way_Surface_To_Surface fonksiyonu seçilmiştir. Sac malzeme ve katı malzeme içi içe geçmemesi için kabuk elemanlarda geçme kontrolü aktif hale getirilmiştir. Statik sürtünme katsayısı 0,25 ve dinamik sürtünme katsayısı 0,15 olarak alınmıştır. Ayrıca temas sönümlenmesi yapılan denemelerden sonra %20 olacak şekilde uygulanmasına karar verilmiştir.

4- Sönümleme

Yukarıda bahsedildiği gibi temas sönümlemesinin yanına modeldeki parçalara genel olarak kullanılan yazılım ile metal şekillendirme için verilen örneklerde de belirtilen bir değer baz alınarak ve deneme yanılma ile en iyi sonucu veren 0,1 birim olarak eklenmesine karar verilmiştir. Hem temas hem de genel sönümlemenin değerlerinin uygulanması ile sac malzemenin temas problemleri en aza indirgenmiştir.

5- Malzeme

Modelde kullanılan malzeme testlerindeki gerçek gerilme-gerinim grafiği üzerinden 8 adet nokta yardımı ile tanımlanan bir malzeme kullanılmıştır. Ancak bu malzeme yerine gerçek gerinimini Holloman denklemi kullanarak malzeme pekleşmesini de hesaba katan Mat_Powerlaw_Plasticity malzeme modeli seçilmiştir.

Model çalışması makara dizilişleri ve sac genişliklerine göre 4 ana model oluşturulmuştur: A1-100 mm, A1-110 mm, A2-100 mm ve A2-110 mm. Bu modellerde değişiklik yapmadan alüminyum ve sünek çelik malzeme özelliklerinin girilmesi ile 8 adet deneye karşılık gelen model elde edilmektedir. Çalışmalara A1 makara dizilişi (15° - 30° - 45° - 85°) ve 110 mm sac genişliği modeli ile başlanmış, bu model ile sönümleme değerleri gibi değişkenlerle denemeler yapılmıştır. Bu model ile tatminkar sonuçlar elde edilmesi üzerine, aynı model temel alınıp diğer modeller sıra ile çalıştırılmıştır.

Çalışmalarda yeni modellerin hazırlanmasında temas problemleri çıktığında sadece ilerleme adım zamanında çok küçük değişiklikler yapılmış veya 10 saniye sonunda 40 yerine 39,9 radyan ilerleme tanımlanmıştır. Bir başka deyişle geliştirilen modeldeki hassasiyet (sensitivity) yüksek olarak değerlendirilebilir.

Çalıştırılan modeller için kullanılan işlemci tipine göre ortalama problem zamanları aşağıda Tablo 5.7'de yaklaşık olarak verilmektedir. Tablodan görüldüğü üzere trend olarak ev tipi bilgisayarlarda kullanılan işlemcilerle aynı problemin çözülme saati yaklaşık 3 kat azalmıştır. Tabloda verilen en gelişmiş işlemci ise 2006 yılı itibarıyla demode olup yeni kuşak çift çekirdekli işlemciler ile problem çözme zamanlarının geometrik olarak daha da azalacağı değerlendirilebilir.

Bu bağlamda bu çalışmada ve benzeri çalışmalarda geliştirilmekte olan SEA modelleri ile çok uzun süreler beklemeden sonuç alınması SEA analizlerinin önümüzdeki dönem makaralı bükme işleminde daha yaygın olarak kullanılabilir olması yönünde yorumlanabilir.

Tablo 5.7: İşlemci ve problem zamanları tablosu

İşlemci Tipi	Model Bilgisi	Problem çözüm zamanı
Celeron 800	10.000 eleman A1 makara dizilişi, 10 saniye problem zamanı	≈ 9 saat
Pentium IV 2.8GHz		≈ 5 saat
Pentium M 1.4 GHz		≈ 3 saat

5.4 Üçüncü Aşama: Modelin İyileştirme Hesabında Kullanılması

Üçüncü aşamada ise elde edilmiş modelin uyarlanması ile değişik makara açılarının (15° - 30° - 45° - 75° ve 25° - 50° - 70° - 75°) makaralı bükme işleminde profil kesiti üzerine etkileri incelenmiştir. Yapılmış diğer çalışmalarda bahsedilen iki makara seti arasındaki açının yaklaşık olarak 30° 'yi geçmemesi halinde iyi sonuç alındığından hareketle, ilk olarak varolan SEA modelinde sadece çıkış makarasının açısı kaynaklarda bahsedilen 30° farkına indirilmiş ve 15° - 30° - 45° - 75° dizilişi oluşturulmuştur. Model dosyası üzerinde diğer parametreler aynı bırakılmış ve sırasıyla sac genişliği 110 mm ve 100 mm, ayrıca sünek çelik ve alüminyum malzemeler için toplam dört kombinasyon modellenmiştir.

İlk iyileştirme sonuçlarından alınan pozitif değerler sonucu ikinci iyileştirme tahmini ve kontrolü olarak yine kaynaklarda verilen tasarım yaklaşımı temel alınmış ve çıkış açısı 75° ve bir önceki açı ($75^{\circ}-5^{\circ}=70^{\circ}$) olacak şekilde makara açıları seçilmiş ve 25° - 50° - 70° - 75° açılara karar verilmiştir.

Her iki iyileştirme dizilişi için de kaynaklarda bahsedilen genel değerlendirmeye dayanarak bir sorun gözlenmeden (ikinci aşamada kenar dalgalanması ve düşey düzlemde eğim sorunları deneysel çalışmaya göre yüksek ölçekte gözlenmeye devam etmiştir) malzemelerin çıkması beklenmektedir.

Son iki açının da yüksek değerler olmaları nedeniyle modelde son iki alt makara seti (70° ve 75°) çok elemanla modellenmiştir. Yazılımdaki eleman sınırı (10.000) nedeniyle söz konusu elemanlar sac malzeme modeli üzerinden karşılanmıştır. Bu nedenle sac malzeme ikinci aşamadaki 915 mm yerine 801 mm (267 eleman boylamasına ve 27 eleman enlemesine) olarak modellenmiştir.

5.5 SEA Sonuçları

Çalışmanın ilk adımında, mümkün olduğu kadar gerçek makaralı bükme işlemini simüle etmek için makara hareketi ile sac malzemenin itilmesi suretiyle şekil verilmesi için geliştirilen model Bhattacharyya ve Smith'in 1984 tarihli çalışmasında bildirilen gerinimleri hesaplamada başarılı olmuştur.

Daha önce yapılmış deneysel çalışmalarda malzeme özelliklerinin tam olarak bildirilmemesi nedeni ile yaklaşık olarak kullanılan malzeme ve akma gerilmelerinin bu konudaki farka neden olduğu düşünülmektedir. Bu konu dışında ilk aşamada elde edilen modelin 5 makara setinden geçerek makaralı bükme işleminin bütününe daha gerçekçi olarak simüle etmek üzere geliştirilebilir olduğu değerlendirilmiştir.

İkinci aşamada ise deneysel çalışmada kullanılan makara setleri birebir modellenmiştir. Eleman sayısından kazanmak için makara setlerindeki açılar konik şekilde verilmiştir. Bu koniklik son makara seti olan 85°'lik makarada ise sorun çıkarmıştır. Bu nedenle makaranın daha çok elemanla modellenmesi için sac malzemenin boyu 1000 mm yerine 915 mm olarak modellenmiştir. Bu şekilde yeniden çalıştırılan SEA modeli ile girişte yaşanan problem ortadan kalkmış ve iyi sonuçlar alınmıştır. İlk olarak 1. deney kombinasyonu A1-110-AI (15°-30°-45°-85° – 110 mm - Alüminyum) için uyarlanan modelde sönümlenme değerleri ile denemeler yapılmış ve genel olarak uygulanan kısıtlamalar en aza indirilmeye çalışılmıştır. Modelde makara girişlerini sağlayabilmek için taban alanında y-yönünde hareket kısıtlaması ihtiyacı ortadan kaldırılamamıştır. Bu nedenle girişte 210 mm boyunca sac malzeme şekil değişimi ile sonraki kısım arasında fark bulunmaktadır. Deneysel çalışma ile elde edilmiş sonuçları hesaplamaya geçmeden SEA modelinde A1-110-AI kombinasyonunda sonuçlar deneysel sonuçlarla en yakın elde edilene kadar çeşitli değişkenler, sürtünme, sönümlenme ve problem birim adım zamanı optimize edilmeye çalışılmıştır.

SEA modelinde gerçek hayattaki gibi sürtünme değerleri hem dinamik hem de statik olarak uygulanmıştır. Bu değerle yapılan denemelerde sürtünme değerinin çok azaltılması halinde kayma gözleendiğinden hem statik hem de dinamik sürtünme değerleri önerilen yaklaşık değerlerde tutulmuştur.

SEA modelinde A1-110-AI kombinasyonu ile elde edilen sonuçlar deneysel olarak elde edilmiş sonuçlarla yakın çıktığı anda temel model oluşturulmuş ve bütün diğer denemeler bu modeli baz alarak yaratılmıştır.

Yeni modellerde sadece sac malzeme yeniden elemanlarla döşenmiş, veya A2 kombinasyonu için 4. makara seti silinip 5. makara seti kaydırılmıştır. Bunun dışında bütün değişkenler aynı şekilde tutulmaya çalışılmıştır. SEA modeli bozulduğu için sırasıyla şu düzeltmeler yapılmıştır: A1-B1-sünek çelik ve A1-B2-sünek çelik kombinasyonunda son makara için yer değiştirme 10 saniye sonunda 40 yerine 40,2 radyan olarak, A2-B1-sünek çelik için 10 saniye sonunda 40,3 radyan olarak, son çelik kombinasyonu için ise 10 saniye sonunda 40 radyanda sorun çıkmadığı için aynen uygulanmıştır.

Hem birinci hem de ikinci aşamada karşılaşılan en büyük sorunlardan birisi temas sorunudur. Programda kullanılan temas algoritmalarının makaralı bükme işlemi için özel olarak bulunmaması nedeniyle diğer metal şekillendirme işlemlerinde kullanılan ve önerilen algoritma seçilmiştir. Ancak bu algoritmalar tek yönlü sistemlerde daha başarılı sonuçlar vermektedir. Makaralı bükme işleminde, makara hareketi nedeniyle tek yönde olmayan temas nedeniyle modelin hassasiyetinin artma nedeninin temas algoritmasının olduğu düşünülmektedir.

İkinci hassasiyet kaynağının ise kullanılan kabuk elemanlardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Klasik tuğla elemanlara kıyasla kabuk elemanların basma yönündeki kuvvetlere verdikleri tepki, doğası nedeni ile tam düz plakalar olarak modellenmesinden kaynaklanması nedeniyle, tıpkı akordeon gibi katlanma şeklinde olmaktadır. Bu çalışmada basma kuvvetleri nedeniyle birinci aşamada kullanılan modelde yaşanan sorunlar nedeniyle biraz daha CPU zamanı isteyen ancak hala tuğla elemanlara gerekse Hughes-Liu kabuk elemanlarına kıyasla çok daha kısa sürede sonuç veren ve Şekil 5.8'deki çarpılma hareketini yapabilen Belytschko-Wong-Chiang düzeltilmiş kabuk elemanı seçilmiştir. Bu kabuk elemanın sayesinde modelin uygulandığı deney kombinasyonlarında 55°'ye varan açı farklarındaki keskin bükme (ve bu nedenle oluşan daha yüksek basma kuvvetleri) karşısında sonuç alınmaya devam edilmiştir. Ancak elde edilen sonuçlardaki şekil bozukluğunun azaltılmış olmasına rağmen deneysel olarak elde edilmiş sonuçlara kıyasla yüksek olmasının bir nedeni de kullanılan kabuk elemanlarının basma yönündeki kuvvetler karşısında kötü tepki vermeleridir [45].

Diğer hassasiyet kaynağının, makaraların modellenmesinde kullanılan yaklaşık 3 mm eninde 38 mm boyunda elemanların bu konuda tavsiye edilen eleman en/boy oranının çok altında olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Sac malzemenin mümkün olduğunca çok elemanla modellenmesi için makaraların modellenmesinde eleman tasarrufu yapılması gerekmektedir.

Çalışmanın birinci kısmında sac malzeme üzerinde eleman sayısının artmasının sac malzeme davranışına getirdiği olumlu değişim nedeniyle makaralardaki eleman sayısını minimize etmek için en/boy oranı çok düşük elemanlar kullanılmasına karar verilmiştir.

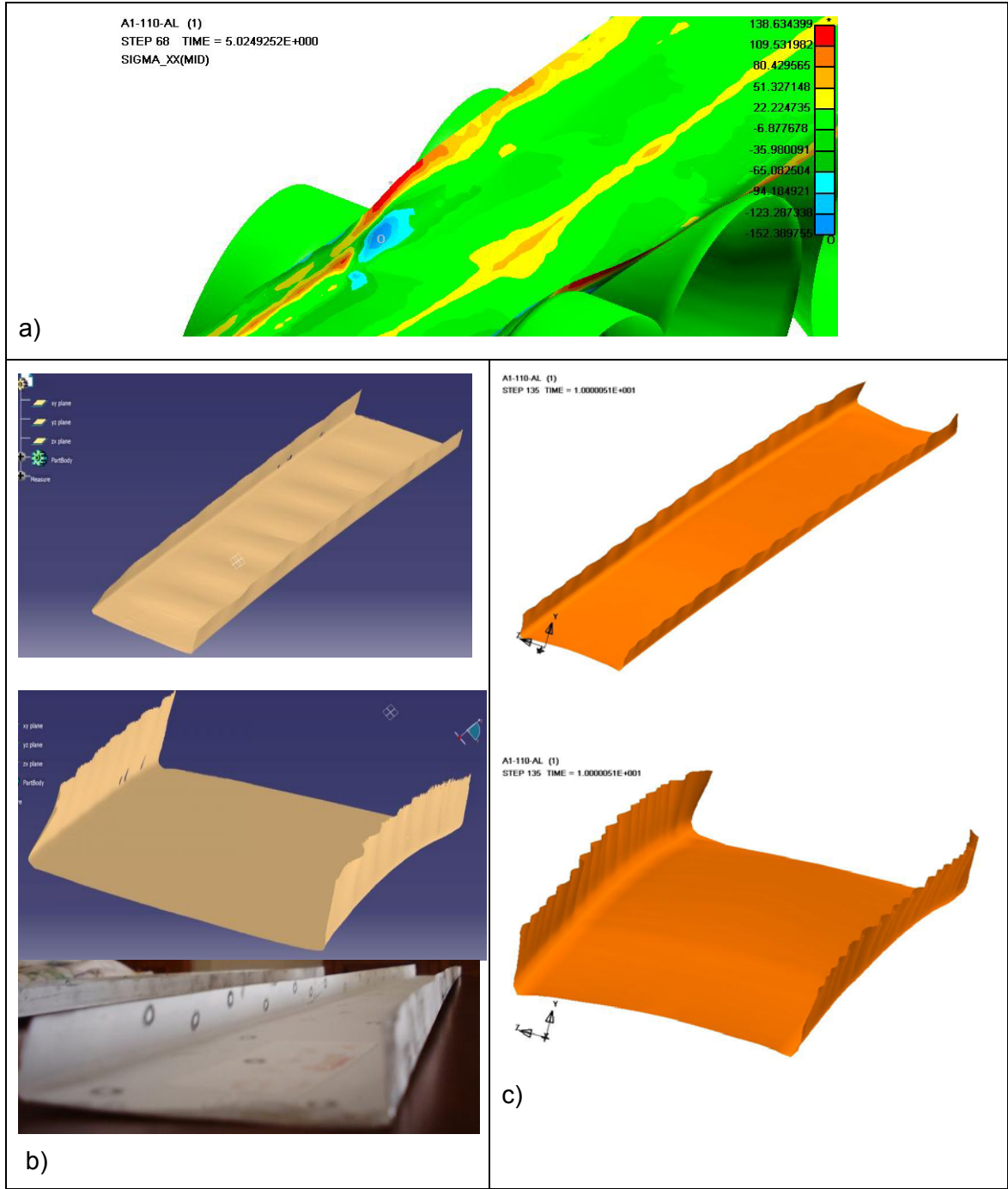
Modeldeki hassasiyet kaynaklarından bir diğeri de programın hesapladığı birim ilerleme zamanının üzerinde ilerleme adımları kullanılmasıdır. Daha kısa sürede sonuç alınması için modelin ilerleme adımları deneme yanılma suretiyle mümkün olduğu kadar büyük alınmasına çalışılmıştır.

Yukarıda özetlenen nedenlerle modeldeki hassasiyetin sonucu olarak makaraların dönüş hızındaki küçük değişimlerin sonuçlar üzerindeki etkisi bazı kombinasyonlarda büyük olabilmektedir.

İkinci aşama SEA çalışmalarında elde edilen sonuçlara geçtiğimizde ise deneysel sonuçlarla kıyaslandığında alüminyum malzemeye göre, sünek çelik kullanılan kombinasyonlarda, şekil bozukluğunun daha fazla olmasıdır. Simülasyonlarla, SEA modeli için elde edilen sonuçlar deneylerde elde edilen sonuçlardan yüksek olmakla birlikte aralarında yüksek bir korelasyon bulunmaktadır.

Deney sonuçlarının incelenme tekniğine paralel olarak, SEA çalışmasında elde edilen kenar dalgalanmalarının da L8 tam eşleştirmeli deney yöntemi ile incelemesi yapılmıştır. Tablo 5.8'de SEA inceleme sonuçları listelenmiştir. Kenar dalgalarının deneysel yöntem ile aynı şekilde ortalamaları alınmıştır. Burada deney sonuçları ile en belirgin fark SEA sonuçlarında elde edilen dalgalanmanın adetlerinin de yüksek çıkmasıdır. Bu da yukarıda vurgulanan temas algoritmalarının ve özellikle kabuk elemanların basma yönündeki kuvvetlere maruz kaldıklarında ilave olarak oluşan şekil bozukluklarının etkili olduğu değerlendirilmektedir. Ek-A'da görsel ve sayısal SEA sonuçları ile ilgili 4. ve 5. makara setleri arasındaki boylamasına yöndeki gerilme ve gerilme sonuçları sunulmaktadır. Ek-A'da sunulan örnek sonuçlardan bir tanesi de aşağıda Şekil 5.9 olarak sunulmuştur.

Elde edilen SEA sonuçları ilk olarak Tablo 5.8'de listelenip ortalamalar alındıktan sonra sonuçlar sırasıyla Tablo 5.9'a yerleştirilmiş ve NOG çizdirilmiştir. Sonrasında ise etki değerleri elde edilmiştir.



SIRA NO	Yapılan deneylerin sırası		Deney Gözlem Değeri	SEA Gözlem (PLP) Değeri
1	A1-B1-C1	d5	1,361	1,38

Şekil 5.9: A1-B1-C1 sonuçları, a) SEA sonuçları örneği x-yönünde gerilme, b) 3-B tarama ve gerçek resimleri, c) SEA sonuçları örneği – kenar yüzeyde dalgalanma.

Tablo 5.8: SEA sonuçları inceleme tablosu

	d5-t1 = no1		d6-t1 = no2		d8-t1 = no3		d7-t1 = no4		d3-t1 = no5		d2-t1 = no6		d1-t1 = no7		d4-t1 = no8	
	d5-t1		d6-t1		d8-t1		d7-t1		d3-t1		d2-t1		d1-t1		d4-t1	
Nokta-1	42,10		39,91		38,46		38,81		43,71		43,62		38,23		38,92	
Nokta-2	40,44	1,66	39,89	0,02	40,12	1,66	38,85	0,04	41,22	2,49	40,83	2,78	40,36	2,12	39,73	0,81
Nokta-3	41,71	1,27	39,91	0,02	38,84	1,28	38,70	0,15	43,76	2,54	42,51	1,67	38,46	1,89	38,87	0,86
Nokta-4	40,62	1,09	38,83	1,09	38,86	0,02	38,79	0,09	41,33	2,43	40,69	1,81	38,76	0,30	38,96	0,09
Nokta-5	42,10	1,48	40,84	2,01	38,86	0,20	38,78	0,01	43,30	1,97	43,30	2,81	38,69	0,07	38,76	0,21
Nokta-6	40,48	1,62	38,65	2,19	39,03	0,37	38,85	0,07	40,41	2,89	40,22	3,08	39,02	0,33	40,47	1,71
Nokta-7	42,45	1,97	38,76	0,11	38,88	0,15	38,84	0,01	43,70	3,29	42,45	2,24	38,33	0,69	38,26	2,21
Nokta-8	40,45	2,00	38,71	0,06	39,71	0,83	39,55	0,71	40,92	2,77	40,97	1,48	40,06	1,72	40,20	1,95
Nokta-9	40,47	0,02	40,30	1,59	38,74	0,97	39,14	0,41	43,13	2,21	42,73	1,76	38,69	1,36	38,50	1,70
Nokta-10	40,45	0,03	38,70	1,60	39,82	1,08	39,16	0,02	40,95	2,18	40,62	2,10	38,70	0,01	38,88	0,17
Nokta-11	42,16	1,72	40,72	2,02	39,15	0,67	38,88	0,48	42,95	2,00	42,75	2,12	37,90	0,80	37,99	0,89
Nokta-12	40,32	1,84	39,15	1,58	39,22	0,07	38,70	0,02	40,71	2,24	40,76	1,98	39,64	1,74	39,29	1,31
Nokta-13	40,97	0,65	40,48	1,34	38,94	0,28	38,67	0,04	42,95	2,24	42,98	2,22	37,71	1,93	39,29	0,01
Nokta-14	39,77	1,20	39,53	0,96	39,18	0,24	39,74	1,07	40,30	2,65	39,95	3,03	38,70	0,98	39,53	0,24
Nokta-15	41,64	1,87	39,78	0,25	38,89	0,49	38,45	1,29	42,36	2,06	43,30	3,34	37,16	1,54	38,41	1,12
Nokta-16	39,32	2,31	39,46	0,32	38,93	0,24	39,83	1,37	40,33	2,03	39,64	3,65	38,98	1,83	38,72	0,31
Nokta-17	41,32	2,00	39,70	0,24	38,84	0,09	38,46	1,36	42,67	2,34	39,70	0,06	37,31	1,67	38,23	0,49
Nokta-18	38,21	3,11	39,62	0,08	39,74	0,89	39,55	1,09	39,09	3,58	39,53	0,17	37,43	0,12	40,05	1,82
Nokta-19	39,96	1,75	40,61	0,99	38,65	1,08	38,61	0,94	41,37	2,27	42,51	2,97	37,17	0,26	38,22	1,83
Nokta-20	38,31	1,65	39,27	1,34	38,82	0,16	38,61	0,00	37,66	3,71	38,37	4,14	37,27	0,09	38,31	0,10
Nokta-21	38,43	0,12	39,52	0,25	38,75	0,07	38,50	0,12	39,74	2,08	38,47	0,10	36,80	0,46	38,24	0,07
Nokta-22	38,30	0,13	39,38	0,13	38,83	0,08	39,46	0,96	38,20	1,54	37,83	0,64	39,33	2,53	39,98	1,73
Nokta-23	40,01	1,71	40,86	1,47	38,71	0,12	38,11	1,35	40,53	2,33	38,51	1,67	37,46	1,87	37,66	2,31
Nokta-24	38,53	1,48	39,17	1,68	38,54	0,16	38,17	0,06	38,56	1,97	38,73	0,77	38,20	0,74	40,17	2,50
Nokta-25	39,90	1,37	39,61	0,44	39,16	0,62	38,16	0,01	40,28	1,72	40,57	1,84	37,18	1,02	37,46	2,71
Nokta-26	38,83	1,07	38,85	0,75	38,40	0,76	39,37	1,21	39,38	0,90	38,54	2,03	39,72	2,54	37,51	0,05
Nokta-27	39,79	0,96	39,00	0,15	39,03	0,63	37,84	1,54	41,00	1,62	38,61	0,07	37,23	2,49	37,44	0,08
Nokta-28	39,20	0,59	38,89	0,11	38,92	0,11	38,86	1,02	38,80	2,20	38,32	0,29	39,28	2,05	39,32	1,88
Nokta-29	40,38	1,18	38,91	0,02	38,95	0,03	38,46	0,41	41,19	2,39	41,52	3,20	37,72	1,56	37,58	1,74
Nokta-30	39,44	0,94	38,88	0,03	38,10	0,85	39,03	0,58			38,81	2,71	37,89	0,17	37,67	0,09
Nokta-31	40,70	1,26	39,01	0,13	39,81	1,71	38,21	0,83			38,84	0,04	37,71	0,17	37,10	0,57
Nokta-32			38,96	0,05	37,79	2,02	38,25	0,04			38,84	0,01	37,74	0,03	39,01	1,92
Nokta-33			40,42	1,46	39,73	1,94	38,19	0,05			41,09	2,26	37,60	0,14	37,35	1,66
Nokta-34			38,58	1,83	37,86	1,86	38,34	0,15			41,00	0,10	37,76	0,16	38,43	1,08
Nokta-35			41,17	2,59	37,93	0,07	38,28	0,06			41,00	0,01	37,62	0,15	37,39	1,04
Nokta-36			39,41	1,76	37,84	0,10	39,30	1,02					37,95	0,34	38,17	0,78
Nokta-37			41,34	1,93	39,73	1,90	37,82	1,48					37,90	0,06	37,61	0,56
Nokta-38					37,93	1,80	37,82	0,00					38,38	0,49	37,79	0,18
Nokta-39					38,11	0,18	37,71	0,11					37,48	0,90	37,43	0,36
Nokta-40					37,96	0,15	39,18	1,46					38,86	1,38	38,20	0,77
Nokta-41					38,13	0,18	37,32	1,86					38,32	0,54	37,82	0,37
Nokta-42					37,96	0,17	38,50	1,19					38,32	0,00	37,85	0,03
Nokta-43					38,11	0,15	37,57	0,94					38,31	0,02	37,65	0,20
Nokta-44					38,06	0,05	38,47	0,90					38,57	0,27	37,86	0,21
Nokta-45					38,46	0,39	37,91	0,56					38,44	0,13	37,83	0,02
Nokta-46					38,07	0,39	37,91	0,01					39,19	0,75	37,94	0,11
Nokta-47					38,24	0,18	37,70	0,22					39,15	0,04	37,90	0,05
Nokta-48					37,98	0,27	38,70	1,00					39,38	0,23	39,12	1,22
Nokta-49					37,94	0,03	37,81	0,88					39,20	0,18	38,42	0,70
Nokta-50					38,36	0,42	39,28	1,47							39,36	0,94
Nokta-51					38,24	0,12	38,46	0,80							39,09	0,28
Nokta-52					38,57	0,33	39,91	1,43							39,43	0,35
Nokta-53					38,51	0,06	39,80	0,11							39,39	0,04
Nokta-54					38,55	0,03	39,96	0,16							40,25	0,86
Nokta-55					38,27	0,27	39,49	0,47							40,08	0,17
Nokta-56					39,32	1,05	39,51	0,01								
Nokta-57							39,43	0,08								
Nokta-58																
	ORT.	1,3354	ORT.	0,9061	ORT.	0,5464	ORT.	0,6022	ORT.	2,3084	ORT.	1,7342	ORT.	0,851	ORT.	0,8381
Dalga	Adedi	30		36		55		56		28		34		48		54
Maximum	Dalga	3,1093		2,5882		2,0208		1,8998		3,707		4,1413		2,5378		2,7071
Minimum	Dalga	0,0236		0,02		0,02		0,0006		0,9024		0,0062		0,0022		0,006

Tablo 5.9 Kenar dalgalanmaları ile ilgili SEA sonuçlarının L8 inceleme tablosu içine yerleştirilmesi

Sıra	Gözlem Degeri:	A		B		C		AB		AC		BC		ABC	
		A1	A2	B1	B2	C1	C2	AB1	AB2	AC1	AC2	BC1	BC2	ABC1	ABC2
1	1,335	1,335		1,335		1,335		1,335		1,335		1,335		1,335	
2	0,905	0,905		0,905		0,905		0,905		0,905		0,905		0,905	
3	0,545	0,545		0,545	0,545	0,545		0,545		0,545		0,545		0,545	
4	0,602	0,602		0,602	0,602	0,602		0,602		0,602		0,602		0,602	
5	2,308		2,308	2,308		2,308		2,308		2,308		2,308		2,308	
6	1,734		1,734	1,734		1,734		1,734		1,734		1,734		1,734	
7	0,851		0,851	0,851		0,851		0,851		0,851		0,851		0,851	
8	0,838		0,838	0,838		0,838		0,838		0,838		0,838		0,838	
TOPLAM	9,120	3,388	5,732	6,283	2,837	5,040	4,079	5,190	3,930	4,667	4,453	4,036	5,084	4,523	4,597
SAYI	8	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
ORTALAMA	1,140	0,847	1,433	1,571	0,709	1,260	1,020	1,298	0,982	1,167	1,113	1,009	1,271	1,131	1,149
ETKI		0,586		-0,862		-0,240		-0,315		-0,053		0,262		0,019	
SIRA		7		1		3		2		4		6		5	

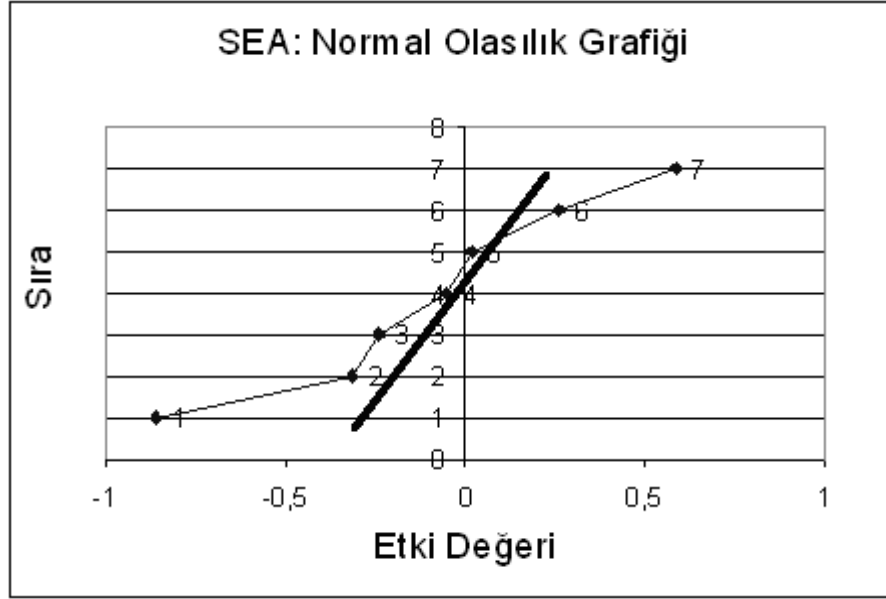
Tablo 5.10'da kullanılan yazılımın tanımladığı iki farklı malzeme tipi (Mat_Powerlaw_Plasticity ile Mat_Piecewise_Linear_Plasticity) ile yapılan SEA sonuçları listelenmiştir. Deney sonuçları ile Mat_Powerlaw_Plasticity malzeme modeli kullanılmış SEA analizi sonuçları arasında korelasyon değeri 0,97 olarak hesaplanmıştır. Deney sonuçları ile Mat_Piecewise_Linear_Plasticity malzeme modeli ile yapılan SEA analizi sonuçları arasında korelasyon değeri 0,89 olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak her iki korelasyon değeri de çok yüksek bulunmuş ve SEA sonuçları ile deney sonuçları arasında yüksek bir korelasyon olduğu değerlendirilmiştir.

Tablo 5.10: Deney ve SEA sonuçları inceleme tablosu

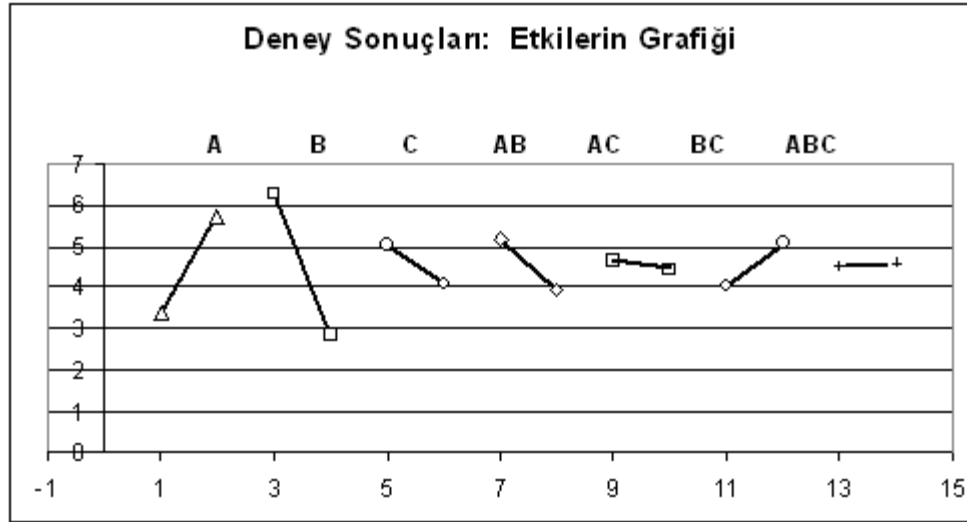
SIRA NO	Yapılan deneylerin sırası			Deney Gözlem Değeri (mm)	SEA Gözlem Değeri (mm) Power Law	SEA Gözlem Değeri (mm) Mat Lin Plast.
1	A1-B1-C1	d5	A1=15-30-45-85	1,361	1,335	1,338
2	A1-B1-C2	d6		0,715	0,905	1,279
3	A1-B2-C1	d8		0,378	0,545	0,855
4	A1-B2-C2	d7		0,290	0,602	0,763
5	A2-B1-C1	d3	A2=15-30-85	1,871	2,308	2,292
6	A2-B1-C2	d2		1,367	1,734	2,182
7	A2-B2-C1	d1		0,680	0,851	0,893
8	A2-B2-C2	d4		0,441	0,838	1,073
A1=15-30-45-85		A2=15-30-85				
B1= 110 mm		B2=100mm				
C1= Alüminyum		C2= Sünek Çelik				

Deney sonuçlarını incelemek için çizdirilen NOG ve etkilerin grafikleri ise aşağıda Şekil 5.10 olarak sunulmaktadır. Deney ve SEA modeli etki grafiklerini karşılaştırdığımızda kenar yüksekliğinin etkisi aynı şekilde görülmektedir. Bunun yanı sıra makara kombinasyonunun etkisi malzeme etkisine kıyasla daha çok olarak görülmektedir. Bunun SEA modelinin daha yüksek açılı farklarında temas problemleri yüzünden ekstra etkileri olarak da değerlendirilebilir.

Diğer etkileşimler ve etkiler ise deney sonuçları ile benzer şekilde elde edilmiştir. Aşağıda sırayla etkileşimler sunulmaktadır.



a)



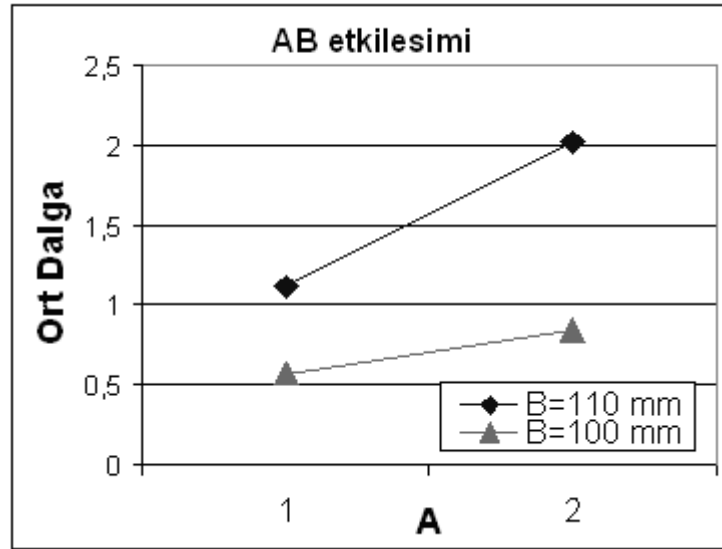
b)

Şekil 5.10: SEA sonuçları L8 analizi, a) Normal olasılık grafiği, b) Tüm etkilerin grafiği

Tablo 5.11 ve Şekil 5.11’de SEA modeli ile elde edilen AB etkileşimi görülmektedir. Deney sonuçlarına karşılık gelen AB etkileşiminden biraz daha kuvvetli bir etkileşimden söz etmek mümkündür. Makara dizilişinin 1. kombinasyonunda (0° - 15° - 30° - 45° - 85°) kenar yüksekliğinin etkisinin SEA modelinde daha da azaldığı görülmektedir. Bu etkinin bir kısmı SEA modelindeki makara setlerinin eleman sayısının artırılması ile daha deneysel etkiye yaklaşabileceği değerlendirilmektedir.

Tablo 5.11: AB etkileşimi için deney sonuçları inceleme tablosu

AB etkileşimi		B	
		1	2
A	1	1.335, 0.905	0.545, 0.602
	ortalama	1,120	0,574
	2	2.308, 1.734	0.851, 0.838
	ortalama	2,021	0,845

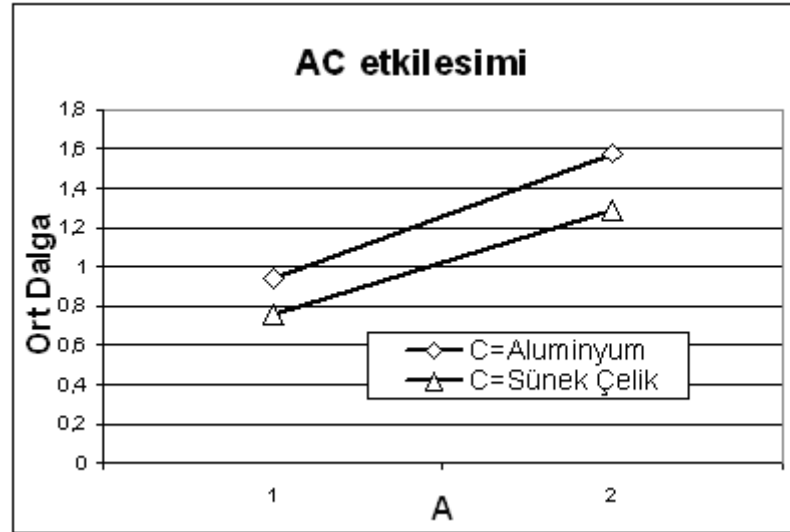


Şekil 5.11: SEA sonuçları L8 analizi : AB etkileşimi grafiği

Tablo 5.12 ve Şekil 5.12’de SEA modeli ile elde edilen AC etkileşimi görülmektedir. Deney sonuçlarına karşılık gelen AC etkileşimi ile aynı davranış elde edilmiştir ve SEA modelinde de A (makara dizilişi) ve C (malzeme cinsi) değişkenleri arasında bir etkileşimden söz edilememektedir.

Tablo 5.12: AC etkileşimi için deney sonuçları inceleme tablosu

AC etkileşimi		C	
		1	2
A	1	1.335, 0.545	0.905, 0.602
	ortalama	0,940	0,754
	2	2.308, 0.851	1.734, 0.838
	ortalama	1,580	1,286

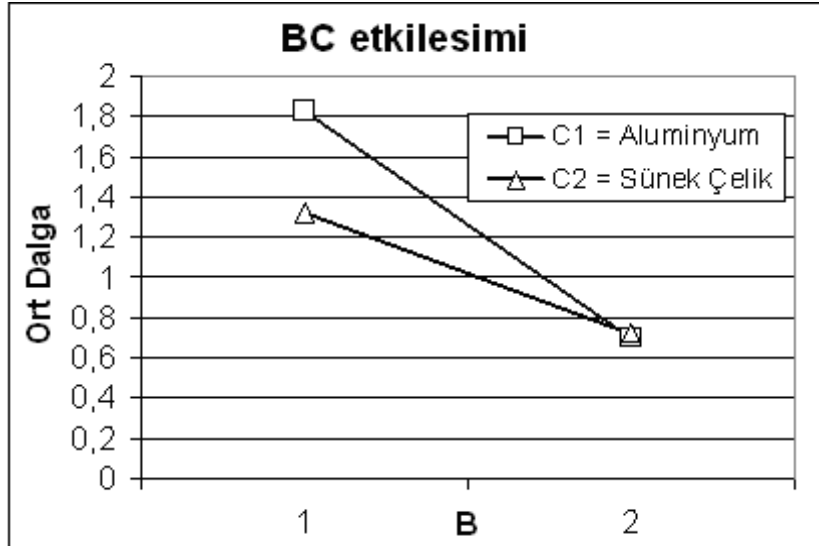


Şekil 5.12: SEA sonuçları L8 analizi : AC etkileşimi grafiği

Tablo 5.13 ve Şekil 5.13'te SEA modeli ile elde edilen BC etkileşimi görülmektedir. Deney sonuçlarına karşılık gelen BC etkileşimi ile aynı şekilde B2 (12 mm) kısa kenar ile malzeme etkisi (C) azaltılmaktadır. Burada kenar dalgalanmalarının azalma oranında SEA modelinin daha fazla hesaplamasından dolayı etki daha az görülmektedir. Ancak bu önemli etkileşimi göstermesi bakımından SEA modeli yine başarılı değerlendirilmektedir.

Tablo 5.13: BC etkileşimi için deney sonuçları inceleme tablosu

BC etkileşimi		C	
		1	2
B	1	1.3335, 2.308	0.905, 1.734
	ortalama	1,822	1,320
	2	0.545, 0.851	0.602, 0.838
	ortalama	0,698	0,720



Şekil 5.13: SEA sonuçları L8 analizi: BC etkileşimi grafiği

Son olarak düşey yönde elde edilen eğimler Tablo 5.14'te sunulmaktadır. SEA analizi ile elde edilen eğimler en sağda listelenmiştir.

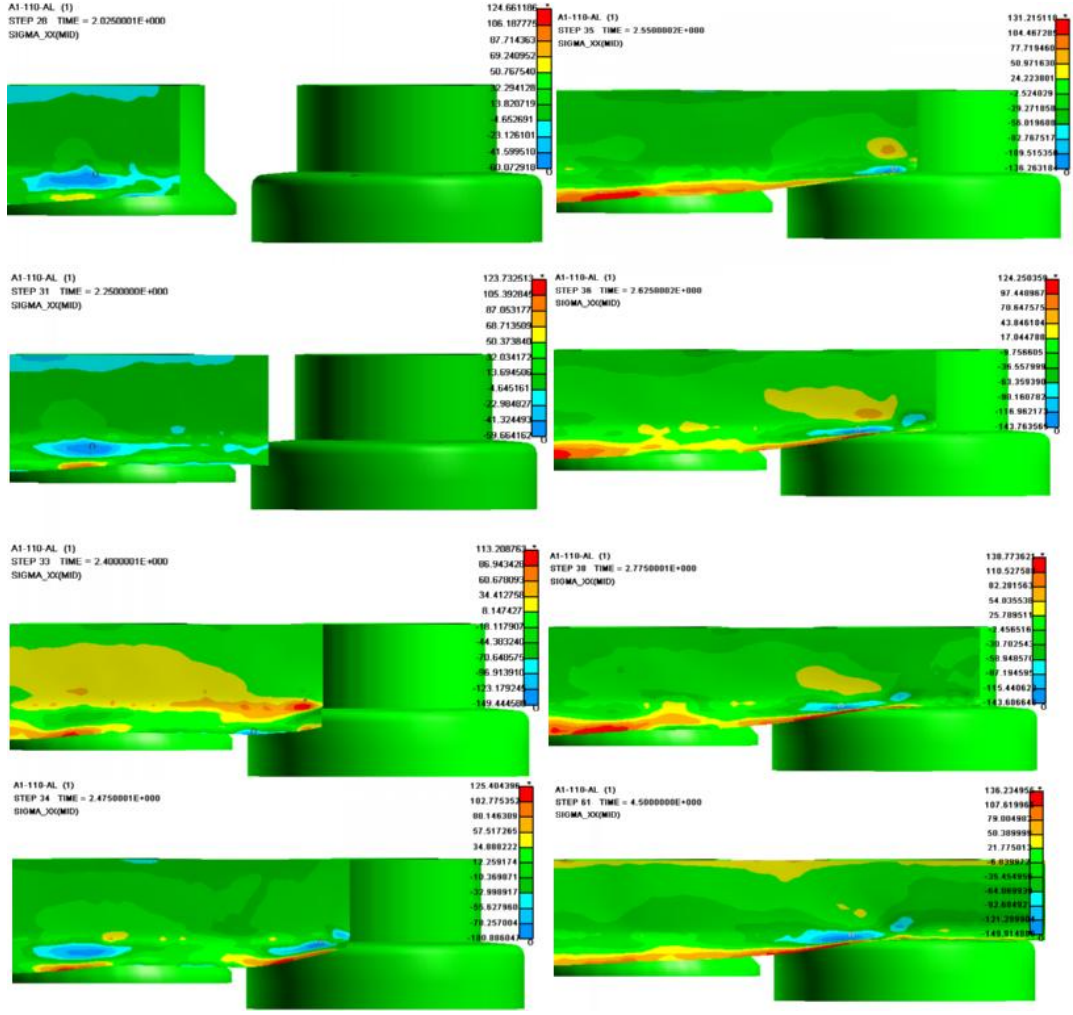
Tablo 5.14: Düşey düzlemde eğilme; milimetre cinsinden gözlem değerleri

SIRA NO	Yapılan deneylerin sırası			Deney Gözlem Maksimum Değeri (mm)	SEA Gözlem Maksimum Değeri (mm)
1	A1-B1-C1	d5	A1=15-30-45	3,56	16,19
2	A1-B1-C2	d6		2,51	12,35
3	A1-B2-C1	d8		4,41	14,54
4	A1-B2-C2	d7		5,18	19,22
5	A2-B1-C1	d3	A2=15-30-85	12,26	13,80
6	A2-B1-C2	d2		11,21	13,69
7	A2-B2-C1	d1		10,57	21,87
8	A2-B2-C2	d4		14,94	24,89
A1=15-30-45-85				A2=15-30-85	
B1= 110 mm				B2=100mm	
C1= Alüminyum				C2= Sünek Çelik	

Deney sonuçları ile SEA sonuçları arasında korelasyon değeri 0,51 olarak elde edilmektedir. Bu sonuç orta korelasyon değeri olarak nitelendirilebilir. SEA modelinde sac malzemenin ilk 210 mm'lik kısmının makara girişlerinde sorun yaşamaması için verilen ilave kısıtlamalar korelasyonun zayıflamasına neden olarak değerlendirilmektedir. Ancak değerlerden de görülebileceği üzere belli bir oranda daha yüksek olarak düşey yönde eğim hesaplanmaktadır. Yine deneysel sonuçlardaki gruplamaya göre bakarsak A1 dizilişi ile elde edilen değerlerin ortalamasının A2 dizilişi ile elde edilen değerlerin toplamından küçük olması Nallapati tarafından aktarılan sonuçları ve deneysel çalışmayı destekler niteliktedir [5].

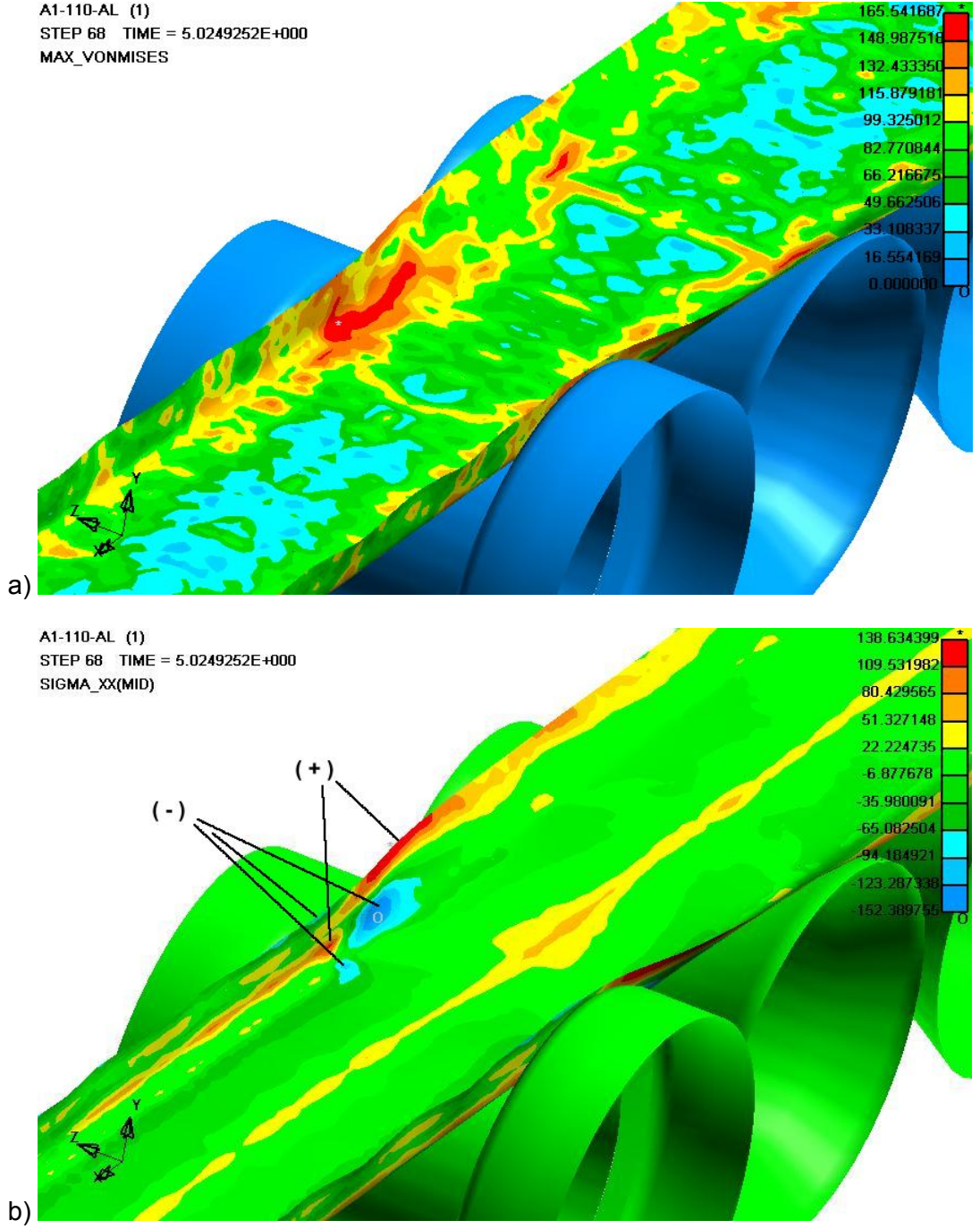
SEA modeli sonuçları olarak elde edilen gerilme dağılımları Şekil 5.14'te son makara setine girişte boylamasına yönde ve Şekil 5.15'te 5. saniyede (model giriş kısmındaki özel kısıtlamalardan kurtulduktan sonra maksimum Von Misses ve boylamasına yönde (x-yönünde) sunulmaktadır. EK-A'da SEA kombinasyonları için diğer gerilme dağılımları sunulmuştur.

Şekil 5.14'te giriş anında değişimlerde simetri ekseninde elastik bükülme de görülmektedir. SEA modelinde, makaradaki eleman sayısının artırılması ile çarpma anında ve sonrasında davranışlar görsel olarak düzgün bir şekilde ilerlemektedir. İlk aşamadaki modelde bu anda büyük şekil değişimleri olmuş ve bazı kombinasyonlar için sonuç vermemiştir.



Şekil 5.14: A1-B1-C1 kombinasyonunda makara girişinde SEA sonuçları örneği boylamasına yönde gerilme değerleri.

Şekil 5.15.b'de ise 5. makara setinden geçmekte olan sac malzemenin boylamasına yönde gerilme dağılımlarında çekme (+) ve basma (-) gerilmeleri işaretlenmiştir. Bhattacharyya ve diğerlerinin yayınlarında ifade edilen daraltılmış (şekil değiştirme uzunluğu) bölge ile paralellik göstermektedir. Ayrıca boylamasına yönde oluşan gerilmelerin yerleri çekme ve basma gerilmeleri olmak üzere aynı karakteristiği diğer kombinasyonlarda da göstermişlerdir. Daha zor şartlar için bu alanlar büyümektedir. EK-A'da bütün kombinasyonlar için 5. saniyedeki boylamasına yöndeki gerilme ve gerinim dağılımları sunulmuştur.

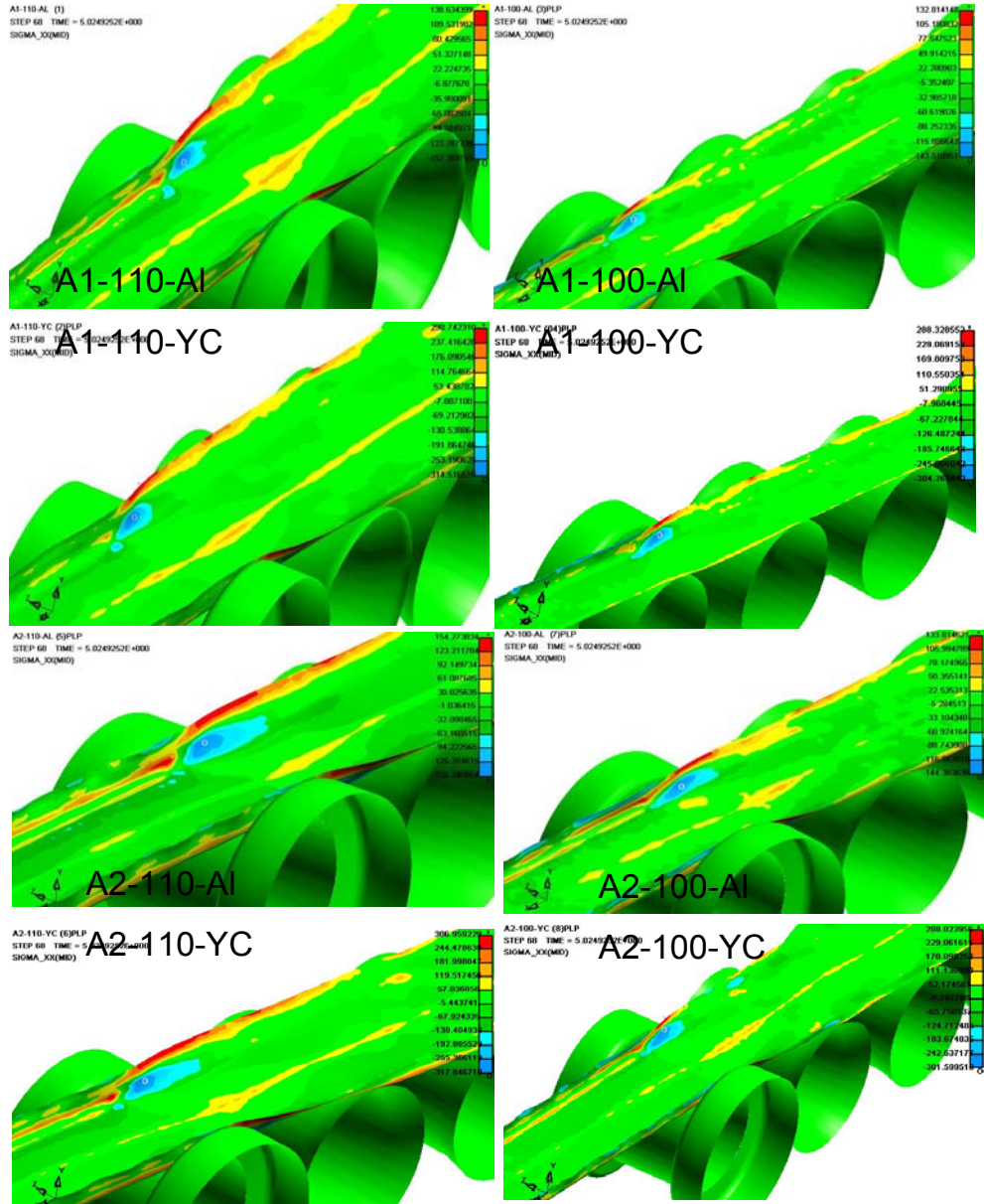


Şekil 5.15: A1-B1-C1 kombinasyonu analizinin 5. saniyesinde 5. makara girişinde SEA sonuçları örneği, a) Maksimum Von Misses gerilme dağılımı, b) Boylamasına yönde gerilme dağılımı

Ayrıca Şekil 5.15.a'da sunulan maksimum Von Misses gerilme dağılımının karakteristiği de diğer kombinasyonlarda aynı şekilde gözlenmiştir. Sonuçları değerlendirirken Şekil 5.15.a'da sunulan maksimum Von Misses gerilmeleri dağılımı en yoğun şekil değişimlerini iki makara arasında kalan alanda ve girişten önce başlayan şekilde işaret etmektedir. Ayrıca kenar bitiminde de oluşan gerilmelerin akma gerilmesini geçtiğini ve kalıcı şekil bozukluğunu işaret etmektedir. Şekil 5.15.b'de boylamasına yönde (x-yönünde) gerilme dağılımı sac üzerinde özellikle basma gerilmeleri açısından sac malzemenin son makaraya girişinden önceki alanda en kalıcı şekil değişimi yaratacak büyüklükte olduklarına işaret etmektedir. Bu davranış bütün kombinasyonlarda gözlenmiştir. Bu alanlardaki etkilerin azalması ile sac malzemenin kenar dalgalanması da azalmaktadır. Dalgalanmanın yüksek hesaplanması ile ilgili olarak basma gerilmelerinin artması ve bunun kritik seviyeyi geçmesi ile kabuk elemanların basma etkisine verdikleri ilave tepkinin neden olduğu düşünülmektedir. Her ne kadar çalışmada hızlı sonuç veren kabuk elemanlar kullanılmış olsa da sac malzeme davranışı için tuğla elemanlarla daha iyi sonuç alınacağı düşünülmektedir.

Deneysel çalışma sonuçları geometrik olarak ölçüm yapılarak değerlendirileceğinden, deneysel çalışmada makara dizilişlerinde yapılan ön testlere göre istenilen şekil değişimini veren bir ayarlama olarak son makarada A1 dizilişinde 40° ve A2 dizilişinde 55° düzeyinde bir artış verilmiştir. Bhattacharyya ve Smith veya Ona ve Jimma gibi araştırmacıların bildirdikleri dizilişlerde de genelde u-kesitli bir profil için 30° civarında bir açı dizilişi (25° - 55° - 85° - 90° gibi) yüzeyde gözle görülen bozuklukların olmaması için önerilmektedir. Bhattacharyya ve Smith'in yayınlarında bahsettikleri 0° - 45° - 85° - 90° gibi bir diziliş ve kalınlıkta sac malzeme kullanarak da varolan test düzeneği ile hatalı sonuçların elde edileceği düşünülmektedir. Buna neden olarak 0° - 45° arasında kenar yüzeylerde kalıcı şekil değişimleri ve pekleşme olduktan sonra ilave olarak 40° lik bir artış ile şekil bozukluklarının daha da belirgin hale geleceği değerlendirilmektedir [7, 35].

Bhattacharyya ve diğerlerinin 1984 tarihli çalışmalarında "şekil değiştirme uzunluğu" hesabında önemli parametrelerin açı farkı, malzeme kalınlığı ve kenar yüksekliği olduğundan ve malzeme mekanik özelliklerinin etkisi olmadığından bahsetmişlerdir. Elde edilen sonuçlarda (Şekil 5.16), bahsedilen şekil değiştirme uzunluğunun, malzeme mekanik özelliklerinden etkilenmeksizin olduğu SEA sonuçlarında gözlenmektedir. Ancak, elde edilen deneysel ve SEA sonuçları itibarıyla makaralı bükme işleminde şekil bozukluklarının hesaplanmasında malzeme mekanik özelliklerinin de hesaba katılması gereken önemli bir parametre olduğu değerlendirilmektedir [7].



Şekil 5.16: Bhattacharyya ve diğerleri tarafından bahsedilen şekil değiştirme uzunluğu SEA sonuçlarında 8 kombinasyon için gözlenen alanları [7]

Tehrani ve diğerlerinin 2006 tarihli çalışmasında, 3 makara setinin kullanıldığı, ancak çalışma sonuçları olarak bildirilen girişte gösterilen burkulma sorunu ve kenar yüzeyde kalan dalgalı bölge dışında geometrik deformasyon olmayan sonuçların resimleri sunulmuştur. Deneylerinde sac malzemeyi ilerletebilmek için ilk önce alt makaraların yukarı hareketi ile bükme yapılmakta sonra ise sac malzeme makara hareketi ile ilerletilmektedir. Bu modellemenin bükme ve sonrasında ilerletme nedeni ile makara girişindeki etkileri gözlemede yetersiz olduğu düşünülmektedir. Yazarlar deneysel veri olmadığı için konu hakkında kenar dalgalanması olabileceğinden bahsetmişlerdir; ancak bu konuda herhangi bir değer sunmamışlardır [24].

Aşağıda daha detaylı olarak incelenen SEA sonuçlarından, bükülen kenar ucunda bulunan ilk 100 eleman üzerindeki iç enerjilerin (elastik-plastik deformasyon enerjilerinin) gerinme ve gerilme değerlerinin incelenmesi suretiyle deneysel olarak elde edilen sonuçlarla kıyaslandığında kenar dalgalarının konumlarının, yüksekliklerinin ve sıklıklarının bu çalışmadaki sonuçlarla tahmin edilemeyeceği sonucuna varılmıştır.

SEA sonuçlarında 30° veya 45° dereceden 85° 'ye geçişte enerji seviyesinde aşağıda Tablo 5.15'te listelenen yaklaşık %100 - 400 oranlarında, artışlar elde edilmiştir. 7 ve 8 numaralı SEA kombinasyonlarında gözlenen aşırı artış ise yazılım veya modellemeden kaynaklanan sayısal hata (outlier) olarak değerlendirilmiştir. Şekil 5.17'de A1-110-AI ve Şekil 5.18'de A2-110-AI kombinasyonları için elemanlar üzerinde iç enerjinin oluşumu ve alttaki grafiklerde kenar ucunun son aşamadaki geometrik durumu sunulmuştur. Tablo 5.15'te sunulan bükülen kenar ucundaki elemanlar üzerindeki ortalama iç enerji seviyelerindeki artış ile beraber standard sapma değerlerinde de %50 - 150 arasında artış gözlenmektedir. Her kombinasyon ile elde edilen iç enerji (300 mm'lik giriş kısmına karşılık gelen ilk 100 eleman dikkate alınarak) toplam konuma bağlı ve belli bir zaman adımıyla elemanlar üzerinde elde edilen grafikleri EK-A'da sunulmaktadır.

Sonuçlar göz önüne alındığında hesaplanan iç enerjinin gerek ortalama gerekse standard sapma değerlerine bağlı olarak kenar dalgalanmasının şiddeti ve sıklığı hakkında tutarlı bir hükme varmak mümkün olmamıştır. Ancak belirgin kenar dalgalanması görülen hallerde kenar dalgalanmasının genliğinin (şiddeti) artan iç enerjiye paralel olarak arttığı gözlenmiştir. Ortalama iç enerji hesabının göreceli olarak çok daha yüksek çıktığı düşük kenar dalgalanma kusuru bulunan kısa kenarlı profillerdeki durum ise kenardaki yüksek basma artık gerilmelerine bağlanabilir, çünkü kenar dalgalanması gerçekleştiğinde bu artık gerilmeler çok daha düşük seviyelere inmektedir.

Kenar bölgesinde 300 mm uzunluğundaki 100 elemanlık dizinin makaralı bükme işlemi boyunca toplam iç enerjilerindeki değişim göz önüne alındığında 30° 'lik bükme açısı olan istasyondan 85° 'lik istasyona birden bükme ile arada 45° istasyondan geçerek bükme arasında %25'lik önemli bir fark doğmaktadır. Şöyle ki alüminyum malzemede iç enerjide 30° - 45° - 85° dizisindeki fark 200 MPa iken, 30° - 85° dizisindeki fark 250 MPa'dır. Bu arada ortalama ölçülen dalgalanma 1,36'dan 1,87 mm'ye ve ortalama hesaplanan dalgalanma 1,34'den, 2,31 mm'ye çıkmaktadır.

Aynı duruma çelik sac işlemede de rastlanmaktadır. Buna bağlı olarak malzemenin iç enerjisindeki değişim ile kenar dalgalanması arasında birebir ilişki olduğu ifade edilebilir. Ancak dalgalanma olgusunun temelinde yatan, aksenal germe, makara önünde ve içinde aksenal basma, enerji doyumu, kararsızlık (instability), bifurkasyon (bifurcation) ve burkulma ile doğrudan ilişkilendirmek eldeki bilgilerle mümkün değildir. Aksenal yöndeki geriminin aldığı en büyük değer ve daha sonra yaşadığı düşüş de başlı başına büyük önem taşımaktadır.

Sac parçanın bükülen kenar ucundaki ilk 100 elemanın ilerleme yönünde belirli bir konumdan geçerken elemanlar üzerinde oluşan ortalama gerinim değerlerinin grafiği Şekil 5.19'da A1-110-AI ve A1-110-YC kombinasyonları için sunulmuştur. Makara alt ve üst makaraların arasından geçiş esnasında gerinim basma yönünde oluşan kuvvetler neticesinde hızla düşmekte ve makara çıkışında ise artık gerinim değerleri bırakarak çıkmaktadır. Diğer kombinasyonlar için sonuçlar EK-A'da sunulmuştur. Tehrani ve diğerlerinin çalışmalarında bahsettikleri ilerleme yönünde (yerel) gerinim değerlerinin ani düşüşünün (çalışmalarında bu rakam 3 ila 4 kat arasında gösterilmiştir) ve tekrar belirli bir artık gerinim ile malzemenin makara setinden çıkmasının, burkulma eğilimini yansıttığını belirtmektedirler. Tehrani ve diğerlerinin çalışması ile benzer şekilde makara girişlerinde düşüşler gözlenmekle birlikte ortalama değer alınması nedeni ile bu değerler yaklaşık %40-60 arasında kalmıştır. Ayrıca bir diğer gözlem olarak makara çıkışında elemanlar üzerinde kalan gerinim değerleri sünek çelik malzemede alüminyum malzemeye göre %20-60 arasında daha düşük çıkmıştır [24]. Kenar dalgalanması ile işlem boyunca kenar ucunda ortalama gerinim (birim şekil değişimi) karşılaştırıldığında (Şekil 5.19) 15°-30°-85°'lik makara setindeki ortalama aksenal gerinim (ϵ_{xx}) 15°-30°-45°-85° derecelik makara takımına kıyasla yaklaşık % 250 daha fazla olduğu hesaplanmıştır. Tehrani ve diğerlerinin işaret ettiği 85° makara seti önündeki gerinim düşüşü de 30°-85° derecelik makara setinde daha şiddetlidir [24]. Ayrıca 30°'den 85°'ye hızlı geçiş bir önceki adım olan 15°'den 30°'lik bükümü de etkilemektedir. Dalgalanmanın ilk çekirdeklenmesi 30 derecelik istasyon öncesinde başlamaktadır. Bu şekilde ardışık istasyonlar arasında fazla açı vermenin dalgalanmayı artırdığı bir kez daha kanıtlanmıştır.

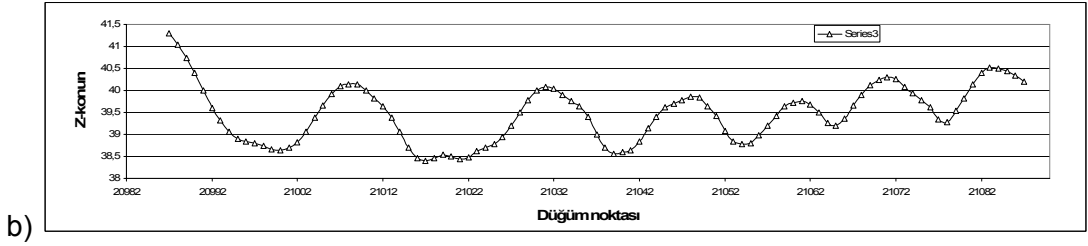
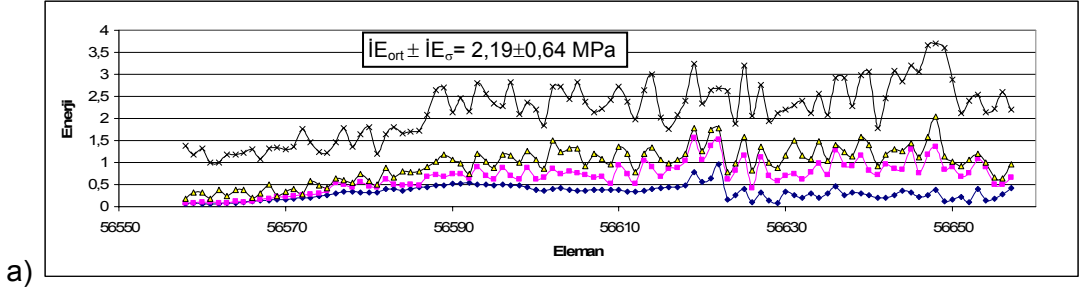
Geri yaylanma sonrası kenar boyunca 300 mm'lik ilk 100 eleman üzerinde oluşan ilerleme yönünde iç ve dış yüzey gerilme değerleri Şekil 5.20'de sunulmuştur. Sonuçlarda tepe noktalarının kenar dalgalanmasının tepe noktaları ile uyumlu olarak dağıldığı gözlenmiştir. Kenar dalgalanmasının daha az olduğu kombinasyonlarda çekme ve basma yönündeki artık gerilmeler daha yüksek gözlenmiş ve ayrıca

Tablo 5.15'te sunulduğu gibi iç enerji değerleri daha yüksek elde edilmiştir. İşlem sonrası artık gerilme dağılımı değerlendirildiğinde orta yüzey artık gerilmelerinin ortalamalarının bası yönünde (-) olduğu görülmektedir. Kenar dalgalanmasının daha az olduğu hallerde ortalama orta yüzey artık gerilmesi (bası yönünde) daha da düşmektedir. Kenar boyunca artık gerilme dalgalanması geometrik değişim ile birebir paralel gerçekleşmektedir.

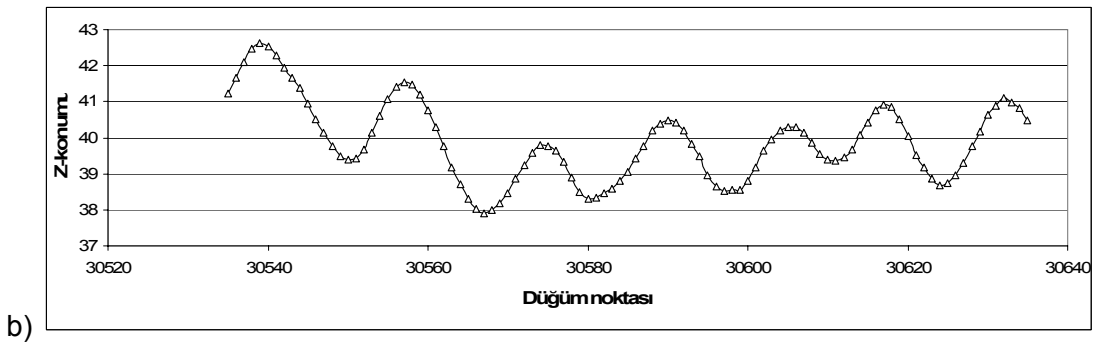
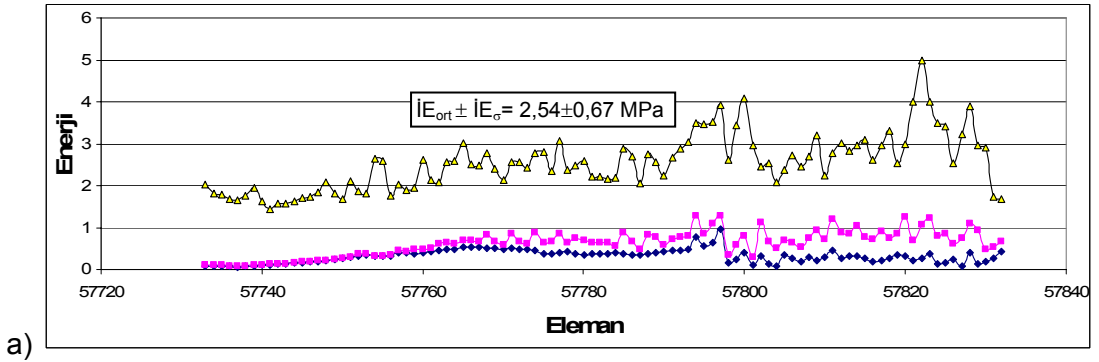
İşlem sonrası elde edilen enerji, gerilme ve gerinim değerleri incelendiğinde, kenar dalgalanmaların değerlendirilmesinde yalnızca iç enerji ile bir hüküm vermenin mümkün olmadığı, gerinim ve artık gerilme değerlerinin de ayrı ayrı etkileri olduğu değerlendirilmiştir.

Tablo 5.15: Bükülen kenar ucu üzerindeki ilk 100 eleman üzerindeki iç enerji ortalama ve standard sapma değerleri ($\bar{İE}_{ort} \pm İE_{\sigma}$) (MPa)

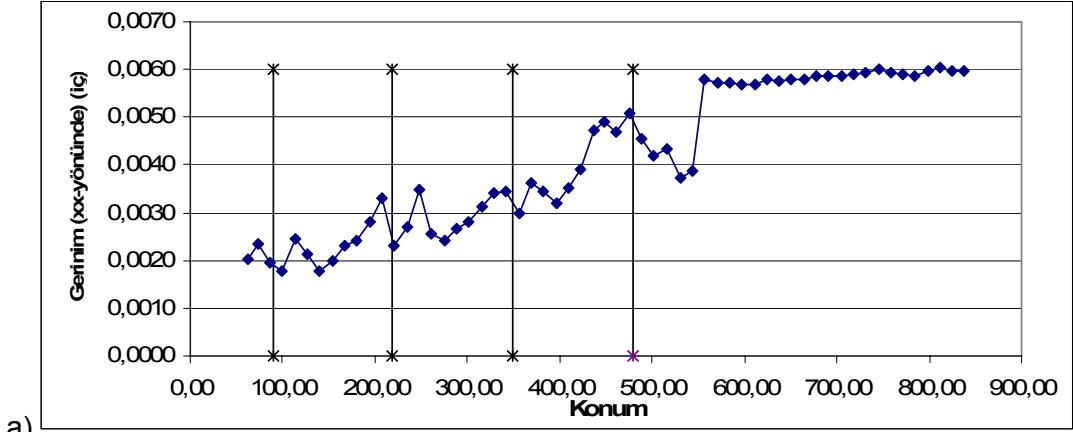
İç Enerji (Elastik-plastik deformasyon enerjisi)				
$\bar{İE}_{ort} \pm İE_{\sigma}$ (MPa)				
Alüminyum	t=0,97 sn	t=1,72 sn	t=2.33 sn	T=10 sn
Deney no 1 (A1-110 mm-AI)	0,32±0,16	0,68±0,33	0,97±0,41	2,19±0,64
Deney no 3 (A1-100 mm-AI)	0,26±0,12	0,88±0,51	1,36±0,61	3,86±0,92
Alüminyum	t=0,97 sn	t=1,57 sn	t=9 sn	
Deney no 5 (A2-110 mm-AI)	0,32±0,16	0,61±0,30	2,54±0,67	
Deney no 7 (A2-100 mm-AI)	0,26±0,12	0,74±0,48	16,97±17,07	
Sünek Çelik	t=0,97 sn	t=1,72 sn	t=2.33 sn	T=10 sn
Deney no 2 (A1-110 mm-YC)	0,16±0,22	0,70±0,60	1,24±0,75	3,40±1,16
Deney no 4 (A1-100 mm-YC)	0,20±0,30	1,27±1,16	2,37±1,37	7,08±1,76
Sünek Çelik	t=0,97 sn	t=1,57 sn	t=9 sn	
Deney no 6 (A2-110 mm-YC)	0,16±0,22	0,62±0,54	3,94±1,36	
Deney no 8 (A2-100 mm-YC)	0,20±0,30	1,01±1,03	16,98±14,82	



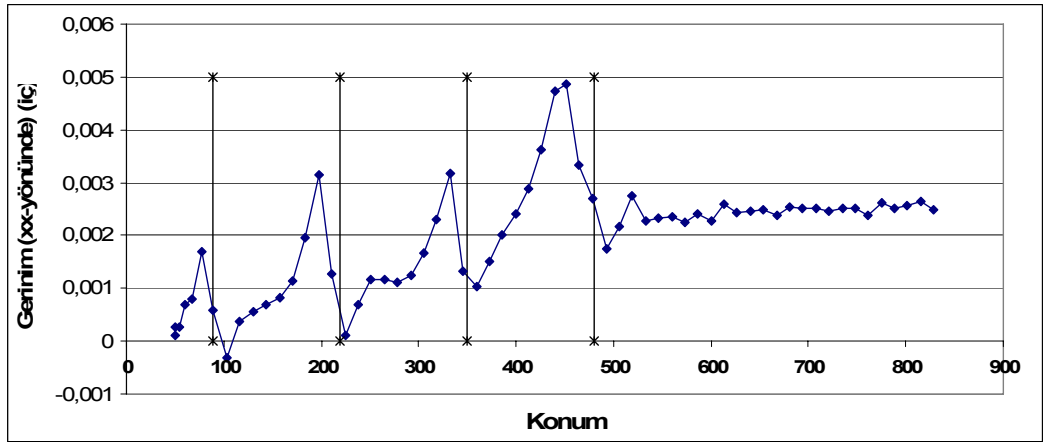
Şekil 5.17: A1-110-Al kombinasyonu için: a) Bükülen kenar üzerindeki ilk 100 eleman üzerinde iç enerji dağılımı (MPa) (sırasıyla en alttan en üste $t=0,97s$, $t=1,72s$, $t=2,33s$, $t=10s$) b) Kenar ucundaki ilk 101 düğüm noktası için z-yönünde konum.



Şekil 5.18: A2-110-Al kombinasyonu için: a) Bükülen kenar üzerindeki ilk 100 eleman üzerinde iç enerji dağılımı (MPa) (sırasıyla en alttan en üste $t=0,97s$, $t=1,57s$, $t=9s$) b) Kenar ucundaki ilk 101 düğüm noktası için z-yönünde konum.

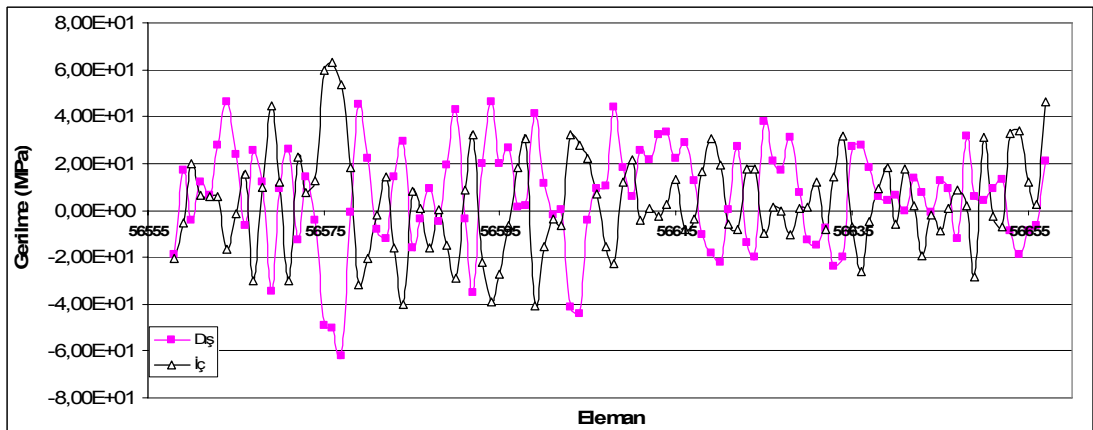


a)



b)

Şekil 5.19: a) A1-110-AI kombinasyonu için, ilerleme yönünde, konuma bağlı ortalama iç yüzey gerinim değerleri (dikey çizgiler soldan sağa 1. ila 4. makara setleri merkez konumlarını simgelemektedir), b) A1-110-YC kombinasyonu için, ilerleme yönünde, konuma bağlı ortalama iç yüzey gerinim değerleri (dikey çizgiler soldan sağa 1. ila 4. makara setleri merkez konumlarını simgelemektedir).



Şekil 5.20: A1-110-AI kombinasyonu için geri yaylanma analizi sonrası kenar yüzey ucundaki ilk 100 eleman üzerinde oluşan iç ve dış yüzey gerilme (xx-yönünde) dağılımı.

Üçüncü aşama olarak yukarıda Alt Madde 5.4'te özetlenen yaklaşım doğrultusunda varolan SEA modelinin değiştirilmeden farklı makara geometrilerine (15° - 30° - 45° - 75° ve 25° - 50° - 70° - 75°) uygulanması ile elde edilebilecek iyileştirmeler araştırılmıştır. Bu aşamadaki çalışmada, kaynaklarda hatasız ürün çıktığı konusunda görüş birliği sağlanan makara açılarının alınması ile, modelleme yaklaşımından oluşan hata payının açık bir şekilde görülmesine ve modelin kalibrasyonuna imkan vermiştir. Üçüncü aşamada elde edilen sonuçlar önceki deneysel ve SEA çalışmaları sonuçları dahil olarak kenar dalgalanmaları için Tablo 5.16'da ve düşey düzlemde eğim için Tablo 5.17'de sunulmaktadır. Söz konusu makara dizilişleri ile ilgili olarak beklentinin hatasız bir ürün olması nedeniyle sunulan şekil bozuklukları modelin hata payı olarak da değerlendirilebilir.

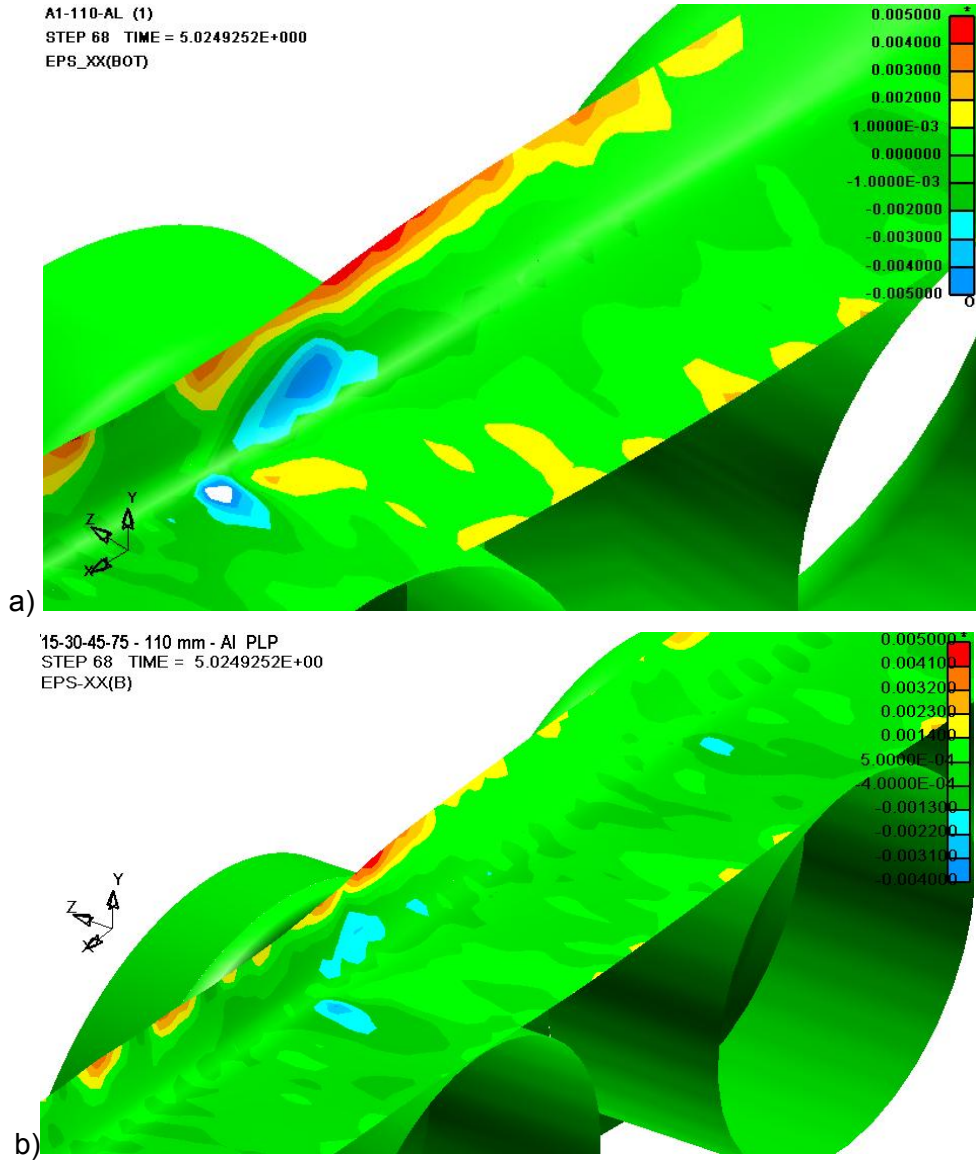
Tablo 5.16: Kenar dalgalanma ortalama yüksekliği ve standard sapma değerleri ($d_{ort} \pm d_{\sigma}$) (milimetre)

Ortalama Kenar Dalga Yüksekliği	DENEY MAKARA DİZİLİŞİ	SEA MAKARA DİZİLİŞİ		
	15-30-45-85	15-30-45-85	15-30-45-75	25-50-70-75
	$d_{ort} \pm d_{\sigma}$ (mm)	$d_{ort} \pm d_{\sigma}$ (mm)	$d_{ort} \pm d_{\sigma}$ (mm)	$d_{ort} \pm d_{\sigma}$ (mm)
Deney no 1 (110 mm - Al)	1,36±0,72	1,34±0,71	0,39±0,32	0,59±0,48
Deney no 2 (110 mm - YC)	0,72±0,22	0,91±0,81	0,34±0,37	0,42±0,30
Deney no 3 (100 mm - Al)	0,38±0,34	0,55±0,60	0,22±0,18	0,25±0,19
Deney no 4 (100 mm - YC)	0,29±0,12	0,60±0,56	0,17±0,16	0,20±0,17

SEA sonuçlarında, A1 (15° - 30° - 45° - 85°) makara dizilişine kıyasla 15° - 30° - 45° - 75° olarak çıkış makarasında 10° 'lik bir azaltmanın yarattığı iyileştirme dikkat çekicidir. Şekil 5.17'de görüldüğü gibi özellikle çekme ve basma yönündeki gerilmelerin azalması ile sonuçlarda iyileşme gözlenmiştir. Özellikle basma yönünde gerilmelerin kabuk elemanların hassasiyetini azaltması açısından sonuçlarda iyileşmeyi artırdığı düşünülmektedir. SEA sonuçlarında bir diğer dikkat çekici sonuç da kısa kenarlı parçada bütün makara dizilişlerinde ve kombinasyonlarda daha sağlıklı sonuç vermesidir. Bunun nedeni eleman boyutunun bükme köşesi için daha uygun olduğu ve ayrıca makara geometrisine göre makara yüzeyiyle daha büyük bir alanda temasta bulunmasıdır. Uzun kenarlı kombinasyonlarda gerek makara setine girişte ve gerekse makaraların arasından geçerken daha büyük deformasyonlar gözlenmiştir.

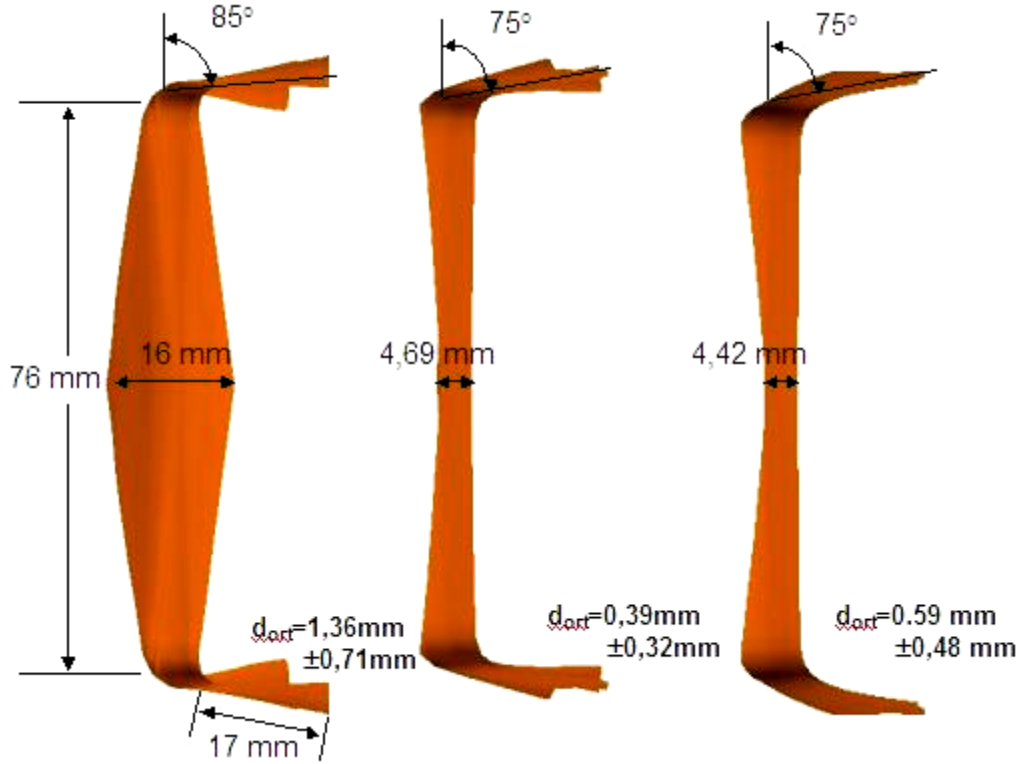
Tablo 5.17: Düşey düzlemde eğilme (milimetre)

Düşey Düzlemde Maksimum Eğilme Değerleri	DENEY MAKARA DİZİLİŞİ	SEA MAKARA DİZİLİŞİ		
	15-30-45-85	15-30-45-85	15-30-45-75	25-50-70-75
	Eğim (mm)	Eğim (mm)	Eğim (mm)	Eğim (mm)
Deney no 1 (110 mm - Al)	3,56	16,19	4,69	4,43
Deney no 2 (110 mm - YC)	2,51	12,35	5,89	8,46
Deney no 3 (100 mm - Al)	4,41	14,54	7,69	4,91
Deney no 4 (100 mm - YC)	5,18	19,22	10,00	5,64



Şekil 5.21: 110 mm sac genişliği ve alüminyum malzeme için sırasıyla 15°-30°-45°-85° ve 15°-30°-45°-75° makara dizilişleri için SEA ile hesaplanan gerinim (alt yüzey) dağılımı iyileşmesi

Şekil 5.18'de SEA sonuçlarındaki A1 (15°-30°-45°-85°) makara dizilişine karşılık diğer dizilişlerdeki (15°-30°-45°-75° ve 15°-30°-45°-75°) iyileşmeler görsel olarak sunulmaktadır. Her iki iyileştirme hesaplamasında kullanılan makara dizilişleri için deneysel çalışmalarda kusur gözlenmediği belirtilmektedir. Dolayısıyla, bu çalışmadaki SEA modelleme yaklaşımı ile elde edilecek sonuçların değerlendirmesinde, eğer iyileştirme hesabındaki dizilişler için elde edilmiş hata oranlarına inilmiş ise, söz konusu yeni tasarımla hatasız bir ürün elde edileceği sonucuna varılabilir.



Şekil 5.22: 110 mm sac genişliği ve alüminyum malzeme için sırasıyla soldan sağa 15°-30°-45°-85°, 15°-30°-45°-75° ve 25°-50°-70°-75° makara dizilişleri için SEA ile hesaplanan profil geometrileri (yz düzlemi)

Sonuçları genel olarak tekrar değerlendirmek gerekirse, makaralı bükme işleminde u-kesitli açık profil için ince sac malzeme ile yapılan deneyler ve sonrasında yapılan SEA incelemeleri,

- ana faktörlerin makara dizilişi, kenar yüksekliği ve malzeme cinsi,
- malzeme cinsinin, makara dizilişi kadar etkili,
- makara dizilişi ve kenar yüksekliği arasında etkileşim, ve
- kenar yüksekliği ile malzeme cinsi arasında etkileşim,

olduğunu deneylerle uyumlu olarak göstermiştir. Bu doğrultuda makaralı bükme tezgah tasarımcısı kontrol edemediği değişkenlerin etkilerini yukarıda c ve d maddelerindeki etkileşimlere dikkat ederek azaltabilir.

Geliştirilen SEA modeli ile her ne kadar kenar dalgalanma hesaplanmasında yüksek değerler elde edilmekteyse de deney sonuçları ile model sonuçları arasındaki korelasyon açısından sonuçlar başarılı bulunmuştur. SEA modeli deneysel çalışma ile aynı davranışları göstermektedir. Özellikle aynı L8 deney yöntemi ile bilgisayarda yapılan deneylerin incelenmesi ile değişik kombinasyonlar sonucunda sac malzeme davranışının büyük benzerlik taşıdığını göstermektedir. Davranış uyumu, elastik burkulma ve düşey yöndeki eğim için deney sonuçları ile elde edilen korelasyon değerlendirildiğinde SEA modelinin aynı anda birden çok kusuru veya işlem esnasında görölen davranışı göstermesi modelin güçlü yanları olarak ortaya çıkmaktadır.

Modellemenin, makaralı bükme işlemi için geliştirilebilecek bir temas algoritması ile ve daha fazla elemanla ve/veya bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler sonucu kabuk eleman yerine tuğla elemanlarla modellenmesi ile, özellikle kenar dalgalanmasının daha doğru hesaplanması açısından, daha sağlıklı sonuçlar alınacağı düşünölmektedir.

Sonuçlar ile ilgili bir başka dikkat çekici son kısım ise Tablo 5.7'de verilen bilgisayar işlemcilerinin kapasitelerinin artması, makaralı bükme işlemi için çok kısa sürede sonuç hesaplayan sağlıklı bir modelleme geliştirme yönünde çalışmaların devam etmesi için en güzel nedenlerden biridir.

6. GENEL VARGILAR VE OLASI ÇALIŞMA KONULARI

6.1 Çalışmanın Özeti

Günümüzde makaralı bükme işlemi ile elde edilen ürünlerden daha dar tolerans değerlerinin ve daha iyi yüzey kalitesinin talep edilmesi ve ihtiyaç duyulan kesitlerin değişkenliğinin giderek artması, makaralı bükme işlemine etki eden değişkenlerin daha detaylı incelenmesine ve yeni deney yaklaşımlarının tatbik edilmesi ile işleme etki eden değişkenlerin ve aralarındaki etkileşimlerinin daha iyi anlaşılmasına ihtiyacı artırmıştır. Etkilerin ve etkileşimlerin dikkate alınması ile daha verimli bir tasarım süreci yaşanarak, üretim öncesinde sorunlar azaltılacaktır. Öte yandan, SEA yazılımlarının daha etkin kullanılması ve deneylerin bilgisayar ortamında daha güvenilir bir şekilde yapılması ile pahalı deney düzenekleri nedeniyle kısıtlı kalmakta olan çalışmalar zenginleşecektir.

Bu çalışmada ince sac malzeme için makaralı bükme işleminde en sık karşılaşılan kusurlardan olan kenar dalgalanma kusurunun incelenmesi ve dinamik açık algoritmalar kullanılarak SEA yöntemi ile analiz ve hesaplanması amaçlanmıştır. Ölçülebilir yüzey bozuklukları elde etmek ve sac malzeme davranışını ve değişkenler arasındaki etkileşimleri daha iyi anlamak için daha önceki çalışmaların aksine kenar dalgalanması yaratacak büyüklükte açılış farkları bulunan makara dizilişleri ile çalışma yapılmıştır.

Bu amaçlar doğrultusunda ilk olarak kenar dalgalanmalarına etkilerinin incelenmesi için seçilen üç ana değişken (faktör); makara dizilişi (A1: 0°-15°-30°-45°-85° ve A2: 0°-15°-30°-85°), kenar yüksekliği (B1: 17 mm ve B2: 12mm) ve malzeme cinsi (C1: Alüminyum (E=64,3 GPa, σ_y =139 MPa) ve C2: Sünek Çelik (E=109,7 GPa, σ_y =301MPa)) iki düzeyli olarak Taguchi yöntemi ile deneysel olarak incelenmiştir.

915 mm uzunluğundaki sac malzemenin, makaraların hareketi ile ittirildiği ve beş adet makara setinden geçerek gerçek işleme yakın olması için mümkün olduğu kadar az kısıtlama kullanılarak, gerçek zamanlı, yeni bir SEA modeli yaklaşımı geliştirilmiştir. Tuğla elemanlara kıyasla dezavantajlarını azaltmak için kabuk elemanların sayısı artırılmış, kalınlık yönünde entegrasyon noktaları 7 adet olarak hesaplatılmış, köşe ve dalga davranışını daha iyi verebilmek için 2 mm x 3 mm veya 2.2 x 3 mm olarak sac malzeme 7625 eleman ile modellenmiştir. Ayrıca elemanlara çarpılma etkisi düzeltilmesi bulunan Belytschko-Wong-Chiang eleman modeli ile uzamalar ve kısılmalarda dikdörtgen plaka yapısının bozularak daha iyi form alabilmesi sağlanmıştır. Deneysel olarak elde edilen sonuçlar referans alınarak, daha önce sunulan çalışmalardan farklı olarak sadece gerinim hesabı yerine malzemenin şekil değişimi davranışı hesaplanmış ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Hesaplamaları hızlandırmak için kullanılan kabuk elemanlarla göreceli olarak çok kısa sürede (normal bir ev bilgisayarında 3 saatin altında) sonuç veren bir model elde edilmiştir.

Son aşamada SEA modeli yayınlarda ürünlerde kusur yaratmayacak ölçüde açı farkları bulunan 0° - 25° - 50° - 70° - 75° adapte edilerek modelleme yaklaşımı ile ilave hata payı tespit edilmiş ve varolan deneysel çalışmada 0° - 15° - 30° - 45° - 75° olacak şekilde çıkış açısının 10° azaltılması suretiyle elde edilecek üründe kusur gözlenmeyeceği öngörüsünde bulunulabilir. Geliştirilen SEA modeli yaklaşımında sac malzemenin mümkün olduğu kadar az kısıtlama ile modellenmesi, daha küçük elemanlar kullanılması, dinamik açık algoritmalar kullanılması nedeni ile daha önceki çalışmalarda bahsedilmeyen birden fazla kusurun çok daha kısa sürede ve aynı anda tespit edilmesi gibi olumlu sonuçlar elde edilmiştir.

6.2 Genel Vargılar

Bu çalışmada kenar dalgalanmalarına etkilerini incelenmek üzere seçilen makara dizilişi, kenar yüksekliği ve malzeme değişkenlerinin ortalama etkilerinin ve aralarındaki etkileşimlerin belirlenebilmesi için Taguçi yaklaşımı ile iki düzeyli L8 tam eşleştirmeli deney yöntemi uygulanmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- 1) Kenar yüksekliği ürün kalitesine etkisi en büyük olan değişkendir. Etki değeri yaklaşık olarak 3,5 birim (diğer iki etkiden de yaklaşık iki kat büyüklükte) olarak hesaplanmıştır. İşleme doğrudan etkisi olan makara dizilişindeki değişiklikte 1,6 birim ve malzemede alüminyum yerine sünek çelik kullanılmasının yarattığı olumlu etki ise 1,5 birim olarak tespit edilmiştir.

- 2) Kenar yüksekliği ve malzeme cinsi arasında güçlü bir etkileşim gözlenmiştir. Etki değeri yaklaşık olarak 0.8 birim olarak elde edilmiştir. Kenar yüksekliği kısa (12 mm) olduğu zaman her iki malzeme ile de kenar dalgalanmaları yaklaşık %50 ila %70 oranlarında azalmış ve belirgin şekilde daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.
- 3) Ayrıca, makara sayısı/diziliş ve kenar yüksekliği arasında önemli bir etkileşim gözlenmiştir. Etki değeri yaklaşık olarak 0.7 birim olarak elde edilmiştir. Açık farkının çıkış makara setinde 15° azalması ve ilave makara seti eklenmesi ile kenar dalgalanmaları %30 ila %47 oranlarında azalmıştır.
- 4) Bu çalışmada elde edilen sonuçlarda makara sayısı/diziliş ile malzeme cinsi arasında etkileşim gözlenmemiştir.
- 5) Kombinasyon olarak A1 (0°-15°-30°-45°-85°) B2 (kısa kenar yüksekliği: 12 mm) ve C2 (sünek çelik) ile kenar dalgalanmasının en aza indirilmesi (dalga ortalaması 0.29 ± 0.12 elde edilmiştir) açısından en iyi sonuç elde edilmiştir.
- 6) Kenar dalgalanmaları ile düşey düzlemde eğilme arasında düşük bir korelasyon (0.23) elde edilmesinin çıkış makarasında 40° ve 55° olarak açı farkının yarattığı ilave eğilme nedeniyle sönümlendiği düşünülmektedir.

SEA modeli ile elde edilen sonuçları şu şekilde özetleyebiliriz:

- 1) Makaraların hareketi ile sac malzemenin ittirilmesi suretiyle makara girişlerinde yaşanabilecek sorunlar (özellikle çıkış makara setine) gözlenebilmiştir. Bu vesile ile gerçek hayatta alınan önlemlere (köşe yuvarlatılması) SEA modeli de olumlu tepki vermiştir. 40° ve 55° açı farklarında sac malzemenin çıkış makara setlerine düzgün bir şekilde girmesi için makara setlerinin gerçek makara setlerindeki gibi modellenmesi ile SEA modeli sonuçları deney sonuçlarına yaklaşmıştır.
- 2) Klasik kabuk elemanları yerine çarpılma etkisini de içerecek şekilde geliştirilmiş kabuk elemanları kullanılması ile çıkış makara setlerinde yaşanan sorunlar giderilmiştir.
- 3) Deneyler ile elde edilen kenar dalgalanma ve düşey düzlemde eğilme davranışlarının SEA ile hesaplanmasında kenar dalgalanma için yüksek bir korelasyon (0,97) değeri ve düşey düzlemde eğim için orta bir korelasyon (0,51) gözlenmiştir. Düşey düzlemde eğilme için daha düşük bir korelasyon elde edilmesinin SEA modelindeki giriş kısmında 210 mm'lik y-yönünde hareket kısıtlaması, çıkış makara seti için gereken ilave elemanların sac malzeme boyundan 85 mm kısaltılması suretiyle sağlanması, kenar dalgalanması değerlerindeki ilave farklar ve makara setlerindeki elemanlar arasında dönme nedeniyle oluşan ilave açıklıktan kaynaklandığı düşünülmektedir.

- 4) SEA modeli ile alınan sonuçların Taguçi yöntemi ile incelenmesi ile elde edilen etki büyüklükleri birbirlerine yakın çıkmıştır. Ancak makara dizilişi doğrudan etkisi daha 2.34 birim olarak (deneylelerdeki 1.6 birim yerine) SEA analizinde alınmıştır. Bu sonucun ilave makara kullanılması suretiyle sac malzemenin aldığı yolun uzaması ve çıkış makarasındaki 15° düşme nedeniyle basma yönündeki kuvvetlerin azalması ile kabuk elemanların daha iyi sonuç vermesi şeklinde yorumlanmıştır.
- 5) Bhattacharyya ve diğerlerinin çalışmalarında sundukları form uzunluğunun yaklaşımı ile SEA modeli ile alınan sonuçlarda uyum gözlenmiştir.
- 6) İyileştirme hesabı için dört makara seti kullanımı (0°-25°-50°-70°-75°) ve makara setleri arasında 30°'yi aşmayacak geometri kullanılması ile yapılan iyileştirme hesaplarında, kenar dalgalanması 0.17 mm ila 0.5 mm arasında büyüklükleri arasında ölçülmesi ile düşey düzlemde 5 mm ila 10 mm arasında değerler elde edilmesi modelleme yaklaşımından kaynaklanan kalıcı kusur olarak değerlendirilmiştir. Benzer kesitler için aynı modelleme yaklaşımı kullanılarak bu düzeyde bir kusur gözlenmesi, üretilecek olan makinanın hatasız ürün elde edebileceği şeklinde yorumlanabilir.
- 7) 0°-25°-50°-70°-75° makara dizilişi ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında çıkış açısının 10° azaltılması suretiyle 0°-15°-30°-45°-75° düzeneğinde toleranslar dahilinde hatasız ürün elde edileceği öngörülmektedir.
- 8) Ortalama aksenal gerinim A2 (15°-30°-85°) kombinasyonunda A1 (15°-30°-45°-85°) kombinasyonuna göre yaklaşık % 250 oranında büyük oluşmakta ve makara seti girişinde daha şiddetli düşmektedir. Dalgalanmanın ilk çekirdeklenmesinin 30°'lik makara seti öncesinde başladığı gözlenmiştir. Ardışık istasyonlar arasında fazla açı vermenin kenar dalgalanmasını artırdığı bir kez daha kanıtlanmıştır.
- 9) İşlem sonrası elde edilen iç enerji, artık gerilme ve gerinim değerleri incelendiğinde, kenar dalgalanmaları hakkında yalnızca iç enerji ile bir hüküm vermenin mümkün olmadığı, işlem boyunca oluşan gerinimin de etkileri olduğu değerlendirilmiştir.
- 10) Belirgin kenar dalgalanması görülen hallerde kenar dalgalanması genel olarak artan iç enerjiye paralel olarak artmaktadır. Bu durumda gerinim değerleri yükselirken, artık gerilmelerin daha düşük seviyelere indiği gözlenmiştir.
- 11) Bükülen kenar ucundaki toplam iç enerjideki değişim ile kenar dalgalanması arasında birebir ilişki vardır. Ancak dalgalanma olgusunun temelinde yatan, aksenal germe, makara önünde ve içinde aksenal basma, enerji doyumu,

kararsızlık, bifurkasyon ve burkulma (buruşma) ile doğrudan ilişkilendirmek eldeki bilgilerle mümkün değildir.

- 12) Profil kenarındaki malzemenin toplam iç enerjisi kenar dalgalanması üstünde belirgin biçimde etkinken, bu enerjinin kenar boyunca değişimi ile dalgalanmanın yeri, şiddeti ve sıklığı konusunda hüküm vermek mümkün değildir.
- 13) Diğer SEA çalışmalarında gösterilemeyen kenar dalgalanması, düşey düzlemde eğilme gibi kusurların aynı anda elde edilmesinin ve davranışlarının deney sonuçları ile uyumlu çıkmasının modelleme yaklaşımının, sac malzemenin davranışının hesaplanması açısından, güçlü yanları olarak değerlendirilmiştir. Kısıtlamaların kaldırılması ile asimetrik parçalarda burulma gibi diğer kusurların tespiti açısından yararlanılabileceği değerlendirilmiştir.

Sunulan SEA modeli yaklaşımı ile bilgisayar ortamında sac malzeme davranışlarının sunulan limitler dahilinde hesaplanmasının mümkün olduğu sonucuna varılmıştır.

6.3 Olası Çalışma Konuları

Çalışmalar deneysel, analitik ve SEA modeli geliştirilmesi olarak üç yönde sürdürülebilir.

Varolan deneysel çalışmada gerinimlerin deney esnasında ölçülmemiş olduğu için oluşan gerinimler ile şekil değişimi arasında ilişki değerlendirilememiştir. Gerek SEA ile de mukayesesi açısından gerekse malzeme davranışına etkileri açısından daha detaylı bir deneysel çalışma yapılabilir.

Deneysel olarak kenar dalgalanmasının çekirdeklendiği yerler (dijital görüntü işleme vb. tekniklerle) tespit edilip aynı şartlarda sonlu elemanlar simülasyonu yapılırsa kenar alanında oluşan gerilme ve şekil değişimi halleri ve iç enerji dağılımı ile dalgalanma (burkulma ve buruşma) arasındaki ilişki daha net tanımlanabilecektir.

Ayrıca, makaralı bükme işleminde önemli faktörlerden olan sac kalınlığının kenar dalgalanması üzerine etkisinin ve yarattığı etkileşimlerin daha iyi anlaşılması için diğer değişkenlerle birlikte incelenmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ve benzer faktörlerin ve Taguçi yönteminin izlenmesi ile aralarındaki etkileşimlerin daha iyi anlaşılması makaralı bükme işlemi için ürün ve makina tasarımında kolaylıklar sağlayacaktır.

Analitik olarak sunulan yaklaşımlarda iki makara seti arasında kalan alanda kritik gerinim hesabı yerine dalgalanma üzerinde elastik/plastik burkulma etkilerini de içerecek şekilde teorik model geliştirilebilir ve kritik gerinim hesabında kullanılabilir. Sonuçları deneysel ve SEA çalışmaları ile karşılaştırılabilir.

SEA modelinde varolan yüksek hassasiyetin azaltılması ve SEA modelinin deney sonuçları ile de yakın sonuçlar vermesi için modelde geliştirme ihtiyacı bulunmaktadır. Örnek olarak SEA modeli, makara dönme hızında çok küçük değişimlerinden etkilenmektedir. Bu etkilenmeyi ve malzeme davranışındaki modelleme yaklaşımından kaynaklanan ilave hatayı en aza indirmek için modelde özellikle basma yönünde kuvvetlere karşı daha iyi cevap veren elemanlar ile (kabuk eleman yerine tuğla eleman gibi) çalışma geliştirilebilir. Buna ilave olarak daha çok eleman kullanımı ile makaraların (bütün makaralarda köşe yuvarlatılması yapılarak ve tavsiye edilen en/boy orantısına uygun) ve sac parçanın modellenmesine ve temas algoritmasının makaralı bükme işlemi için iyileştirilmesine ihtiyaç bulunmaktadır.

Benzer çalışmalarda bildirilen dinamik açık (eksplicit) algoritmaların kullanılması halinde makul sonuçlar elde edilebilmesi için zaman ve kütle ölçeği (time and mass scaling) seçiminin etkilerinin, kapalı (implicit) algoritmalara kullanılarak SEA modelinin uyarlanması ile sonuçlar iyileştirilebilir.

Asimetrik profil, V-profil kesitleri için yaklaşım yana doğru eğilme, burulma kusurlarının tahmini için bilgisayar ortamında deneyler uygulanabilir. Benzer şekilde makaralı bükme işleminde sık kullanılan delikli profillerin de analizi için aynı yöntem adapte edilebilir. Son dönemde geliştirilmesi için yoğun çaba harcanan kenar yüksekliği ve sac genişliği değişken olan profillerin de modellenmesi açısından çalışmanın geliştirilebileceği düşünülmektedir.

Son aşamada, kullanıcı tarafından kolayca SEA girdi dosyası hazırlanabilmesi için parametrelerin basit bir şekilde girilebileceği ara yüz yazılımları geliştirilebilir ve makaralı bükme tezgah tasarımcılarının kullanabileceği basitlikte bir araç yaratılabilir. Böyle bir araç ile makaralı bükme işlemine etkisi olabilecek başka değişkenlerle bilgisayar ortamında deneyler yapılması ve elde edilen üretim deneyimlerinin aktarılması sureti ile uzman sistemler ile entegre bir yapı kazandırılabilirse hem optimizasyon hem de tasarım açısından büyük kolaylık sağlanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Halmos, G.**, 2006. Roll-forming Handbook, Taylor & Francis, Florida.
- [2] **Sweeney, K., Grunewald, U.**, 2003. The application of roll-forming for automotive structural parts, *Journal of Materials Processing Technology*, **132**, 9-15.
- [3] **Sedlmaier, A.**, 2006. Kişisel Görüşme
- [4] **Watari, H., Ona, O.**, 1998. Characteristic features of shape defects occurring in the cold roll-forming of pre-notched products, *Journal of Materials Processing Technology*, **80-81**, 225-231.
- [5] **Nallapati, S.R.**, 1996. CAD for roll forming process, *PhD Thesis*, West Virginia University, Morgantown, West Virginia
- [6] **Bhattacharyya, D., Smith, P.D., Yee, C.H., Collins, I.F.**, 1984. The prediction of deformation length in cold roll forming, *Journal of Mechanical Working Technology*, **9**, 181-191.
- [7] **Bhattacharyya, D., Smith, P.D.**, 1984. The development of longitudinal strain in cold roll forming and its influence on product straightness, *Advanced Technology of Plasticity*, **I**, 422-427.
- [8] **Bhattacharyya, D., Smith, P.D., Thadakamalla, S.K., Collins, I.F.**, 1987. The prediction of roll load in cold roll forming, *Journal of Mechanical Working Technology*, **14**, 363-379.
- [9] **Bhattacharyya, D., Maltby, T.C., Martin, T.A., Panton, S.M.**, 1990. Prediction of strain development while roll forming fundamental sections, *Advanced Technology of Plasticity*, **II**, 871-876.
- [10] **Hira, T., Abe, K., Nakagawa, K.**, 1979. Effect of the mechanical properties of steel sheets on web-buckling behaviour in the cold roll-forming of siding board, *Journal of Japanese Society of Technology and Plasticity*, **20 No25**, 933-939.
- [11] **Ona, H., Jimma, T.**, 1983. Experiments into the cold roll-forming of straight asymmetrical channels, *Journal of Mechanical Working Technology*, **8**, 273-291.
- [12] **Miyamoto, Y., Hawa, S.**, 1991. Effect of tensile flow properties of titanium sheets on web-buckling behaviour in cold roll-forming of wide profiles, *ISIJ International*, **31 No.8**, 863-869.

- [13] **Ona, H., Jimma, T.**, 1994. Prevention of shape defects in cold roll-forming process of wide profiles, *Bulletin of Precision Machinery and Electronics*, Tokyo Institute of Technology, **53**, 1-13.
- [14] **Senanayake, R.S., Cole, I.M., Thiruvarudchelvan, S.**, 1994. The application of computational and experimental techniques to metal deformation in cold roll forming, *Journal of Materials Processing Technology*, **45**, 155-160.
- [15] **Duggal, N., Ahmetoğlu, M.A., Kinzel, G.L., Altan, T.**, 1996. Computer aided simulation of cold roll forming – a computer program for simple section profiles, *Journal of Materials Processing Technology*, **59**, 41-48.
- [16] **Brunet, M., Lay, B., Pol, P.**, 1996. Computer aided design of roll-forming of channel sections, *Journal of Materials Processing Technology*, **60**, 209-214.
- [17] **Brunet, M., Mguil, S., Pol, P.**, 1998. Modeling of a roll-forming process with a combined 2D and 3D FEM code, *Journal of Materials Processing Technology*, **80-81**, 213-219.
- [18] **Panton, S. M., Duncan, J. L., Zhu, S.D.**, 1996. Longitudinal and shear strain development in cold roll forming, *Journal of Materials Processing Technology*, **60**, 219-224.
- [19] **Nefussi, G., Proslie, L., Gilormini, P.**, 1998. A simulation of cold-roll forming for elastoplastic materials, *International Journal of Mechanical Science*, **40 No:1**, 15-25.
- [20] **Livatyalı, H., Duggal, N., Ahmetoğlu, M.A., Altan, T.**, 2000. Investigation of crack formation on the galvalume coating of roll formed roof panels, *Journal of Materials Processing Technology*, **98**, 53-61.
- [21] **Jan, Fei-Chin, Onipede, O.**, 2001. Simulation of cold roll forming of steel panels, *6th Ls-Dyna Users Conference*, Session 14-1.
- [22] **Alsamhan, A., Hartely, P., Pillinger, I.**, 2003. The computer simulation of cold-roll-forming using FE methods and applied real time re-meshing techniques, *Journal of Materials Processing Technology*, **142**, 102-111.
- [23] **Alsamhan, A., Pillinger, I., Hartely, P.**, 2004. The development of real time re-meshing technique for simulating of cold-roll-forming using FE methods, *Journal of Materials Processing Technology*, **147**, 1-9.
- [24] **Tehrani, M.S., Hartley, P., Naeini, H.M., Khademizadeh, H.**, 2006. Localized edge buckling in cold roll-forming of symmetric channel section, *Thin Walled Structures*, **44**, 184-196
- [25] **Heislitz, F., Livatyalı, H., Ahmetoğlu, M.A., Kinzel, G.L., Altan, T.**, 1996. Simulation of roll forming process with the 3-D FEM code PAM-STAMP, *Journal of Materials Processing Technology*, **59**, 59-67

- [26] **Schmoeckel, D., Sitzmann, B.**, 1996. Computer aided pass sequence planning for roll forming using the finite element simulation, *5th ICTP (International Conference on Technology of Plasticity) Proceedings*, 523-526.
- [27] **Han, Z., Liu, C., Lu, W., Ren, L.**, 2001. The effect of forming parameters in the roll-forming of a channel section with an outer edge, *Journal of Materials Processing Technology*, **116**, 205-210.
- [28] **Hong, S., Lee, S., Kim, N.**, 2001. A parametric study on forming length in roll forming, *Journal of Materials Processing Technology*, **113**, 774-778.
- [29] **Han, Z., Liu, C., Lu, W., Ren, L.**, 2002. Simulation of multi-stand roll-forming process for thick channel section, *Journal of Materials Processing Technology Vol 127*, 382-387.
- [30] **Farzin, M., Tehrani, M.S., Shamel, E.**, 2002. Determination of buckling limit of strain in cold roll forming by the finite element analysis, *Journal of Materials Processing Technology*, **125-126**, 626-632.
- [31] **Tajdari, M., Farzin, M.**, 2002. Numerical analysis of cold roll of symmetrical open sections, *Journal of Materials Processing Technology*, **125-126**, 633-637.
- [32] **Kim, N., Kang, B., Lee, S.**, 2003. Prediction and design of edge shape of initial strip for thick tube roll forming using finite element method, *Journal of Materials Processing Technology*, **142**, 479-486.
- [33] **Boman, R., Papeleux, L., Bui, Q.V., Ponthot, J.P.**, 2006. Application of the Arbitrary Lagrangian Eulerian formulation to the numerical simulation of cold roll forming process, *Journal of Materials Processing Technology*, **177**, 621-625.
- [34] **Neubauer, A., Klaeger, S., Angrabeit, H.J., Eichhorn, A., Kahle, U.**, 1984. New processes and CAD-System for cold roll forming of bending sheet parts, *Advanced Technology of Plasticity Vol I*, 153-159.
- [35] **Ona, H., Jimma, T., Kozono, H.**, 1984. A computer aided design system for cold roll forming, *Advanced Technology of Plasticity, I*, 508-513.
- [36] **Yuen, W.Y.D.**, 1986. Design and implementation of a cad system for cold roll forming, *Comput. & Graphics*, **10 No:3**, 213-217.
- [37] **Rondal, J.**, 1987. Residual Stresses in cold-rolled profiles, *Construction & Building Materials*, **1 No:3**, 150-164.
- [38] **Haritos, G., Ghosh, S.K., Milner D.A.**, 1992. A computer algorithm to link a finite-element package to the CAD/CAM of cold roll-forming, *Journal of Materials Processing Technology*, **31**, 277-293.
- [39] **Panton, S.M., Zhu S.D., Duncan J.L.**, 1994. Fundamental deformation types and sectional properties in roll forming, *Int. Journal of Mech. Science*, **36 No:8**, 725-735.

- [40] **Brunet, M., Ronel, S.**, 1994. Finite element analysis of roll-forming of thin metal sheet, *Journal of Materials Processing Technology*, **45**, 255-260.
- [41] **Kiuchi, M., Abe, K., Onodera, R.**, 1995. Computerized numerical simulation of roll-forming process, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, **44 n 1**, 239-242.
- [42] **Panton, S.M., Lissington, T.R., Duncan, J.L.**, 1998. The use of “free-flowing” surfaces in tooling design for roll forming, *Journal of Materials Processing Technology*, **80-81**, 220-224.
- [43] **Shen, X., Liu, J., Wang, X., Huang, C.**, 2003. Development of an applied roll forming pass design expert system based on the shape element idea, *Journal of Materials Processing Technology*, **140**, 505-508.
- [44] **Şirvancı, M.**, 1997. Kalite İçin Deney Tasarımı “Taguçi Yaklaşımı”, Literatür Yayıncılık, İstanbul.
- [45] **Hallquist, O. J.**, 1998. LS-DYNA Theoretical Manual, Livemore Software Technology Corporation.
- [46] **Livemore Software Technology Corporation**, 2001. Keywords User’s Manual Version 960 Vol.1 & Vol.2, Livemore Software Technology Corporation, <http://www.lstc.com>.
- [47] **Maker, B. N., Zhu, X.**, 2000. Input parameters for metal forming simulation using LS-DYNA, Livemore Software Technology Corporation <http://www.lstc.com>.

EK - A SONUÇLAR

Bu ekte sırasıyla aşağıdaki üç bölümden oluşmaktadır:

- I) Makaralı bükme deneylerinde kullanılan tezgah makaraları teknik resimleri
- II) Deney sonuçları fotoğrafları, 3 boyutlu tarama resimleri ile SEA modeli (deneylere karşılık gelen ve iyileştirme modeli) ile elde edilen sonuçların görsel karşılaştırma resimleri
- III) SEA sonuçları 8 deney kombinasyonuna ve iyileştirme modeline karşılık gelen sonuçlar (elde edilen profillerin geometrik incelemeleri, gerinim, gerilme dağılımları, enerji, koordinat, eşdeğer gerinim dağılımı grafikleri)

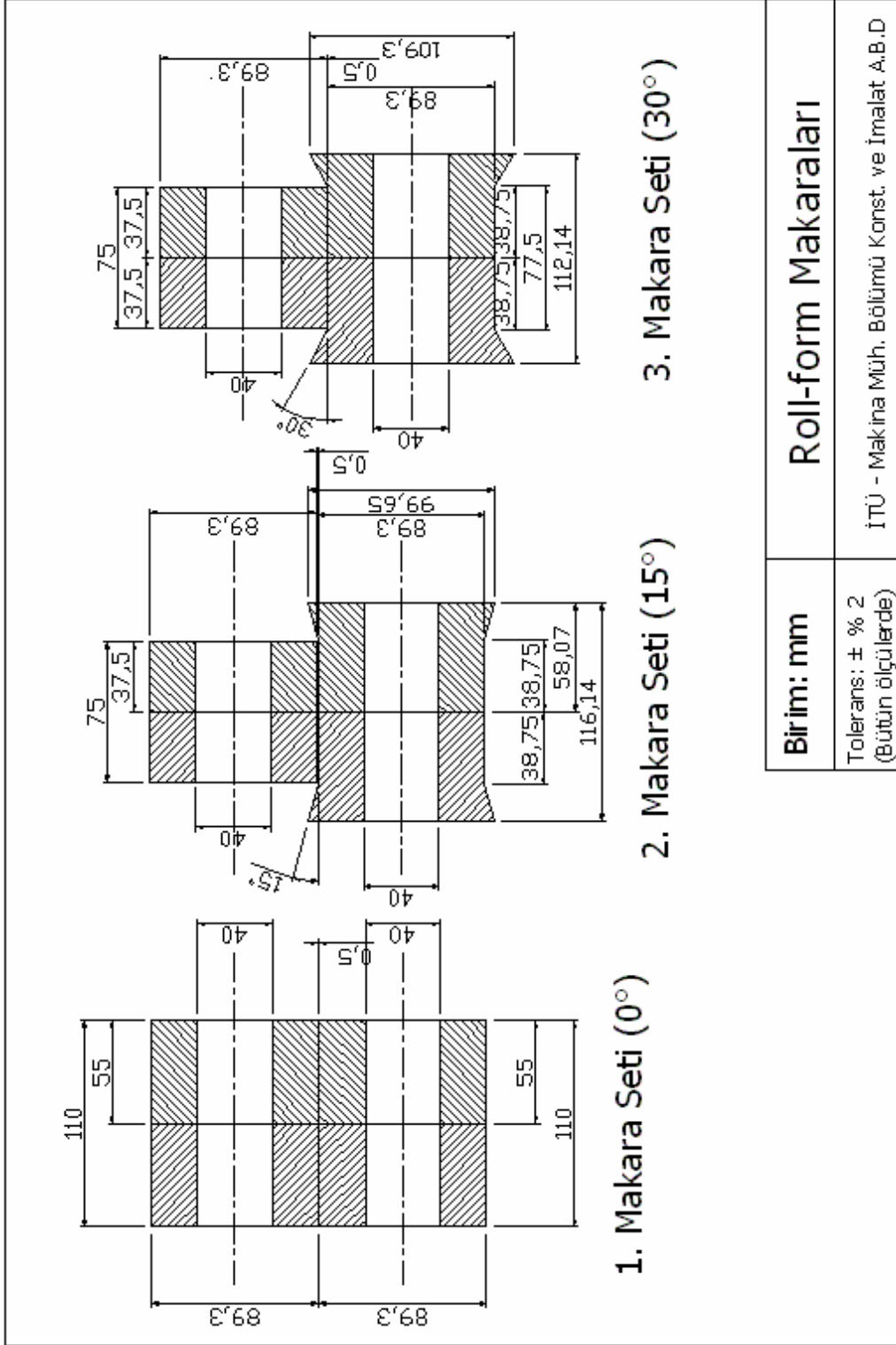
sunulmaktadır.

I) İlk kısmında makaralı bükme deneylerinde kullanılan tezgah makaralarının teknik resimleri verilmektedir. Resimlerden de görüleceği üzere makaralar iki parçadan oluşmaktadır. Bu üretimde ve hizalamada kolaylık sağladığı için tercih edilmektedir.

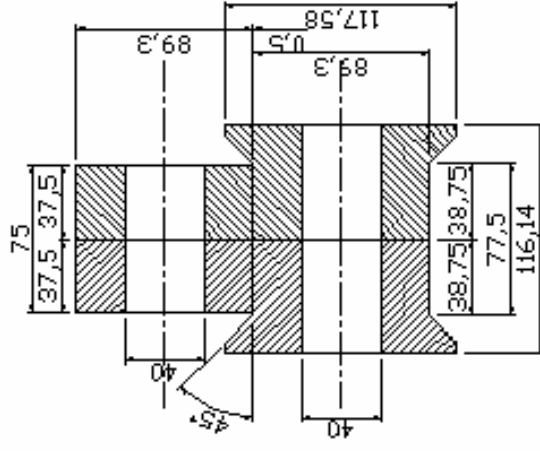
II) İkinci kısımda ise deney sonuçlarının fotoğrafları, 3-boyutlu tarama resimleri ve SEA analizi sonuçları görsel olarak sunulmaktadır. Fotoğraflarda ışıklandırma yüzünden kenar yüzeylerin dalgalanmaları tam görülmemekle birlikte 3-boyutlu tarama ile CATIA programında elde edilen yüzey resimleri ışıklandırması ile daha iyi bir his yaratmaktadır. Bu sonuçlar SEA modeli ile elde edilen sonuçlar, görsel karşılaştırma yapılması için yan yana ve aynı açıda sunulmaya çalışılmıştır. Elde edilen deformasyonların ve şekil bozukluklarının benzerlik düzeyi bu şekilde daha iyi anlaşılmaktadır. Bu kısmın sonundaki şekillerde iyileştirme modeli ile elde edilen sonuçlar önceki sonuçlarla kıyaslamalı olarak verilmektedir.

III) Üçüncü kısımda ise seçilen $t=5s$ anında SEA modeli (deneylere karşılık gelenler ve iyileştirme modeli) sonuçları, enerji grafikleri ve sac üzerindeki boylamasına (x-yönünde) gerinim ve gerilmelerin dağılımları sunulmaktadır.

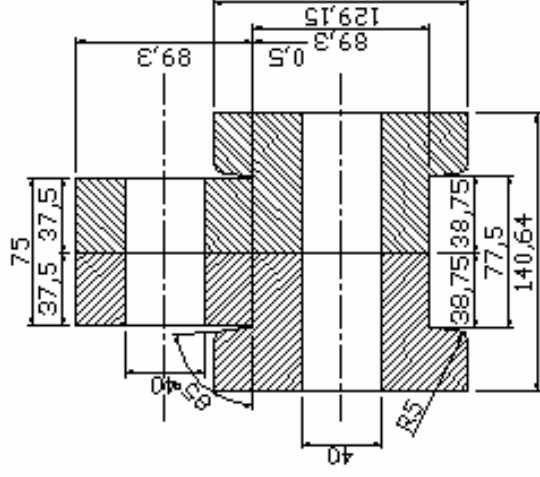
I) MAKARALI BÜKME DENEYLERİNDE KULLANILAN MAKARA TEKNİK RESİMLERİ



Şekil A.1: İlk üç makara seti teknik resimleri



4. Makara Seti (45°)

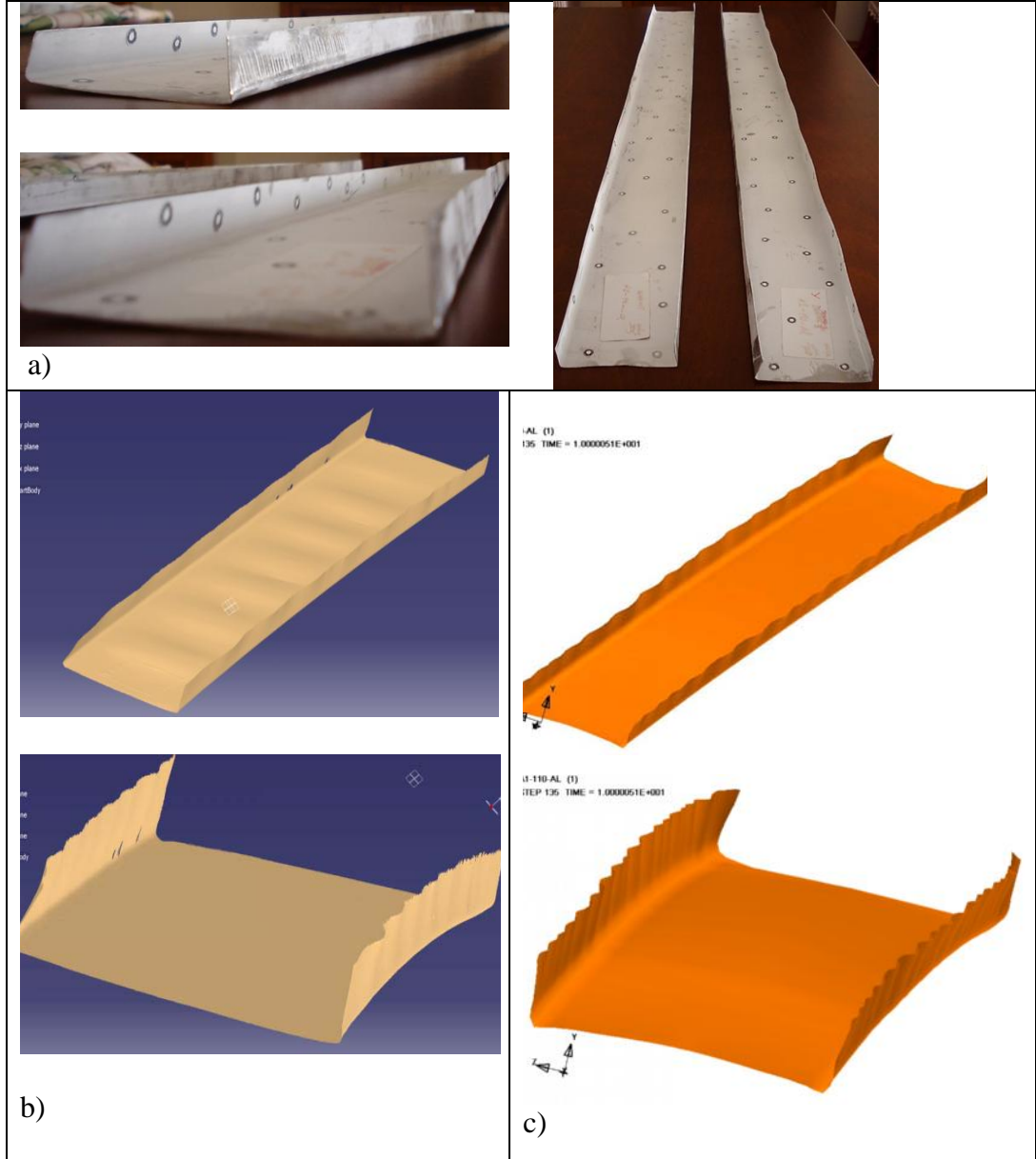


5. Makara Seti (85°)

Birim: mm	Roll-form Makaralan
Tolerans: \pm % 2 (Bütün ölçülerde)	İTÜ - Makina Müh. Bölümü Konst. ve İmalat A.B.D

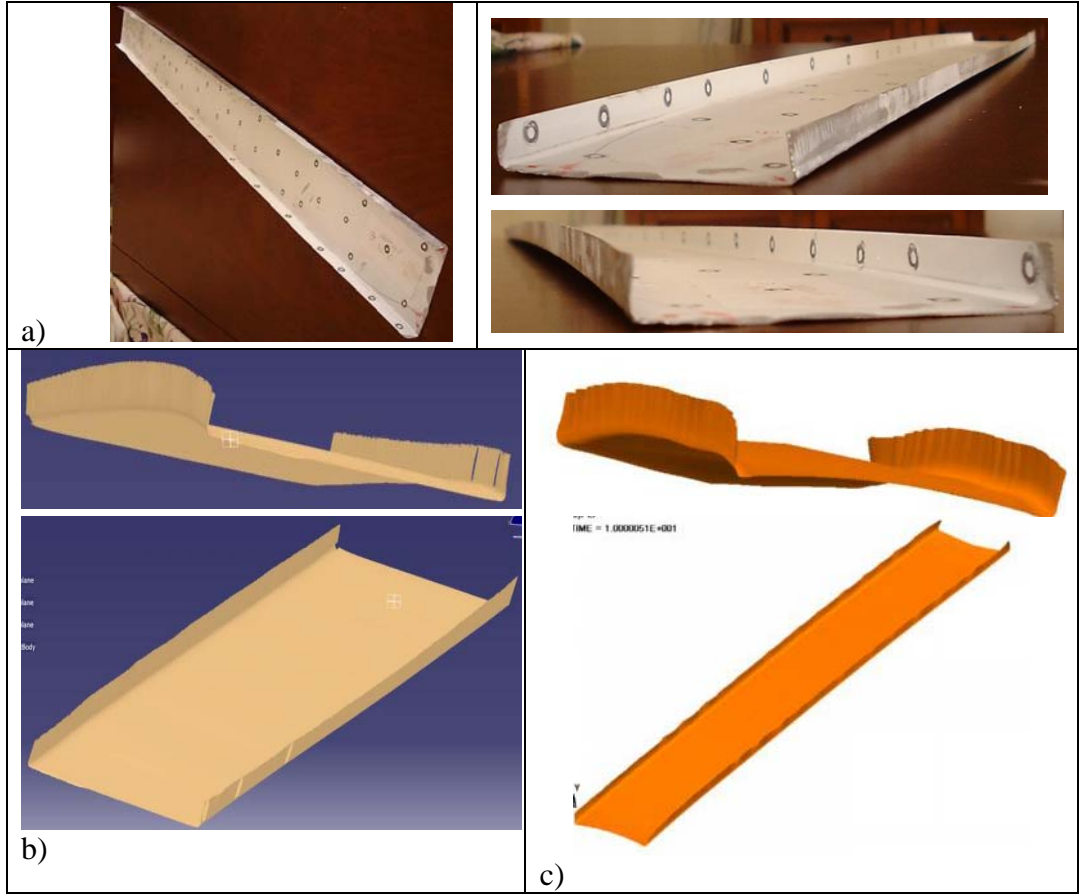
Şekil A.2: Son iki makara seti teknik resimleri

II) MAKARALI BÜKME DENEY VE SEA SONUÇLARI



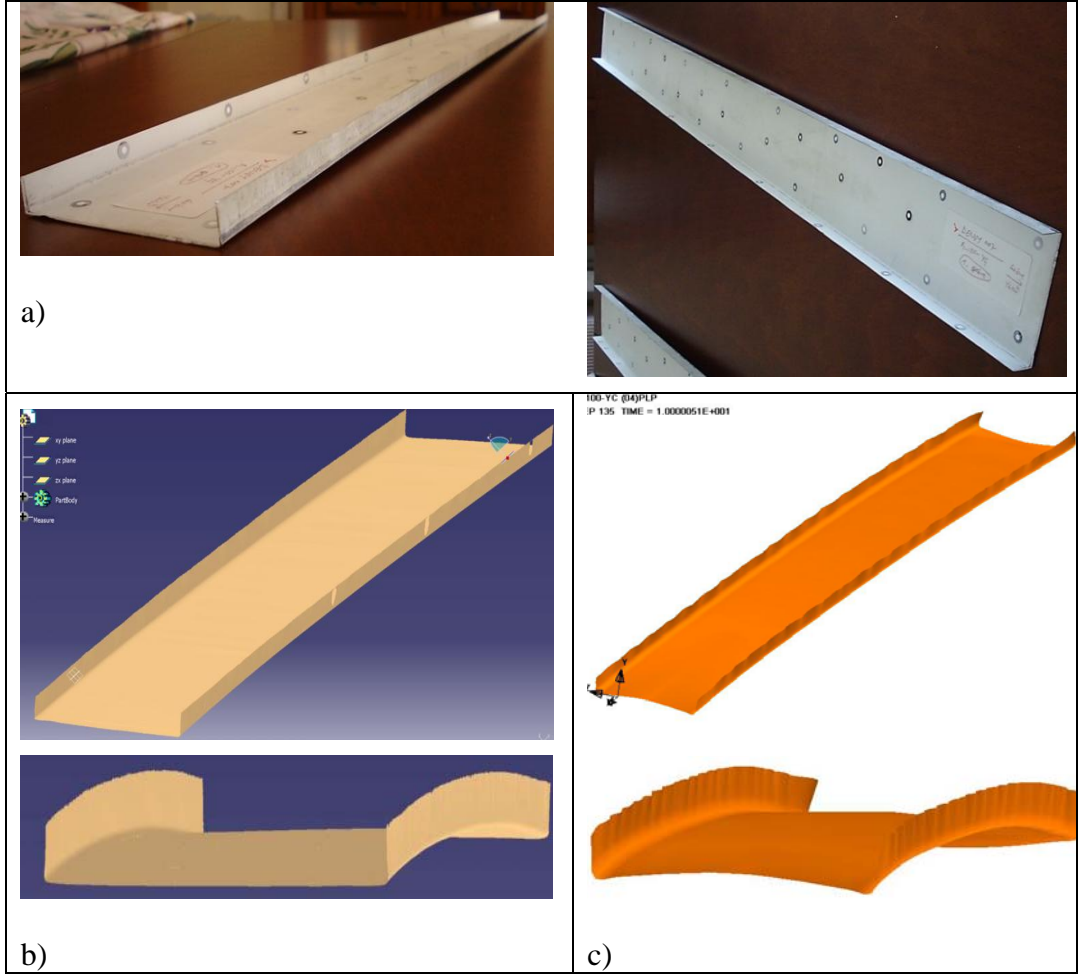
SIRA NO	Yapılan deneylerin sırası		Deney Gözlem Değeri	SEA Gözlem Değeri
1	A1-B1-C1	d5	1,361	1,34

Şekil A.3: A1-B1-C1 kombinasyonu için deney sonuçları ve analiz sonuçlarını karşılaştırma, a) Sonuçların fotoğrafı, b) 3 boyutlu tarama resimleri, c) SEA sonuçları



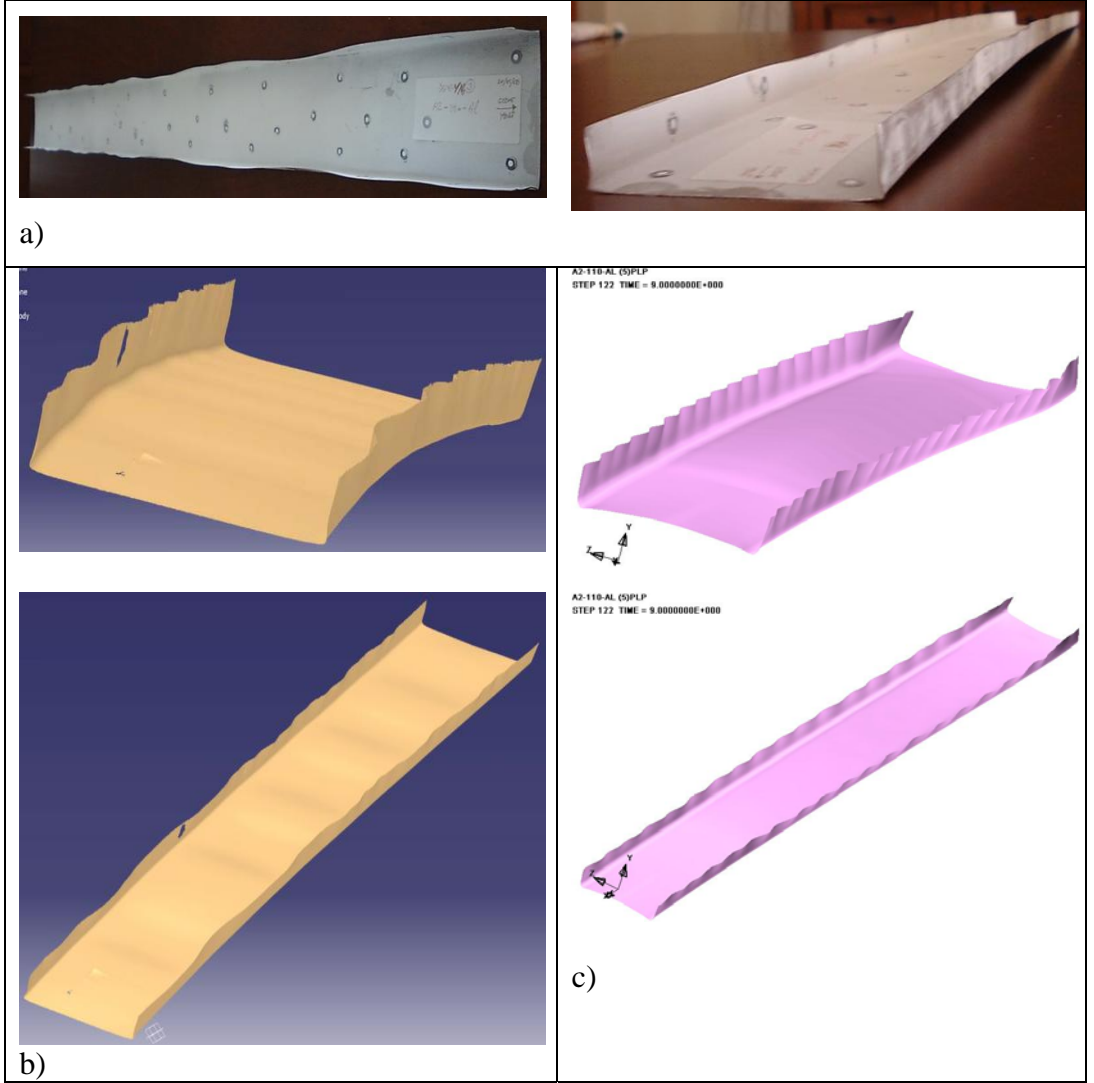
SIRA NO	Yapılan deneylerin sırası		Deney Gözlem Değeri	SEA Gözlem Değeri
3	A1-B2-C1	d8	0,378	0,55

Şekil A.5: A1-B2-C1 kombinasyonu için deney sonuçları ve analiz sonuçlarını karşılaştırma, a) Sonuçların fotoğrafı, b) 3 boyutlu tarama resimleri, c) SEA sonuçları



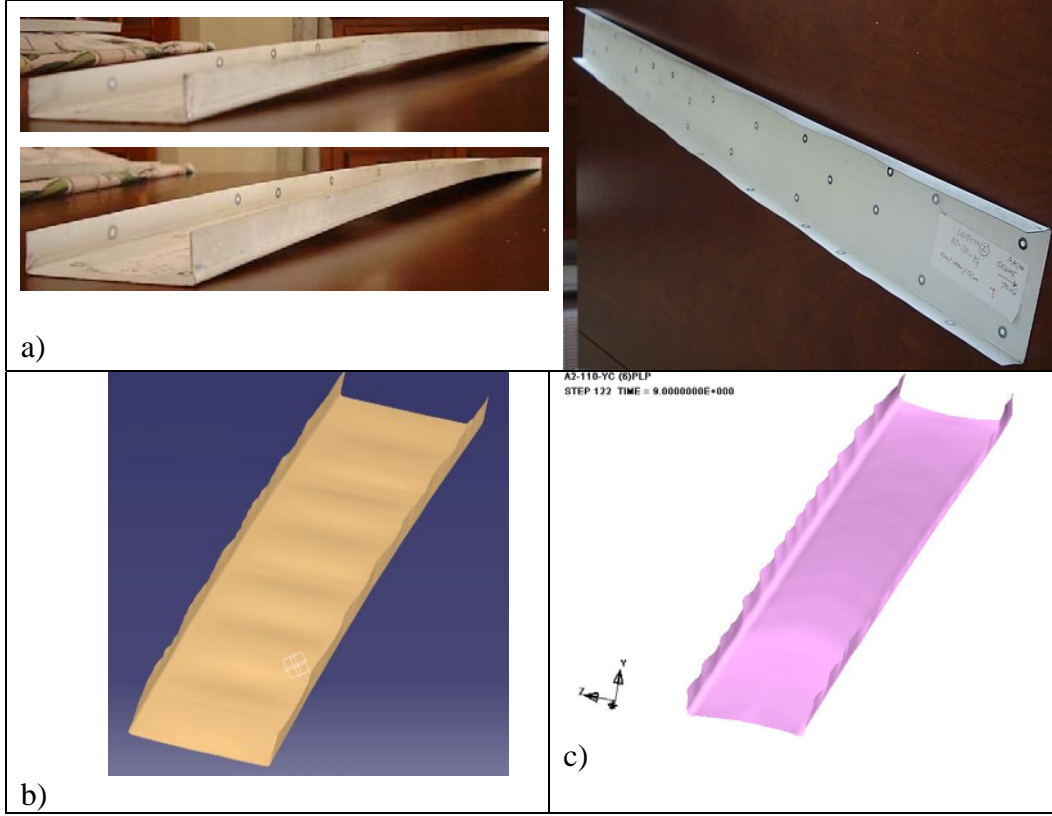
SIRA NO	Yapılan deneylerin sırası		Deney Gözlem Değeri	SEA Gözlem Değeri
4	A1-B2-C2	d7	0,290	0,60

Şekil A.6: A1-B2-C2 kombinasyonu için deney sonuçları ve analiz sonuçlarını karşılaştırma, a) Sonuçların fotoğrafı, b) 3 boyutlu tarama resimleri, c) SEA sonuçları



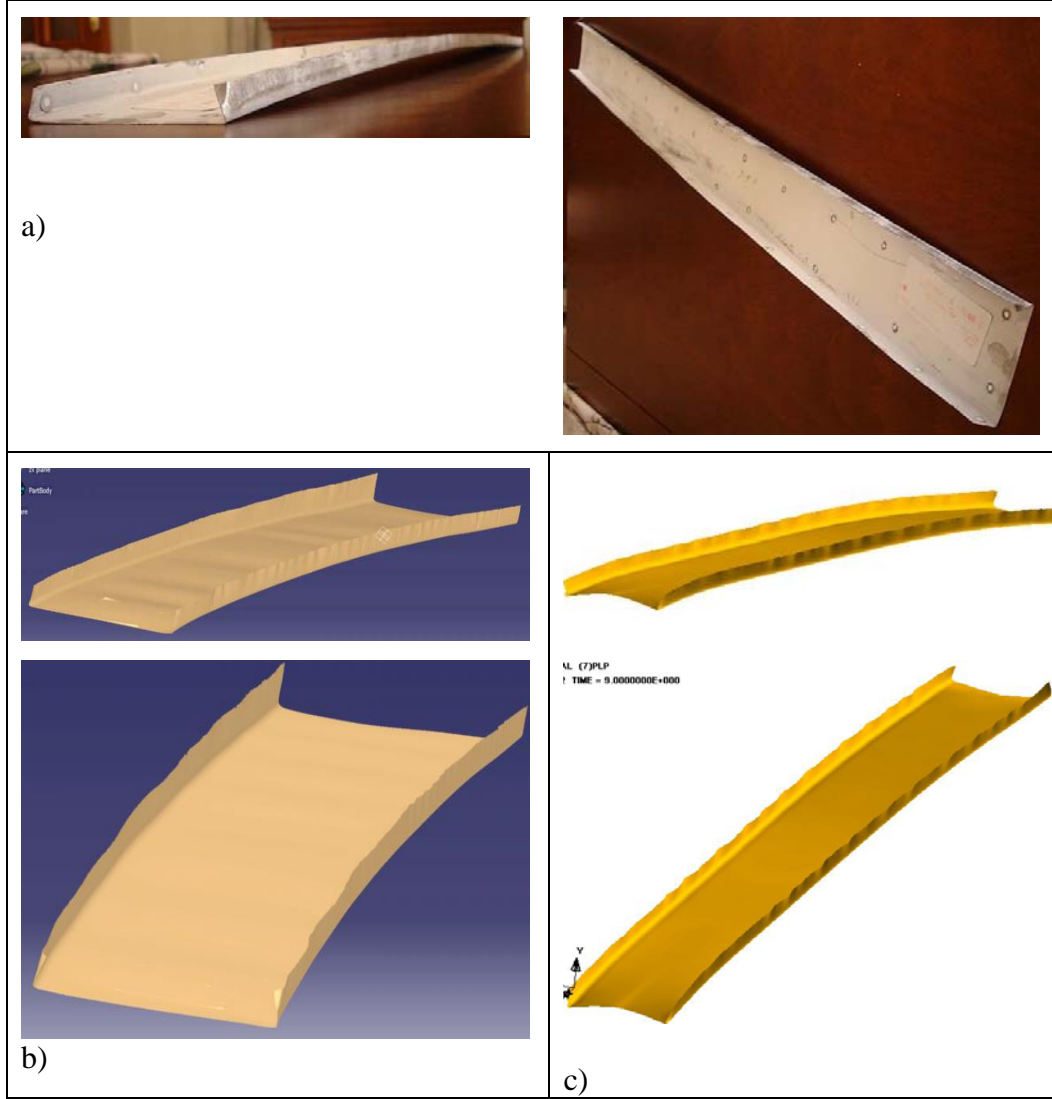
SIRA NO	Yapılan deneylerin sırası		Deney Gözlem Değeri	SEA Gözlem Değeri
5	A2-B1-C1	d3	1,871	2,31

Şekil A.7: A2-B1-C1 kombinasyonu için deney sonuçları ve analiz sonuçlarını karşılaştırma, a) Sonuçların fotoğrafı, b) 3 boyutlu tarama resimleri, c) SEA sonuçları



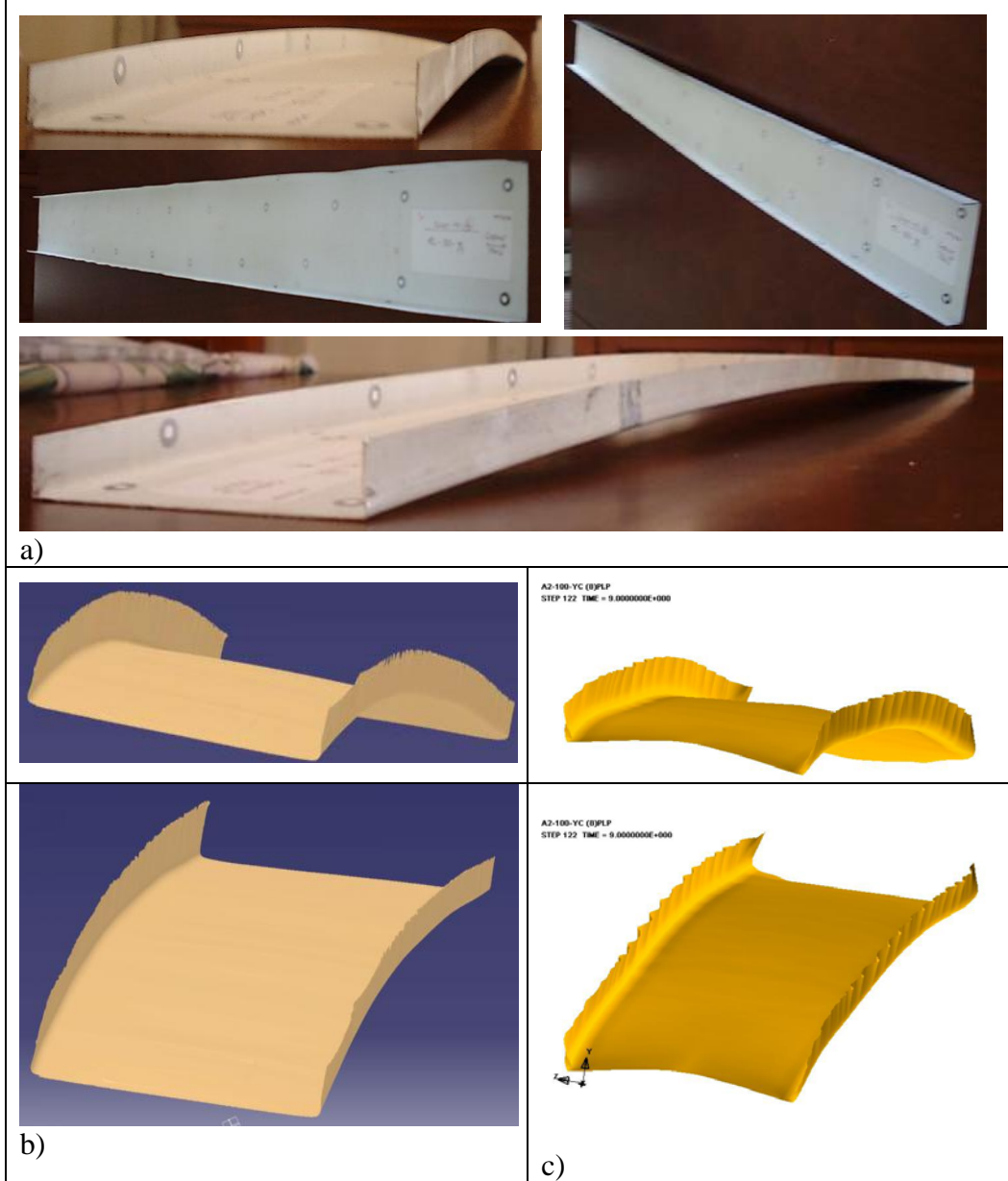
SIRA NO	Yapılan deneylerin sırası		Deney Gözlem Değeri	SEA Gözlem Değeri
6	A2-B1-C2	d2	1,367	1,73

Şekil A.8: A2-B1-C2 kombinasyonu için deney sonuçları ve analiz sonuçlarını karşılaştırma, a) Sonuçların fotoğrafı, b) 3 boyutlu tarama resimleri, c) SEA sonuçları



SIRA NO	Yapılan deneylerin sırası		Deney Gözlem Değeri	SEA Gözlem Değeri
7	A2-B2-C1	d1	0,680	0,85

Şekil A.9: A2-B2-C1 kombinasyonu için deney sonuçları ve analiz sonuçlarını karşılaştırma, a) Sonuçların fotoğrafı, b) 3 boyutlu tarama resimleri, c) SEA sonuçları



SIRA NO	Yapılan deneylerin sırası		Deney Gözlem Değeri	SEA Gözlem Değeri
8	A2-B2-C2	d4	0,441	0,84

Şekil A.10: A2-B2-C2 kombinasyonu için deney sonuçları ve analiz sonuçlarını karşılaştırma (a) Sonuçların fotoğrafı (b) 3 boyutlu tarama resimleri (c) SEA sonuçları

III) SEA SONUÇLARI

Bu kısımda ilk olarak elde edilen SEA modeli ile yapılmış deney kombinasyonları ve uyarlanmış iyileştirme hesaplama modeli sonuçları sunulmaktadır. Deneysel çalışma sonuçlarına kıyasla daha yüksek şekil bozuklukları elde edilmiş olmasına rağmen tez ana metninde açıklandığı gibi elde edilen sonuçlarla deney sonuçları arasında yüksek bir korelasyon bulunmaktadır. Deneysel çalışmanın bilgisayar ortamında tekrarlanması ardından ise elde edilmiş model kaynaklarda şekil bozukluğuna sebep olmadığından bahsedilen makara setleri arasında 30° 'yi geçmeyen açı farklarına göre uyarlanmıştır. İlk olarak modeli bozmadan çıkış makara setindeki 85° 'lik açı 75° 'ye düşürülmüş sonrasında çıkış açısı 75° olacak şekilde 25° - 50° - 70° - 75° makara dizilişlerine göre SEA modeli uyarlanmış ve analizler yapılmıştır. Aşağıda Şekil A.11 ila A.16'da yandan ve çapraz görünüşler üzerinde ortalama kenar dalgası değerleri gösterilmek suretiyle iyileştirmeler sunulmuştur.

Takip eden kısımda Şekil A.17 ila A.48 arasında ise $t=5$ saniyede, 4. ve son makara seti arasında kalan sac parçasını gösteren, 8 deney kombinasyonuna karşılık olarak SEA modelleri ile elde edilen sonuçlar sunulmaktadır.

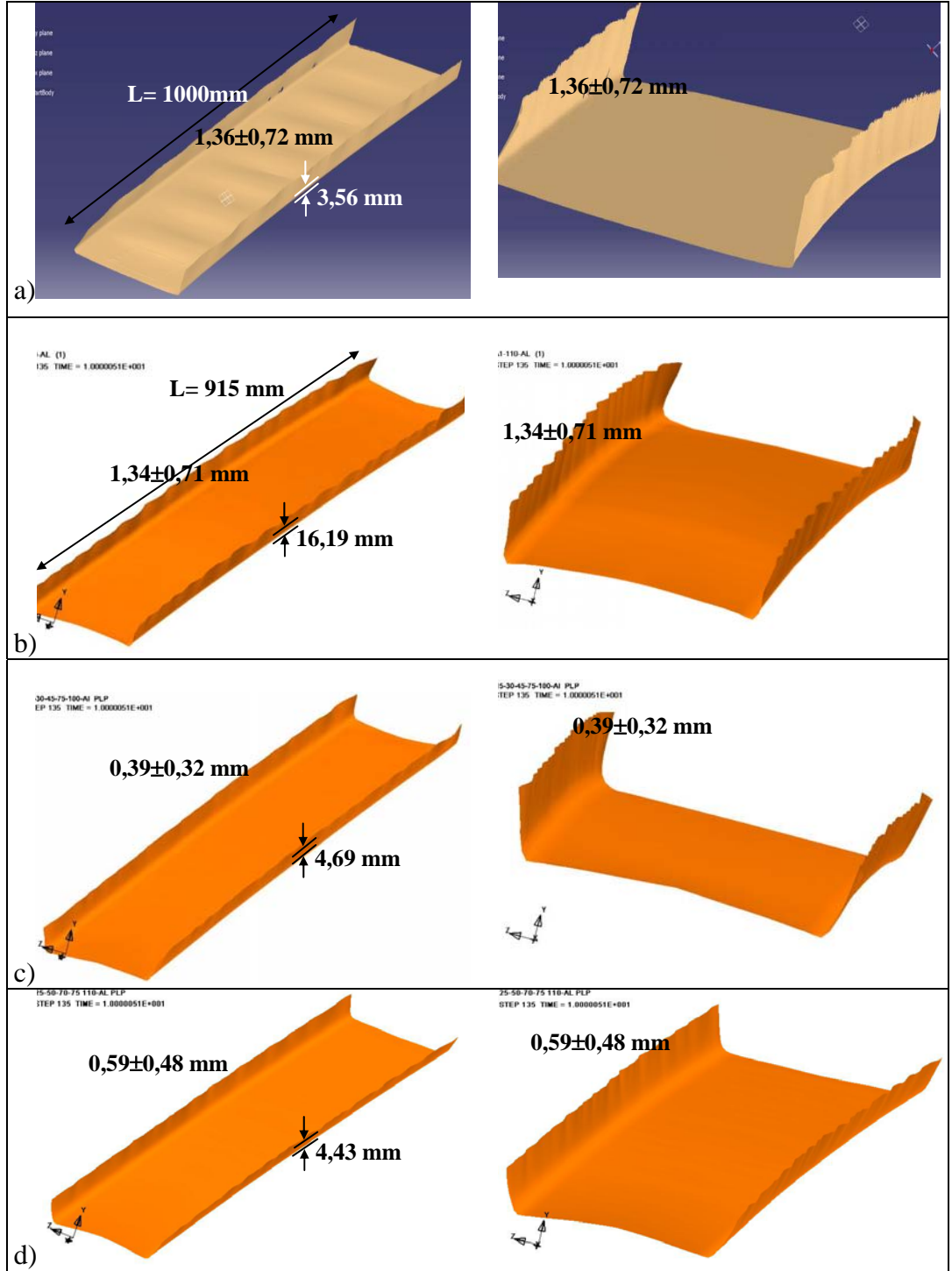
Elde edilen sonuçlardan son makara seti girişinde sac kenar ucunda maksimum gerinimler görülmektedir. Bu oranlar kritik değerleri aştığı için kalıcı uzamalar yaratmaktadır. Şekillendirme şartları iyileştikçe (makara setleri arasındaki açı düştükçe) bu alanlarda küçülme gözlenmektedir.

Sonuçlarda gözlenen sac kenar ucundaki uzamaları dengeleyen basma alanları hemen kenar uzamalarının hemen altında makara girişinden önce görülmektedir. Ayrıca makaraların eksenleri hizasında taban alanında da basma kuvvetleri önemli ölçüde gözlenmektedir. Bunlara karşılık gelen uzama oranlarının A2-110 kombinasyonlarında olduğu gibi ağır şartlarda kritik uzama oranlarının üzerinde ve daha geniş bir alanda gözlenmektedir.

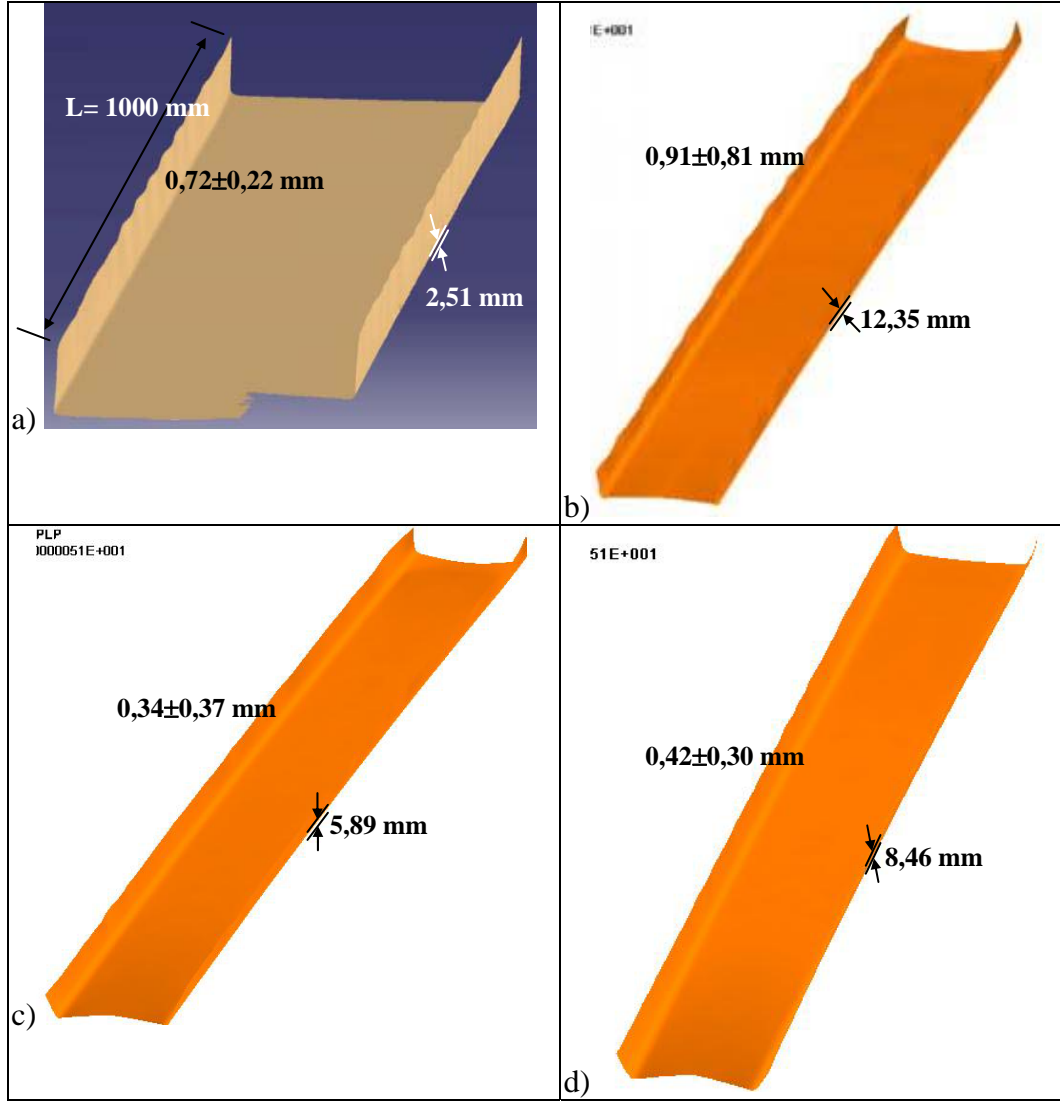
Bir başka gözlenen değer ise kenar bükme etkisinin taban alana etkisidir. Son makara seti (85°) girişinde taban alanında elastik burkulma gözlenmektedir. Bu Bhattacharyya ve Smith'in gözlemleri ile de uyumludur [7]. Sonuçlarda Watari ve Ona'nın, Seneyake ve diğerlerinin, Tehrani ve diğerlerinin, bahsettikleri, dikey eğim, makara girişinde elastik burkulma gibi etkiler SEA modeli ile yapılan çalışmalarda da gözlenmiştir [10,14,24].

İyileştirme modeli ile elde edilen sonuçlar Şekil A.49 ila A.80 arasında sunulmaktadır. Özellikle basma yönünde kuvvetlerin azalması ile sonuçlarda daha keskin iyileşmeler gözlenmiştir.

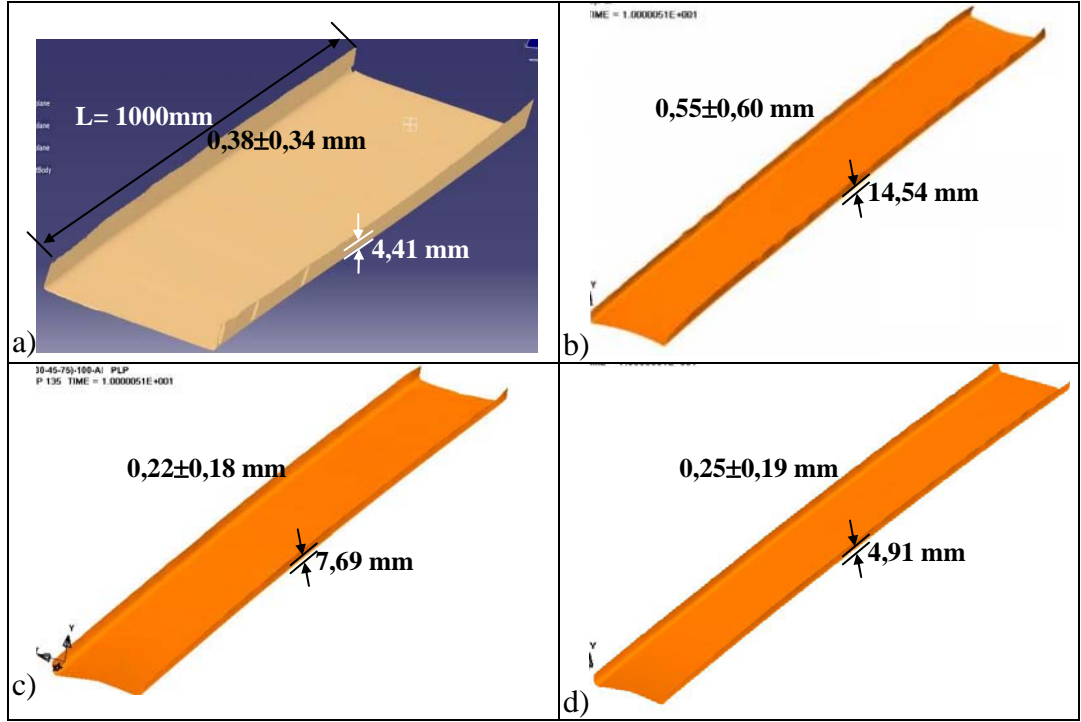
Son kısımda, kenar dalgalanma oluşumunun ve markalı bükme etkilerinin daha iyi anlaşılması değerlendirmeleri yapılan için iç enerji, gerilme ve gerinim grafikleri sunulmuştur.



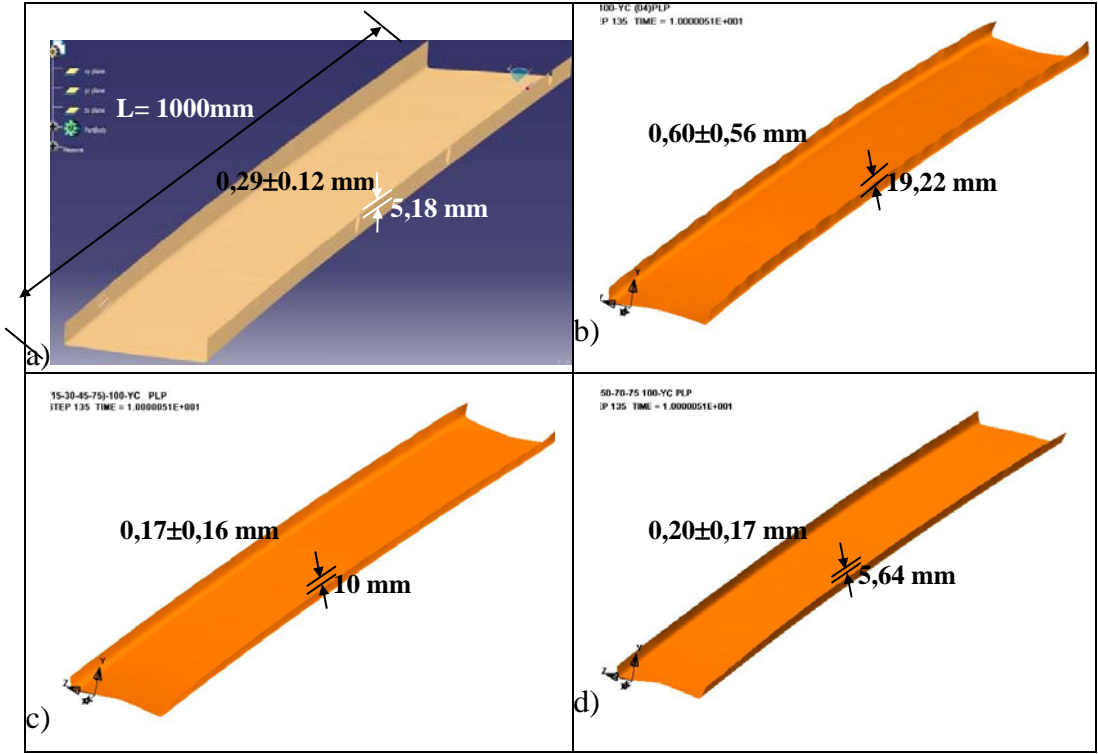
Şekil A.11: 17 mm kenar yüksekliği (110 mm sac genişliği) ve alüminyum malzeme için kenar dalga ortalaması ve standard sapma değeri ($d_{ort} \pm d_{\sigma}$) (solda) ve düşey düzlemde eğim miktarı (sağda), a) Deney sonucu (15° - 30° - 45° - 85° makara dizilişi için), b) Deney ile aynı makara dizilişi ile elde edilmiş SEA sonucu, c) 15° - 30° - 45° - 75° makara dizilişine sahip SEA iyileştirme modeli sonucu, d) 25° - 50° - 70° - 75° makara dizilişine sahip SEA iyileştirme modeli sonucu



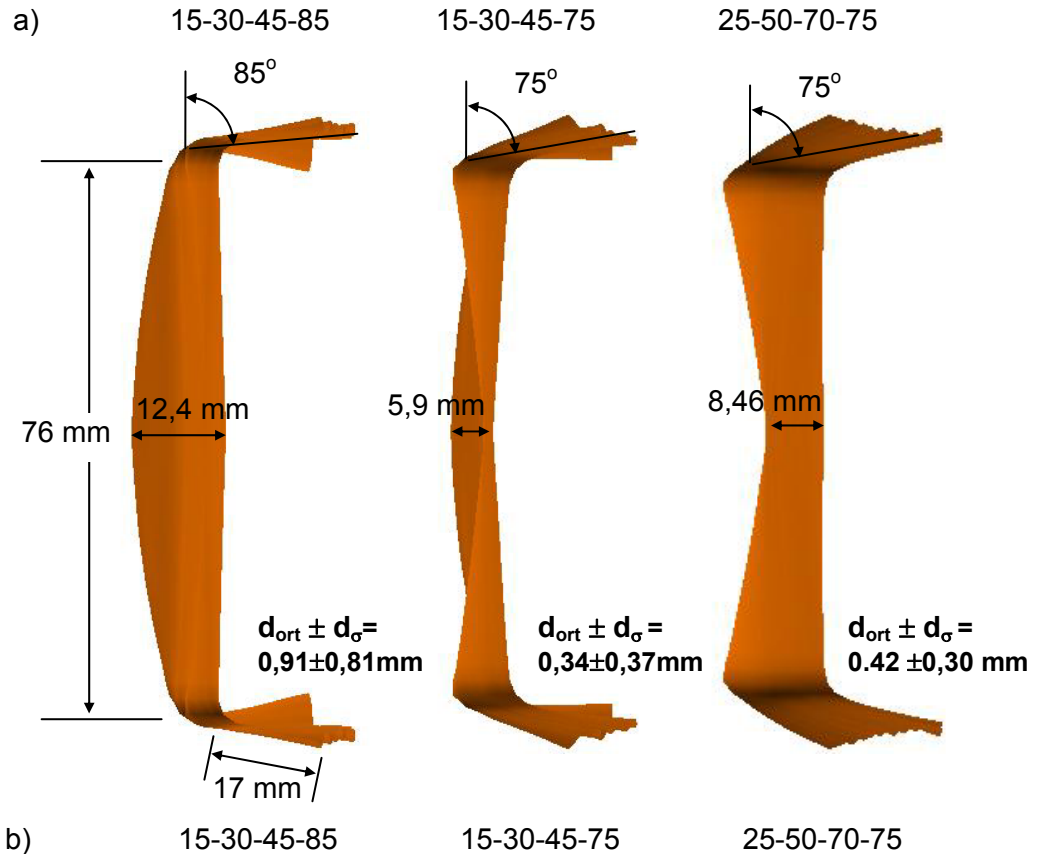
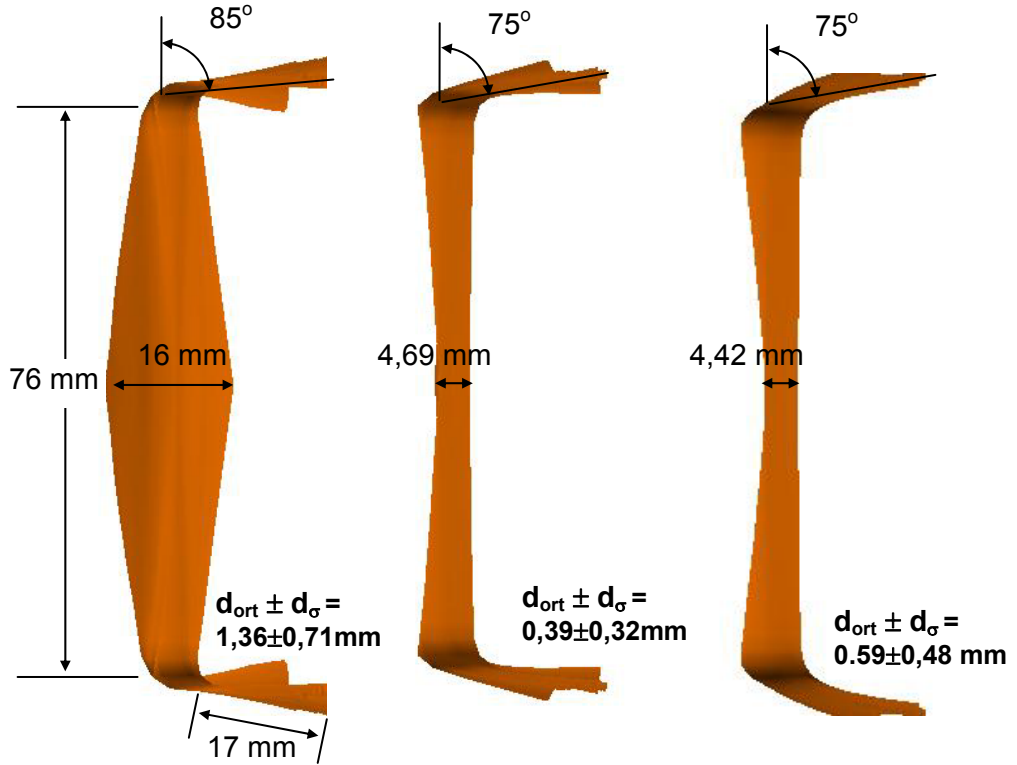
Şekil A.12: 17 mm kenar yüksekliği (110 mm sac genişliği) ve sünek çelik malzeme için kenar dalga ortalaması ve standard sapma değeri ($d_{ort} \pm d_{\sigma}$) (solda) ve düşey düzlemde eğim miktarı (sağda) (a) Deney sonucu (15° - 30° - 45° - 85° makara dizilişi için), (b) Deney ile aynı makara dizilişi ile elde edilmiş SEA sonucu, c) 15° - 30° - 45° - 75° makara dizilişine sahip SEA iyileştirme modeli sonucu, d) 25° - 50° - 70° - 75° makara dizilişine sahip SEA iyileştirme modeli sonucu



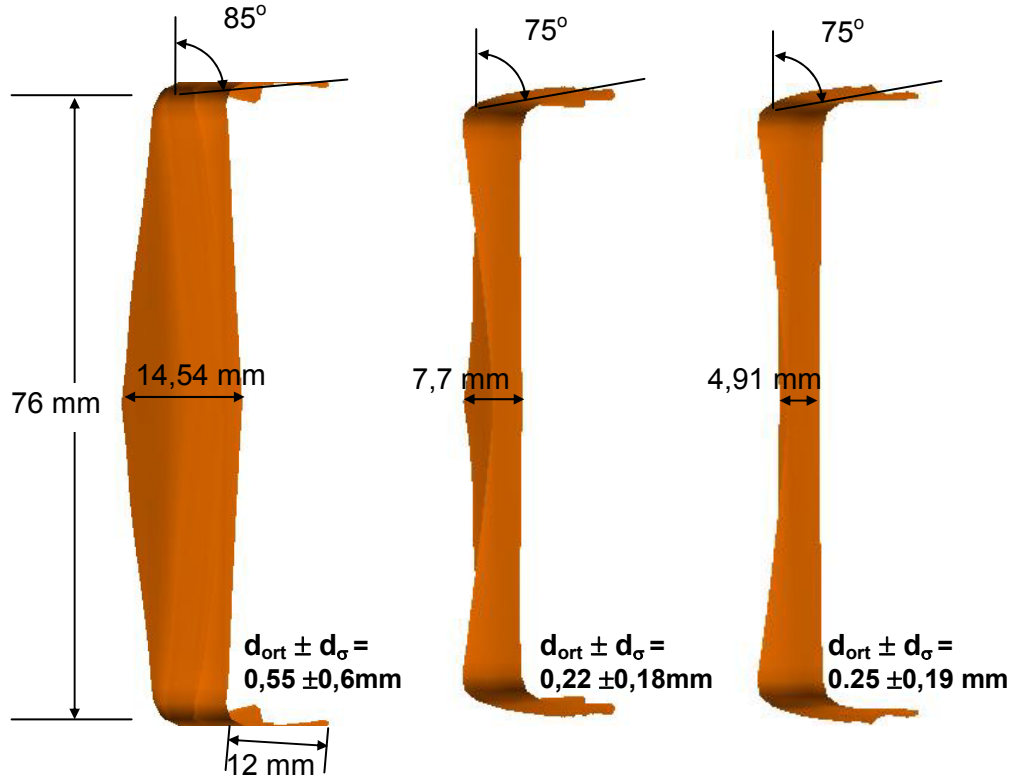
Şekil A.13: 12 mm kenar yüksekliği (100 mm sac genişliği) ve alüminyum malzeme için kenar dalga ortalaması ve standard sapma değeri ($d_{\text{ort}} \pm d_{\sigma}$) (solda) ve düşey düzlemde eğim miktarı (sağda) (a) Deney sonucu ($15^\circ-30^\circ-45^\circ-85^\circ$ makara dizilişi için), (b) Deney ile aynı makara dizilişi ile elde edilmiş SEA sonucu, c) $15^\circ-30^\circ-45^\circ-75^\circ$ makara dizilişine sahip SEA iyileştirme modeli sonucu, d) $25^\circ-50^\circ-70^\circ-75^\circ$ makara dizilişine sahip SEA iyileştirme modeli sonucu



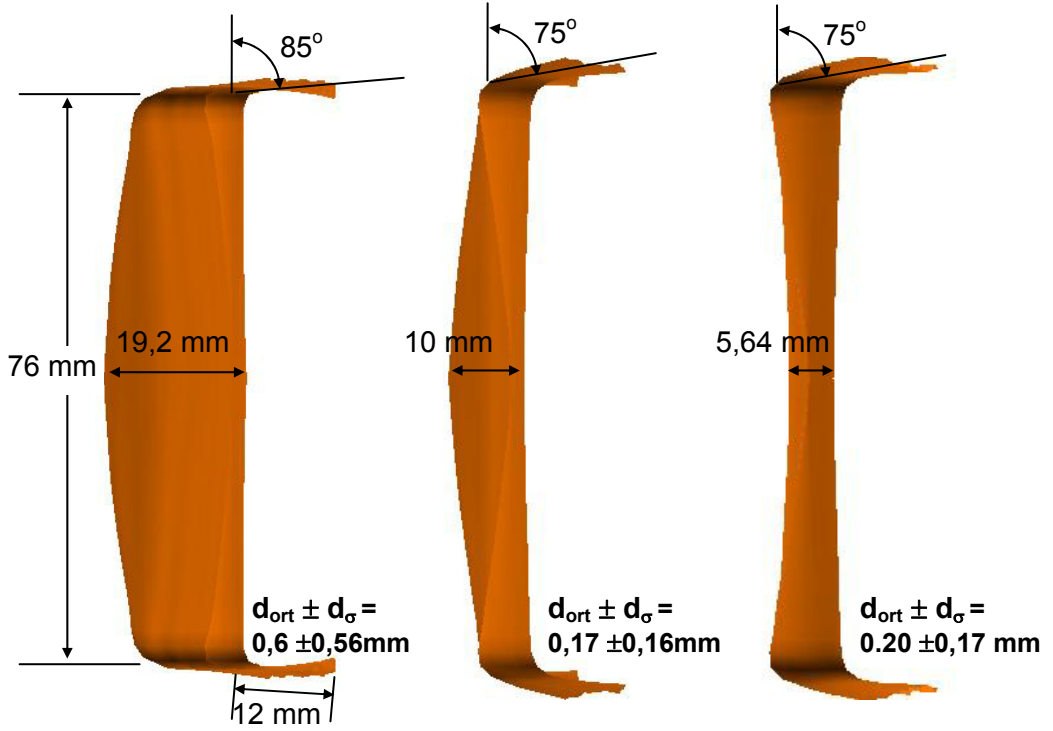
Şekil A.14: 12 mm kenar yüksekliği (100 mm sac genişliği) ve sünek çelik malzeme için kenar dalga ortalaması ve standard sapma değeri ($d_{ort} \pm d_{\sigma}$) (solda) ve düşey düzlemde eğim miktarı (sağda) (a) Deney sonucu (15° - 30° - 45° - 85° makara dizilişi için), (b) Deney ile aynı makara dizilişi ile elde edilmiş SEA sonucu, c) 15° - 30° - 45° - 75° makara dizilişine sahip SEA iyileştirme modeli sonucu, d) 25° - 50° - 70° - 75° makara dizilişine sahip SEA iyileştirme modeli sonucu



Şekil A.15: a) 110 mm sac genişliği ve alüminyum malzeme için makara kombinasyonlarına göre elde edilen profillerin y-z düzleminde gösterimi, b) 110 mm sac genişliği ve sünek çelik malzeme için makara kombinasyonlarına göre elde edilen profillerin y-z düzleminde gösterimi

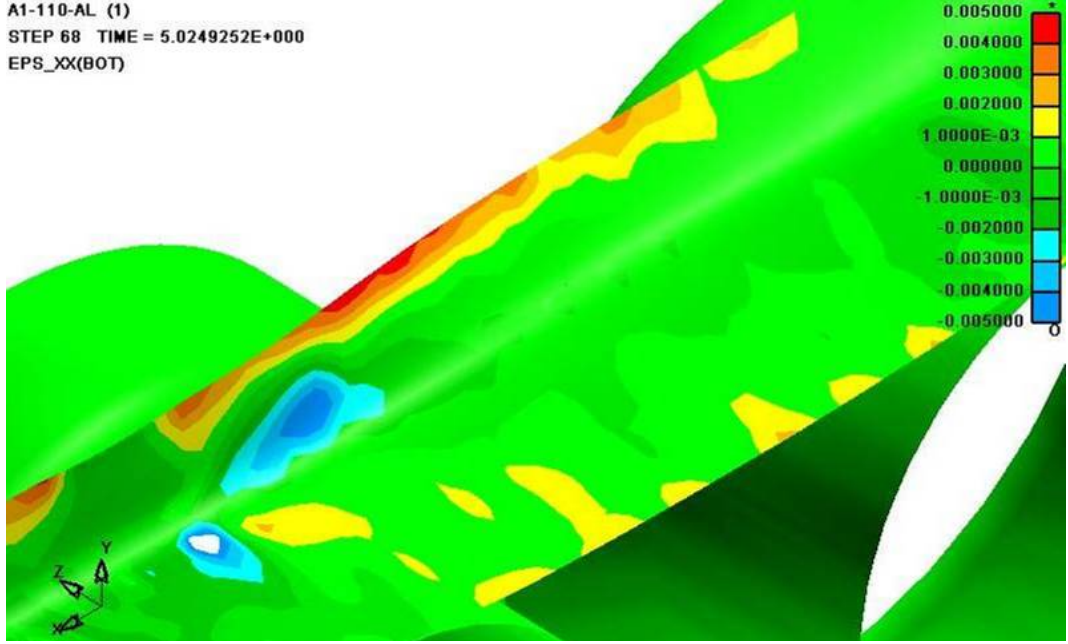


a) 15-30-45-85 15-30-45-75 25-50-70-75

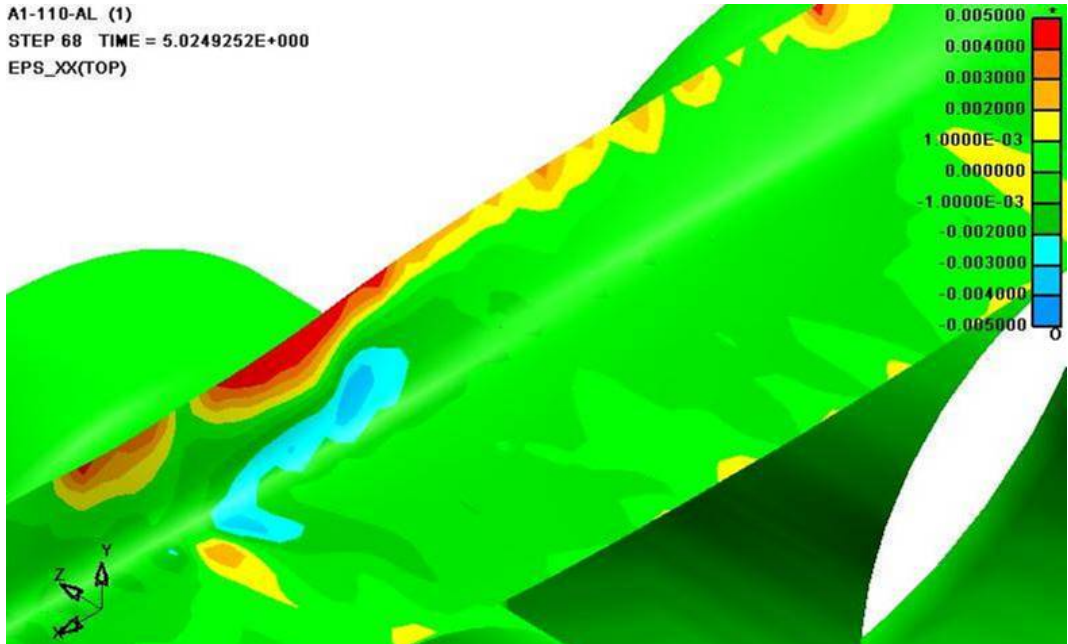


b) 15-30-45-85 15-30-45-75 25-50-70-75

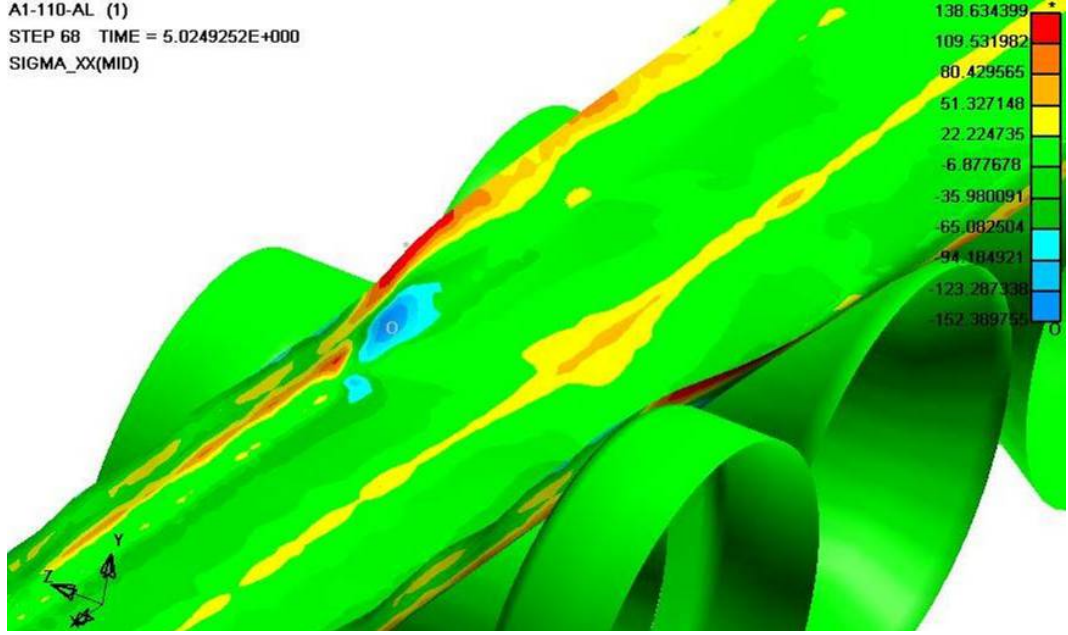
Şekil A.16: a) 100 mm sac genişliği ve alüminyum malzeme için makara kombinasyonlarına göre elde edilen profillerin y-z düzleminde gösterimi, b) 100 mm sac genişliği ve sünek çelik malzeme için makara kombinasyonlarına göre elde edilen profillerin y-z düzleminde gösterimi



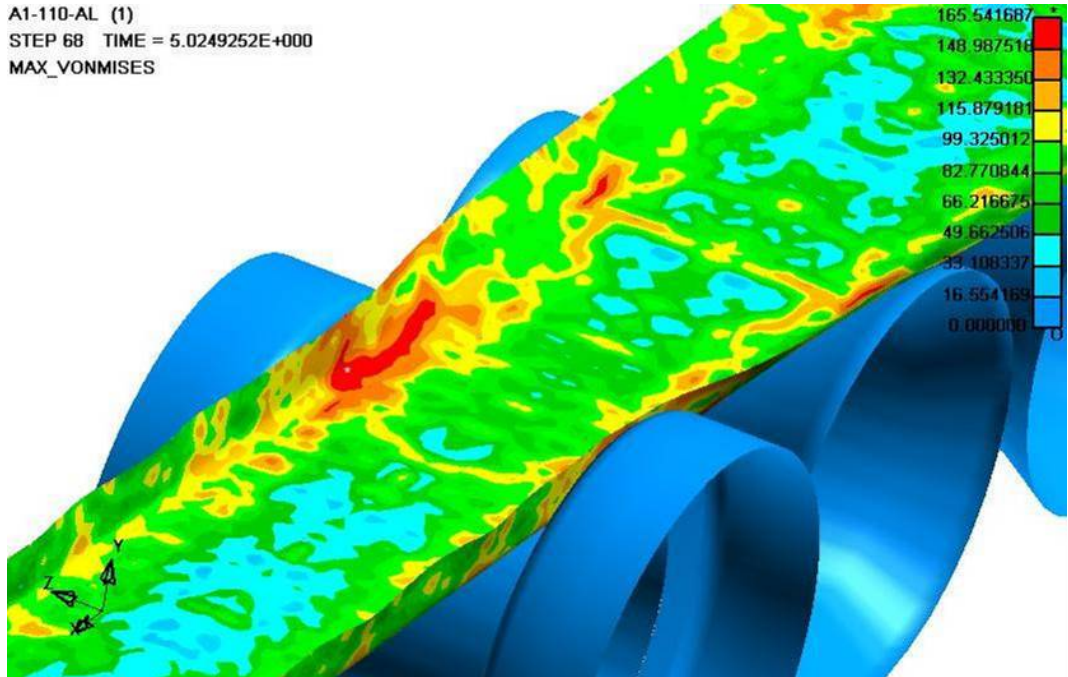
Şekil A.17: A1-110mm-Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (alt yüzey) (t=5s)



Şekil A.18: A1-110mm-Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (üst yüzey) (t= 5s)

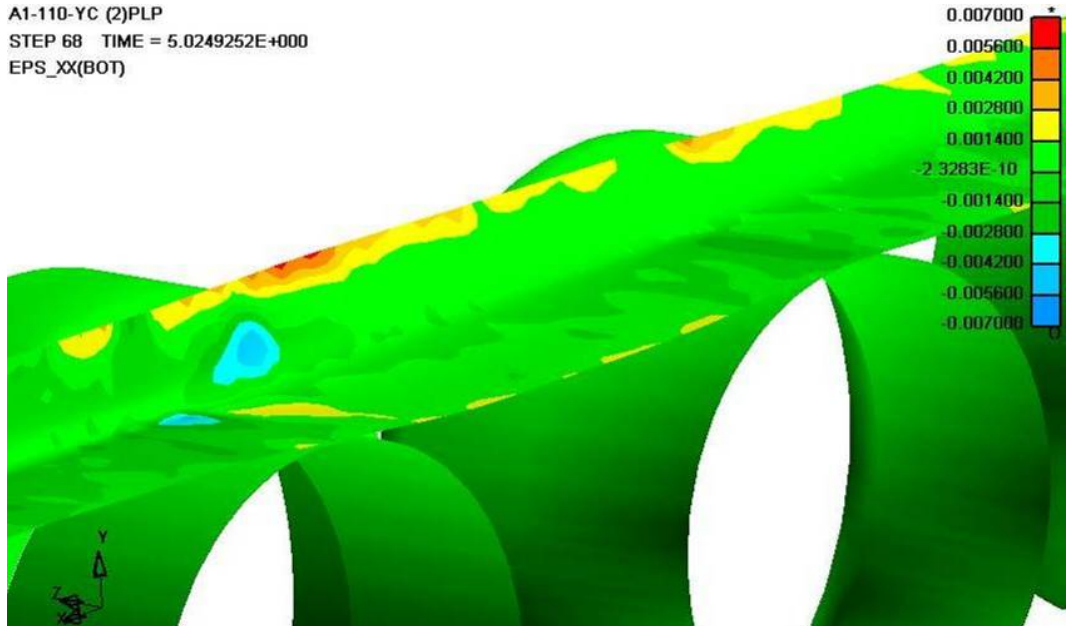


Şekil A.19: A1-110mm-Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası x-yönünde gerilme dağılımı (orta katman) (t= 5s)



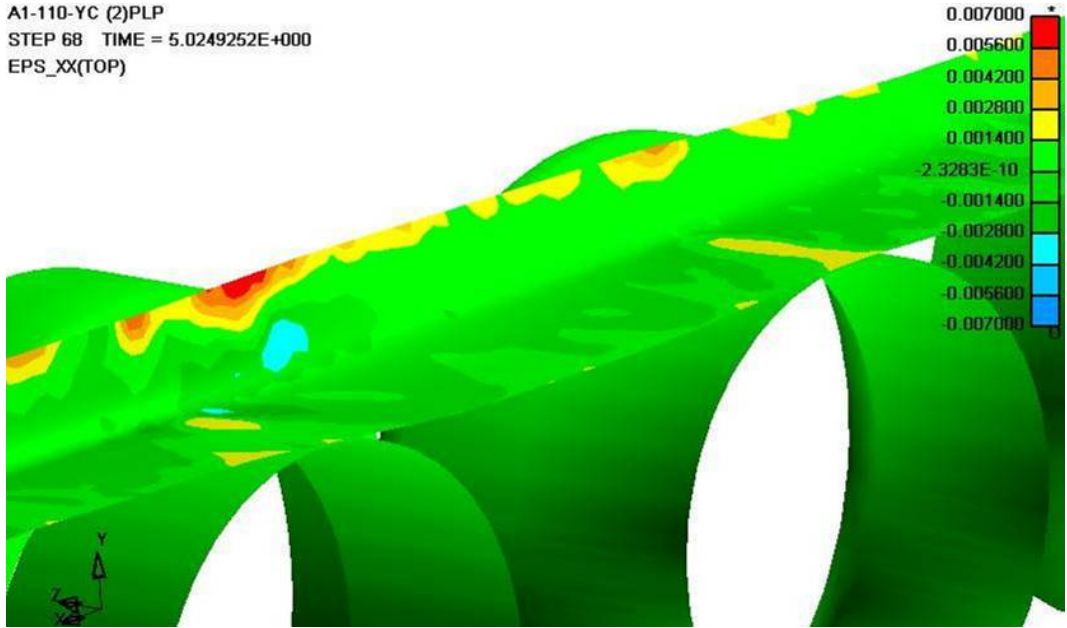
Şekil A.20: A1-110mm-Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası maksimum Von Misses gerilme dağılımı (t= 5s)

A1-110-YC (2)PLP
STEP 68 TIME = 5.0249252E+000
EPS_XX(BOT)

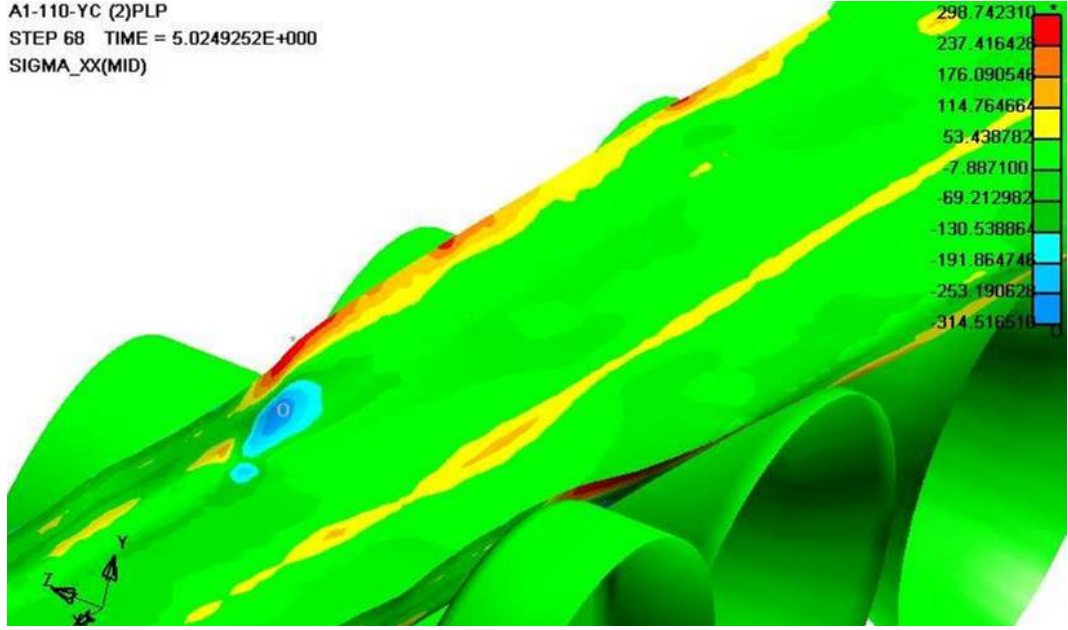


Şekil A.21: A1-110mm-Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (alt yüzey) (t= 5s)

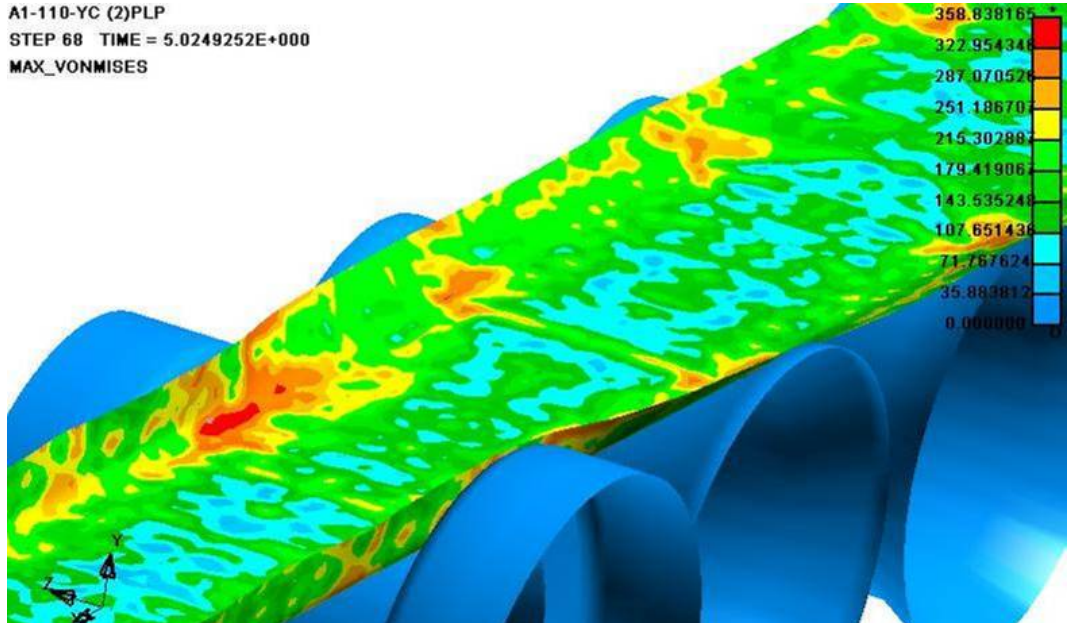
A1-110-YC (2)PLP
STEP 68 TIME = 5.0249252E+000
EPS_XX(TOP)



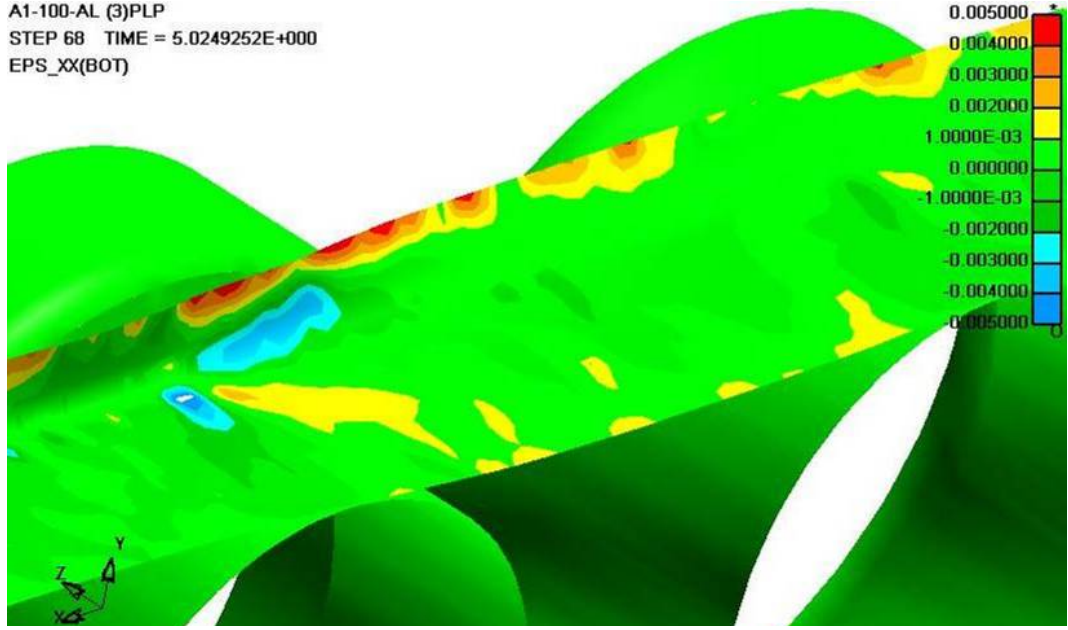
Şekil A.22: A1-110mm-Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (üst yüzey) (t= 5s)



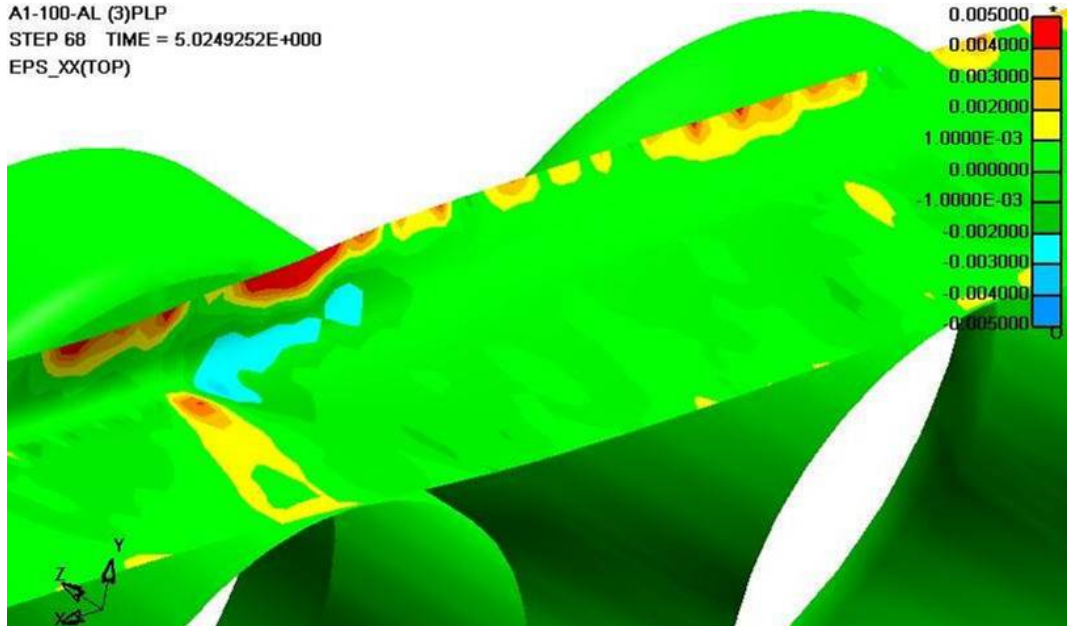
Şekil A.23: A1-110mm-Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası x-yönünde gerilme dağılımı (t= 5s)



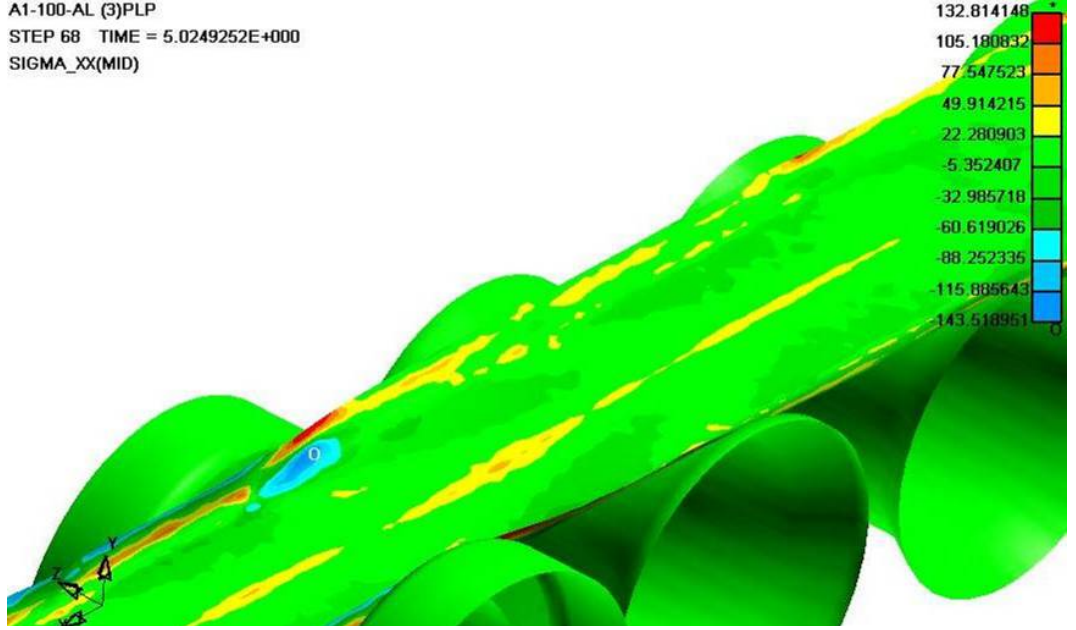
Şekil A.24: A1-110mm-Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası maksimum Von Mises gerilme dağılımı (t= 5s)



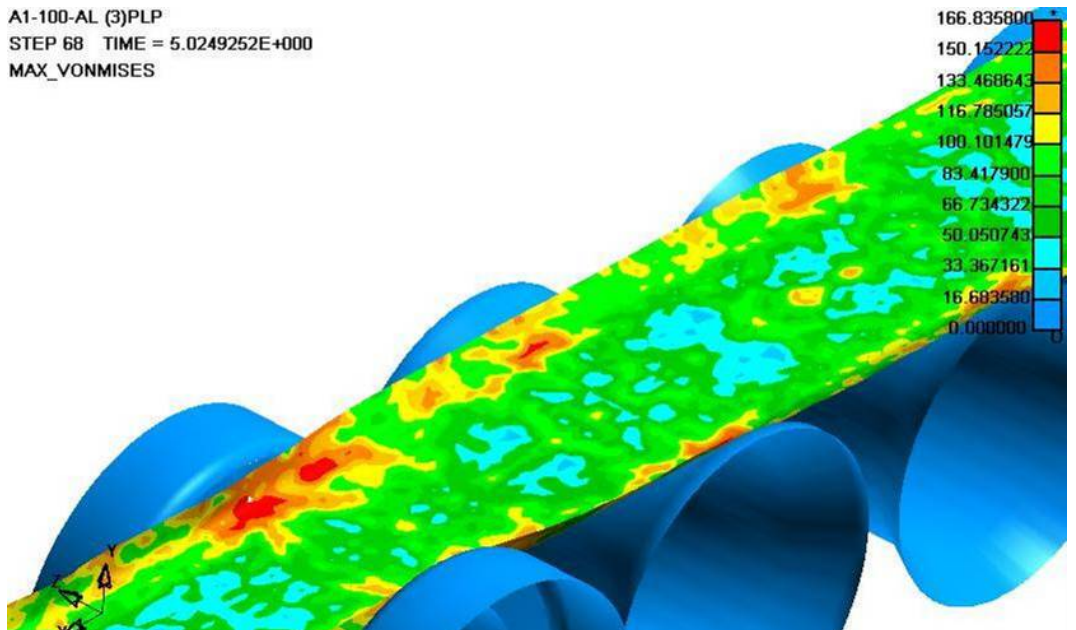
Şekil A.25: A1-100mm-Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (alt yüzey) (t= 5s)



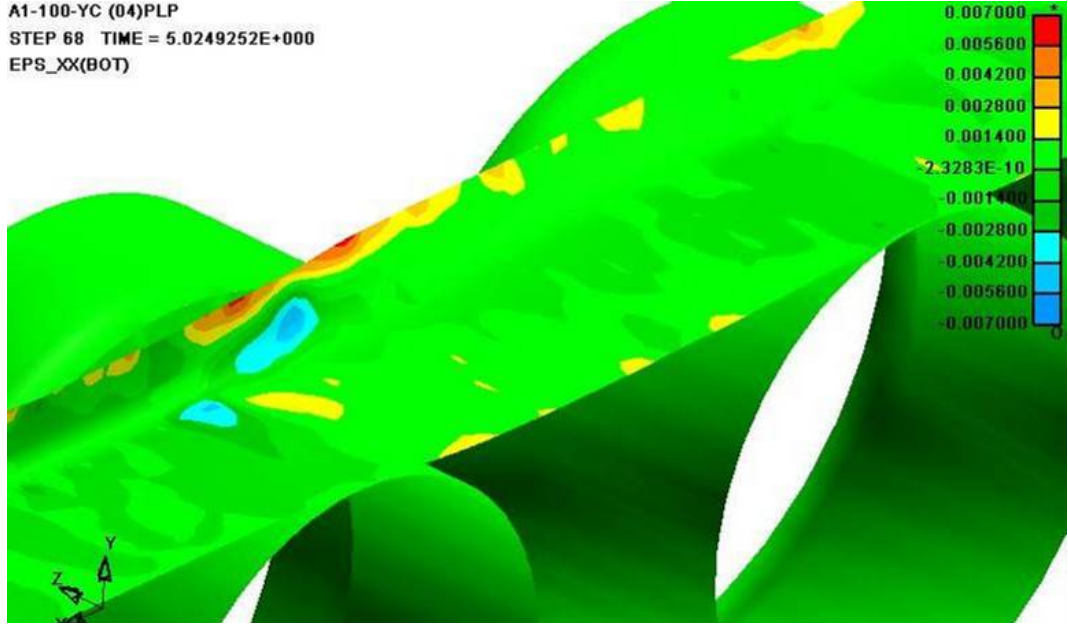
Şekil A.26: A1-100mm-Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (üst yüzey) (t= 5s)



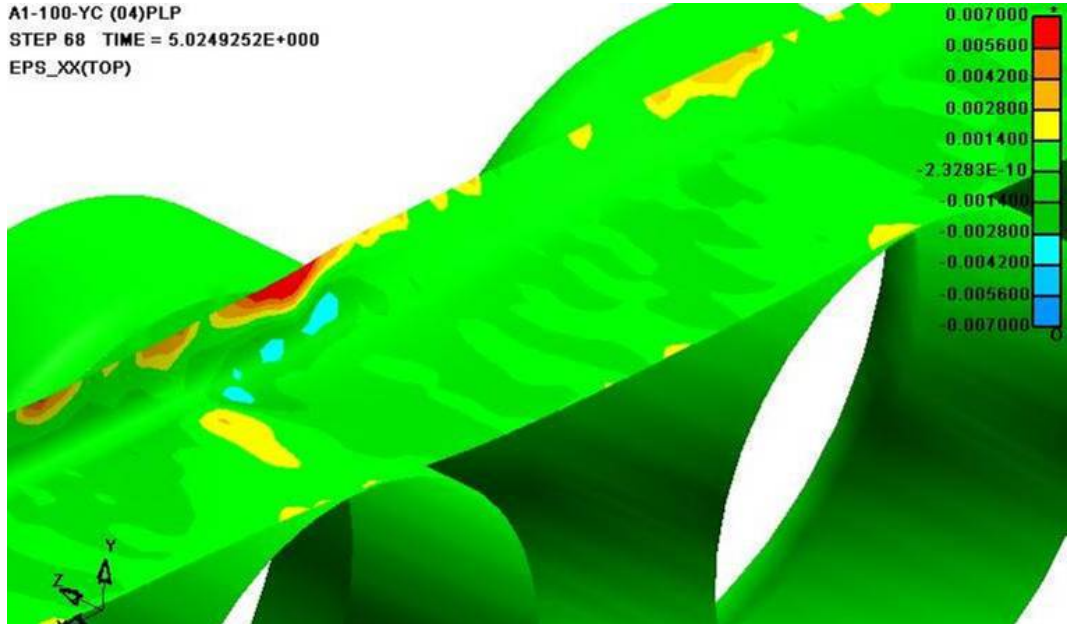
Şekil A.27: A1-100mm-Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası x-yönünde gerilme dağılımı (t= 5s)



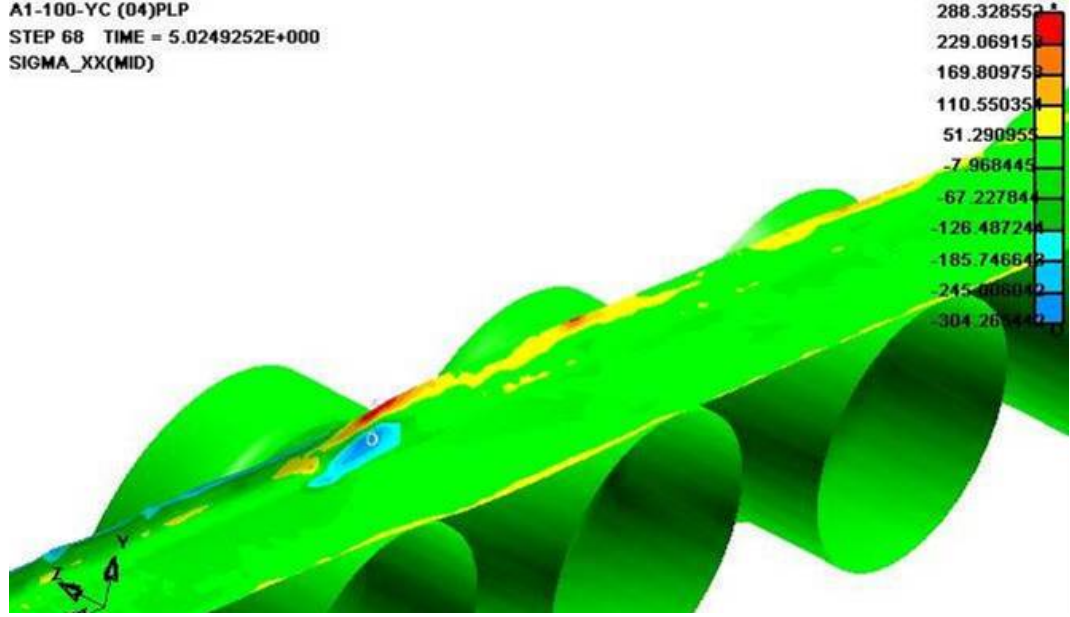
Şekil A.28: A1-100mm-Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası maksimum Von Mises gerilme dağılımı (t= 5s)



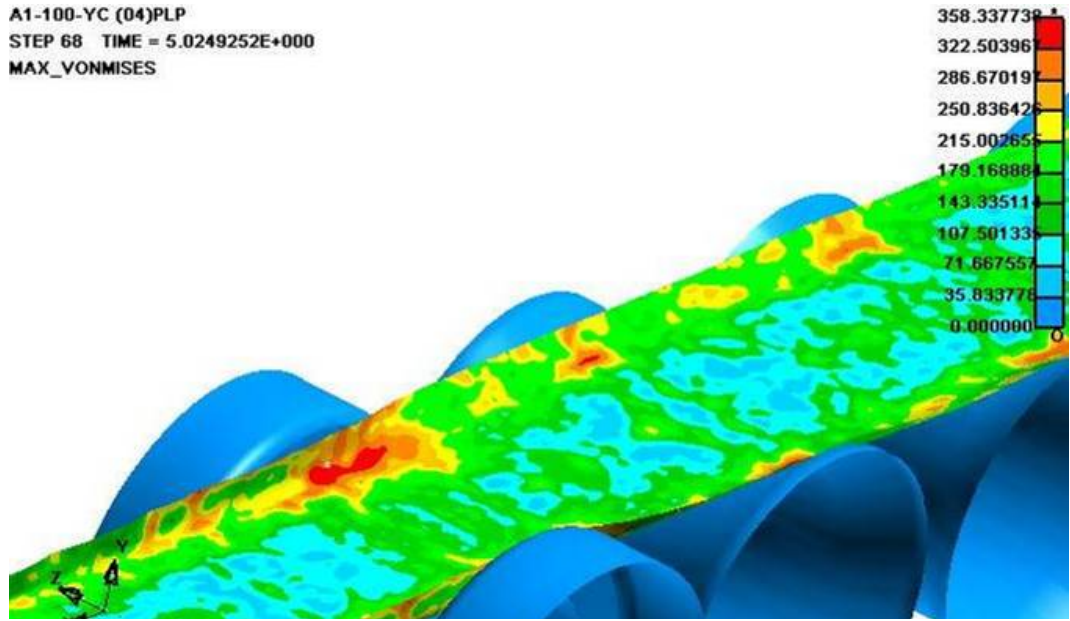
Şekil A.29: A1-100mm-Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (alt yüzey) (t= 5s)



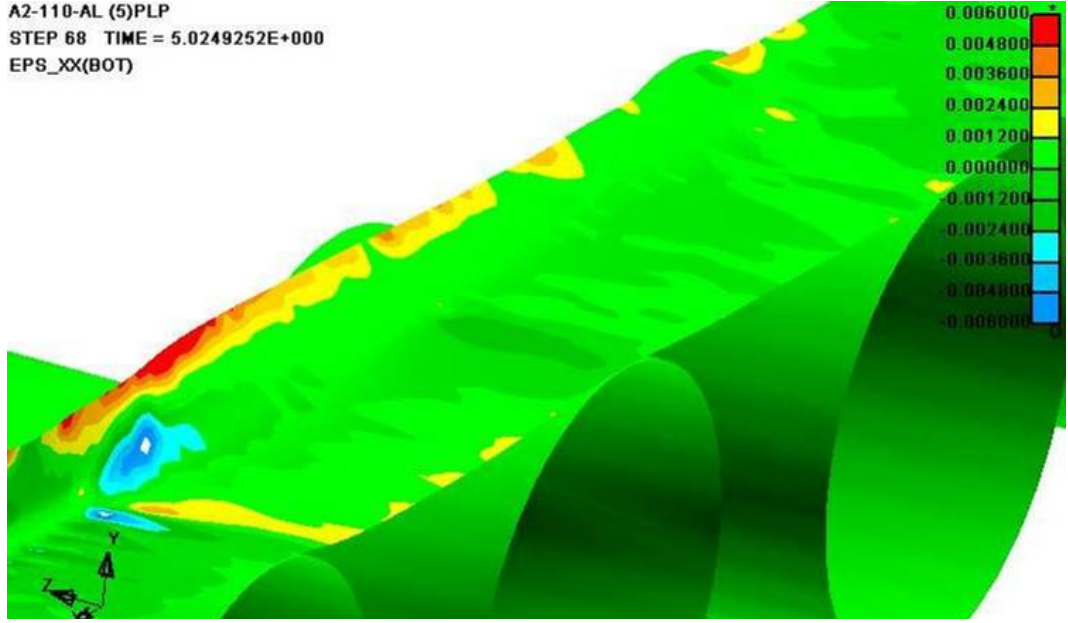
Şekil A.30: A1-100mm-Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (üst yüzey) (t= 5s)



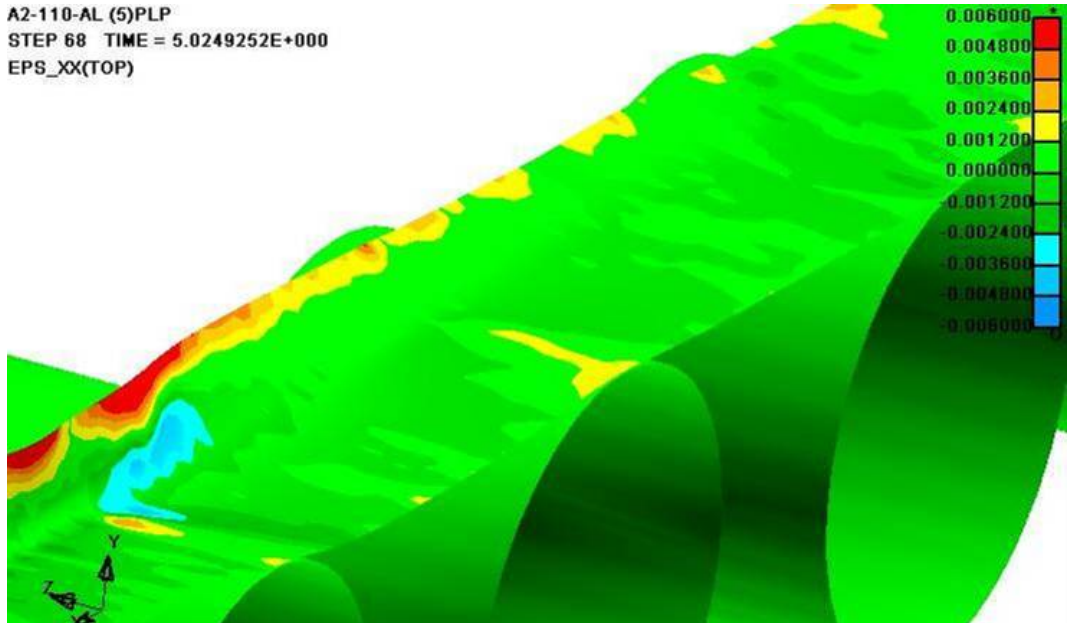
Şekil A.31: A1-100mm-Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası x-yönünde gerilme dağılımı (t= 5s)



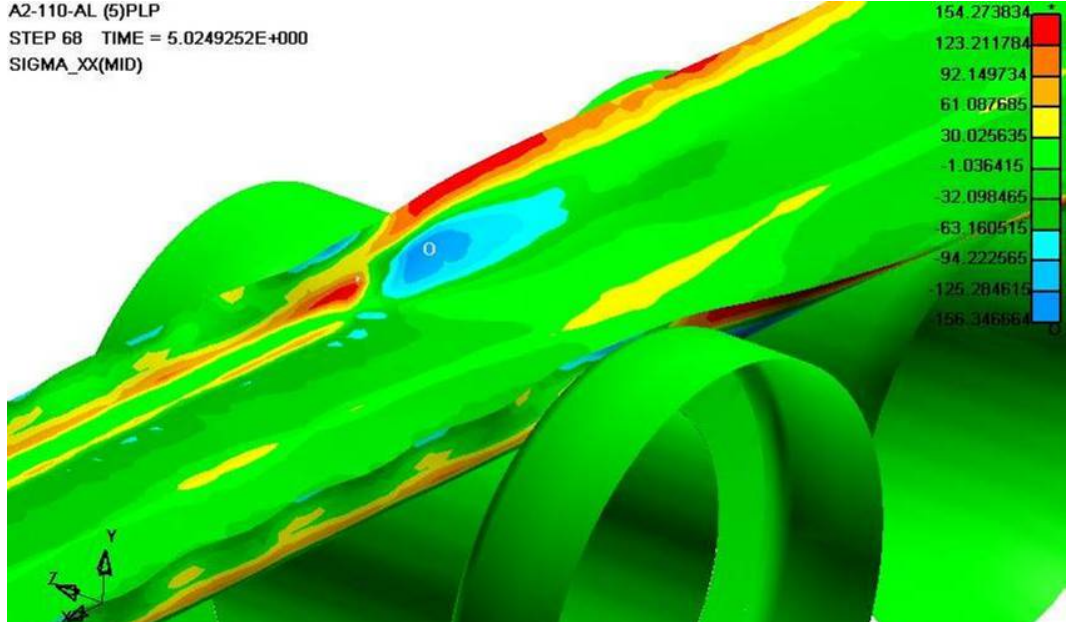
Şekil A.32: A1-100mm-Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası maksimum Von Misses gerilme dağılımı (t= 5s)



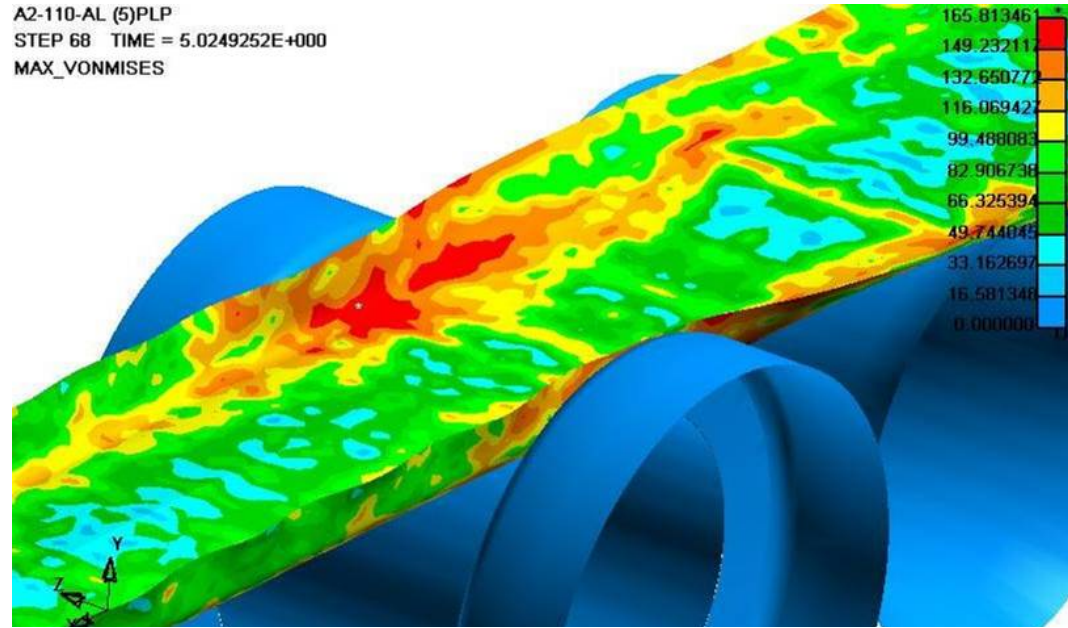
Şekil A.33: A2-110mm-Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (alt yüzey) (t= 5s)



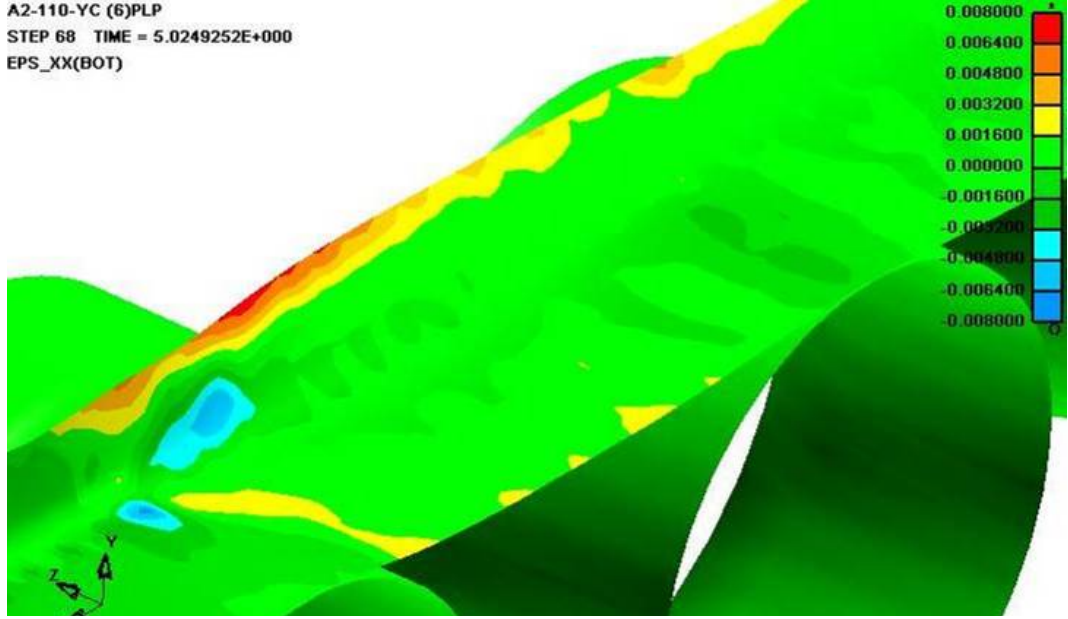
Şekil A.34: A2-110mm-Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (üst yüzey) (t= 5s)



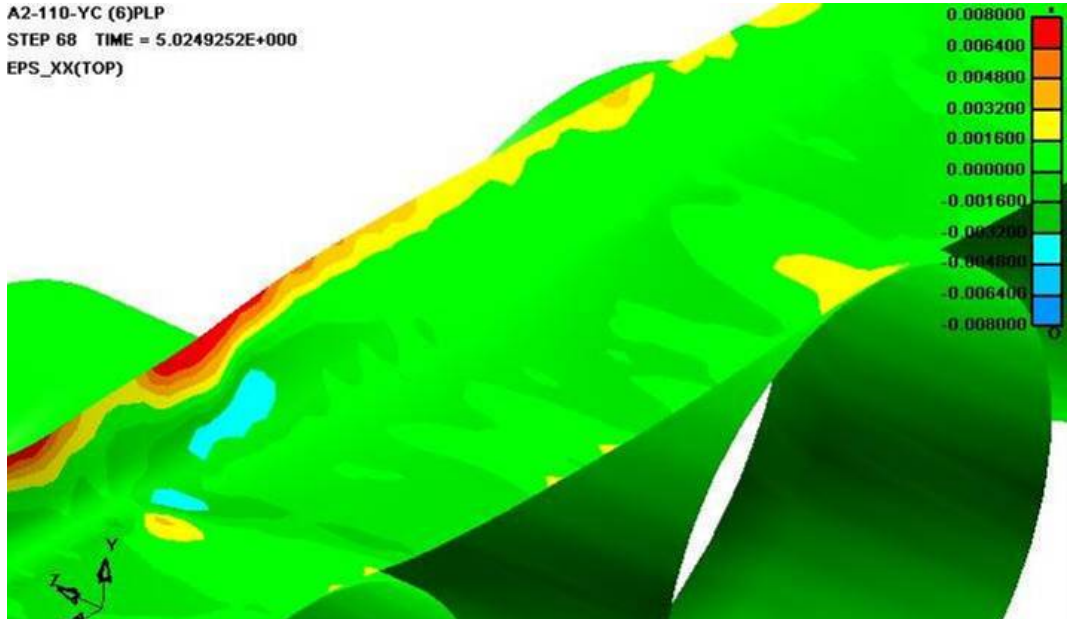
Şekil A.35: A2-110mm-Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası x-yönünde gerilme dağılımı (t= 5s)



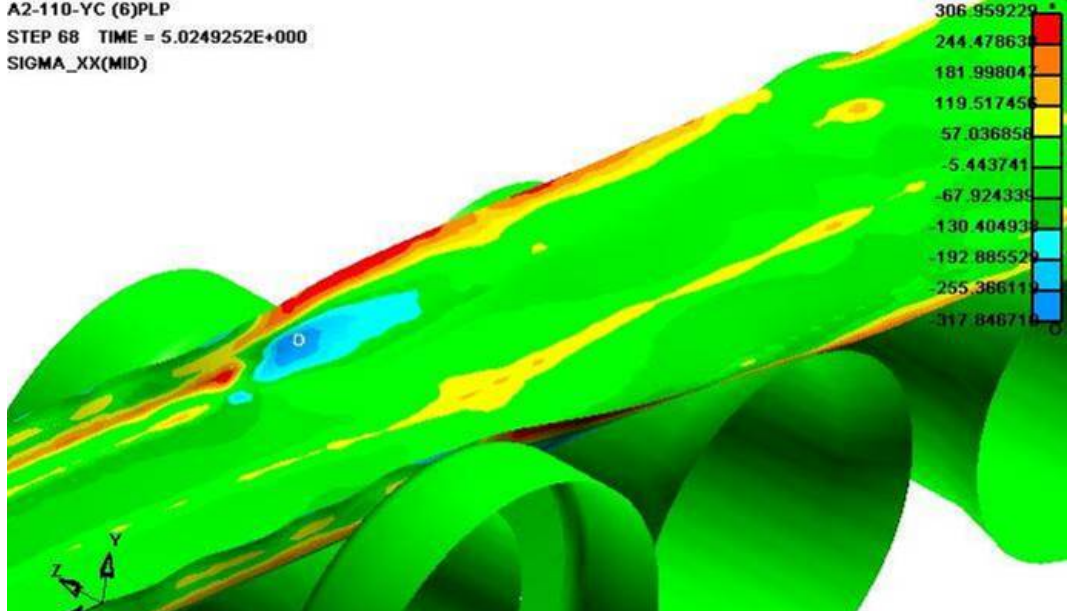
Şekil A.36: A2-110mm-Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası maksimum Von Mises gerilme dağılımı (t= 5s)



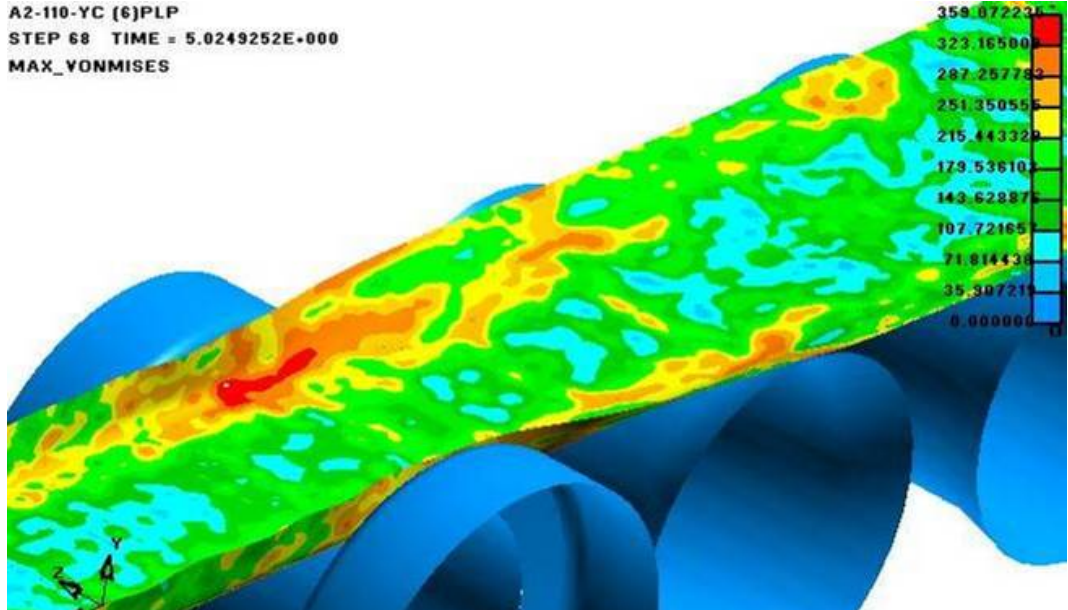
Şekil A.37: A2-110mm –Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (alt yüzey) (t= 5s)



Şekil A.38: A2-110mm –Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (üst yüzey) (t= 5s)

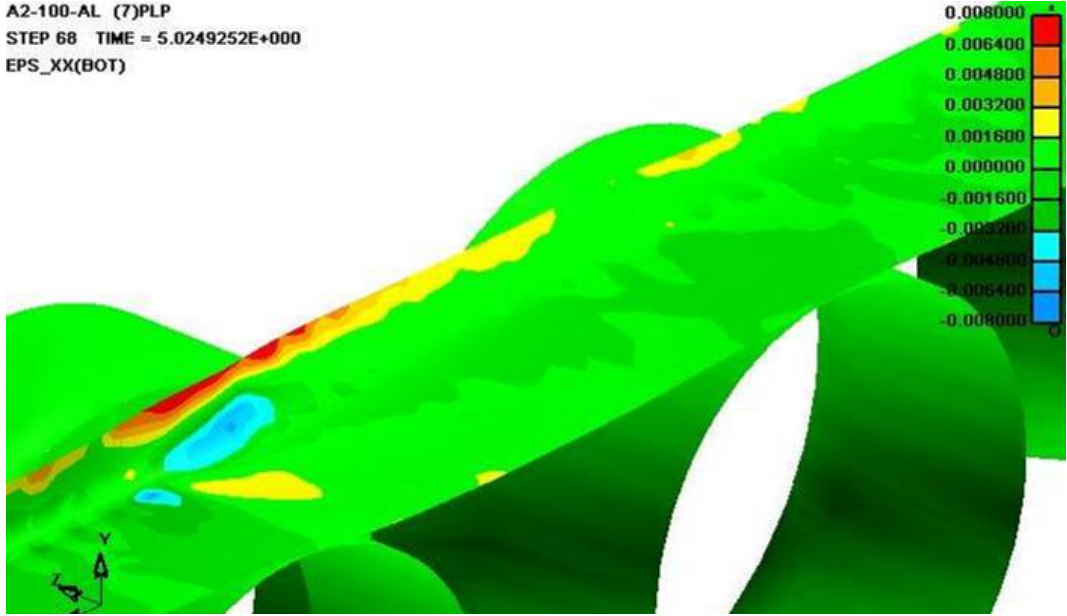


Şekil A.39: A2-110mm –Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası x-yönünde gerilme dağılımı (t= 5s)



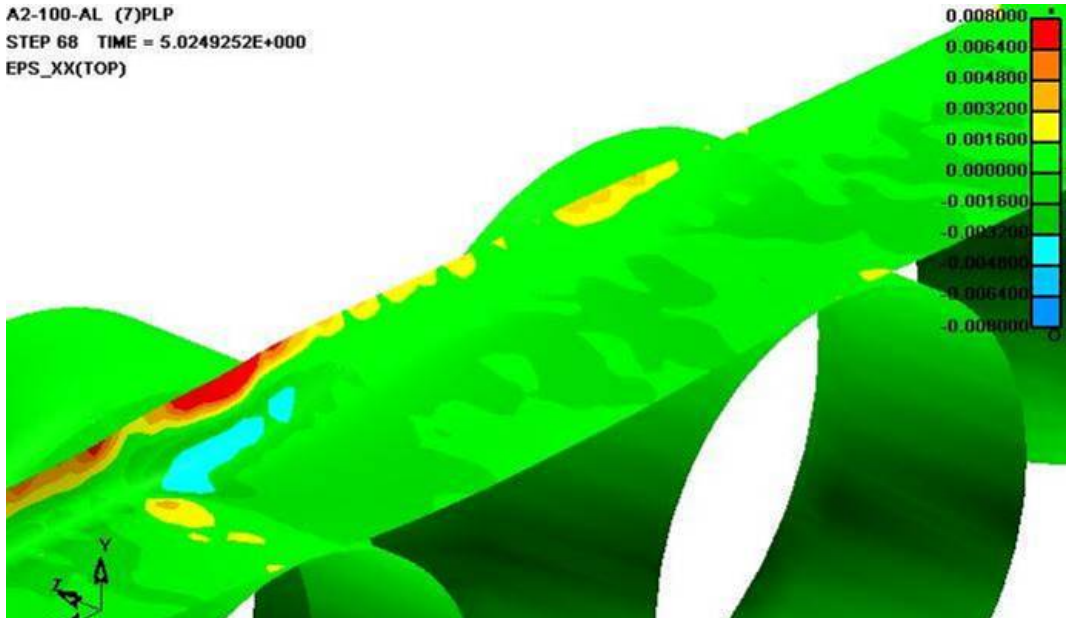
Şekil A.40: A2-110mm –Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası maksimum Von Mises gerilme dağılımı (t= 5s)

A2-100-AL (7)PLP
STEP 68 TIME = 5.0249252E+000
EPS_XX(BOT)



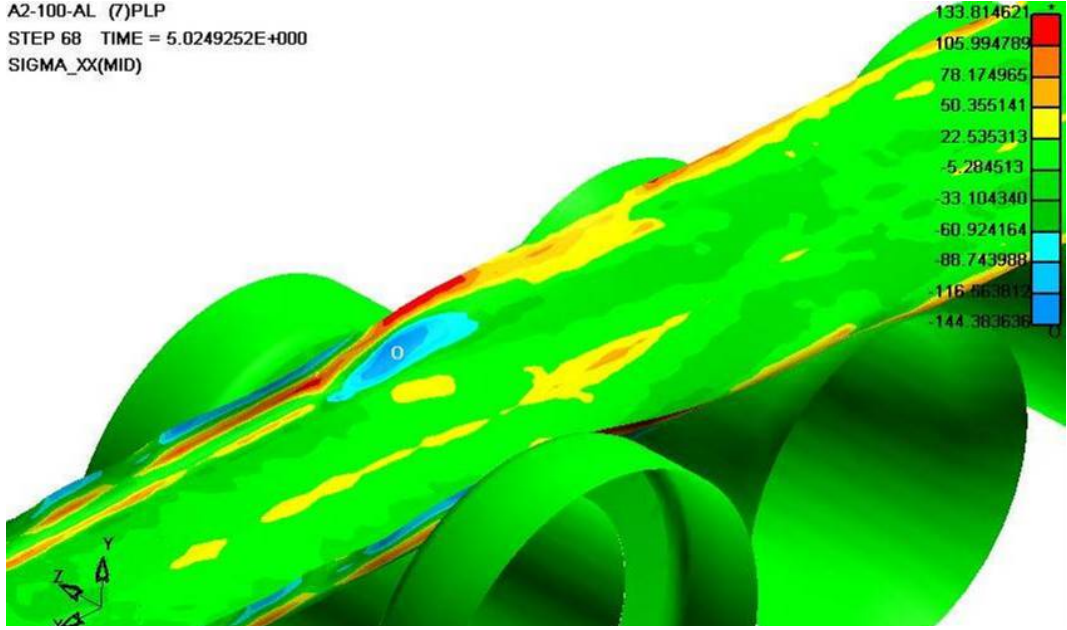
Şekil A.41: A2-100mm-Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (alt yüzey) (t= 5s)

A2-100-AL (7)PLP
STEP 68 TIME = 5.0249252E+000
EPS_XX(TOP)



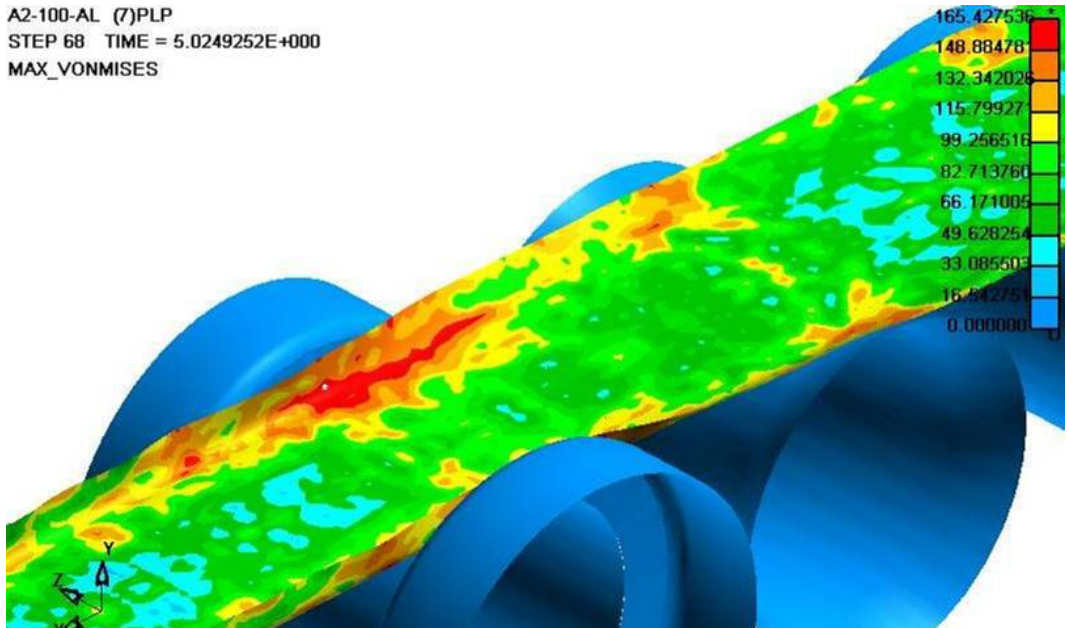
Şekil A.42: A2-100mm-Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (üst yüzey) (t= 5s)

A2-100-AL (7)PLP
STEP 68 TIME = 5.0249252E+000
SIGMA_XX(MID)



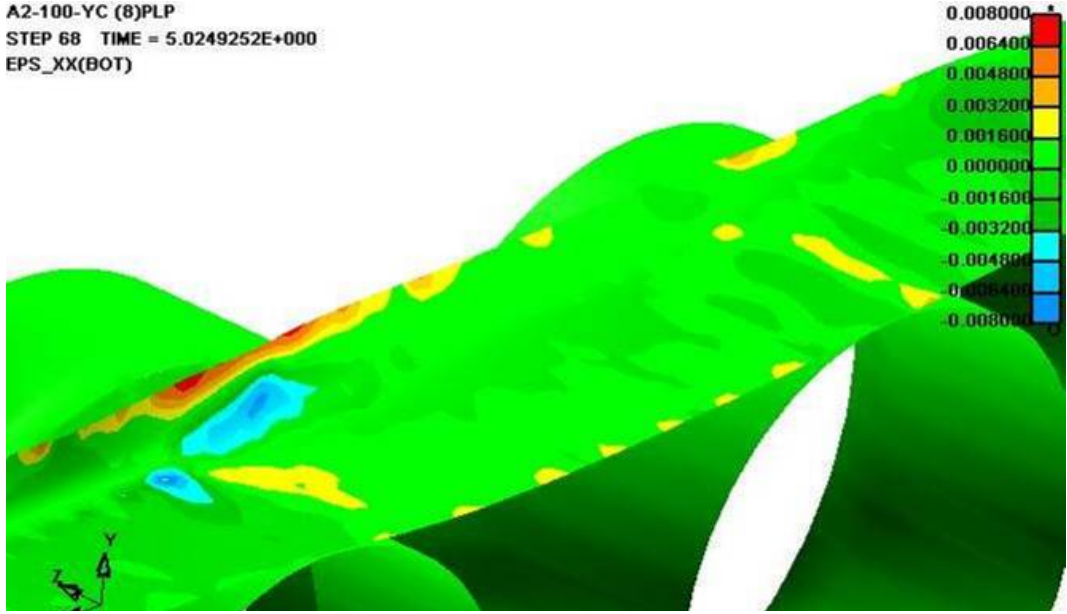
Şekil A.43: A2-100mm-Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası x-yönünde gerilme dağılımı (t= 5s)

A2-100-AL (7)PLP
STEP 68 TIME = 5.0249252E+000
MAX_VONMISES



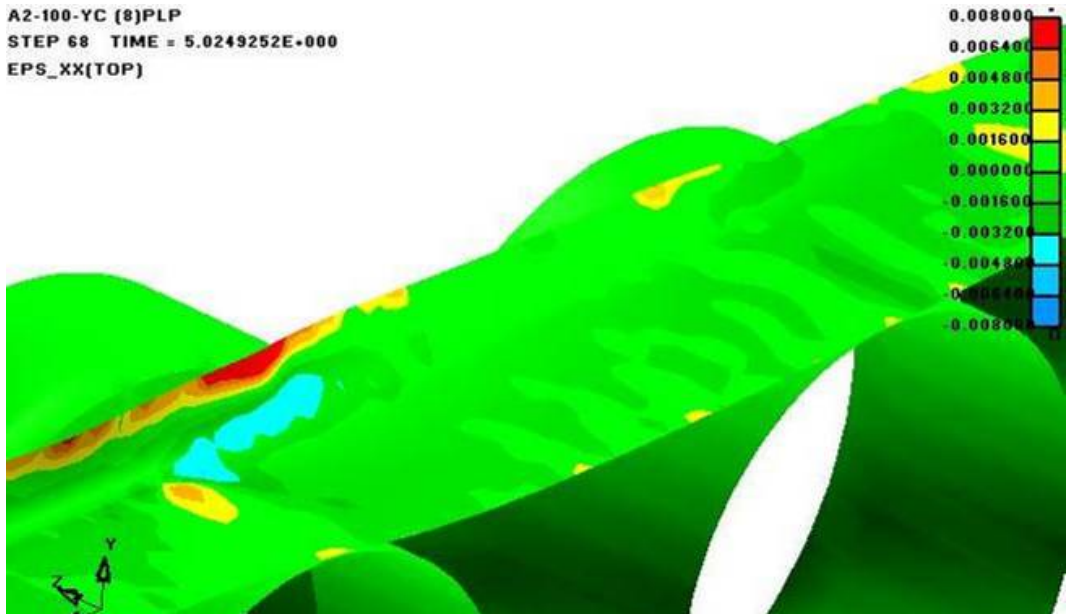
Şekil A.44: A2-100mm-Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası maksimum Von Misses gerilme dağılımı (t= 5s)

A2-100-YC (8)PLP
STEP 68 TIME = 5.0249252E+000
EPS_XX(BOT)

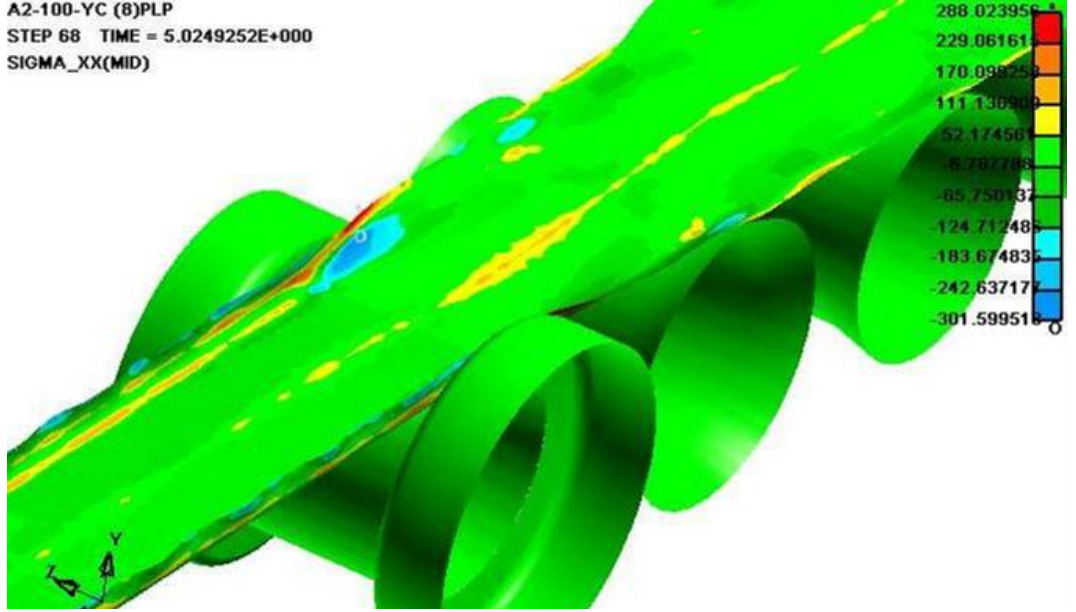


Şekil A.45: A2-100-Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (alt yüzey) (t= 5s)

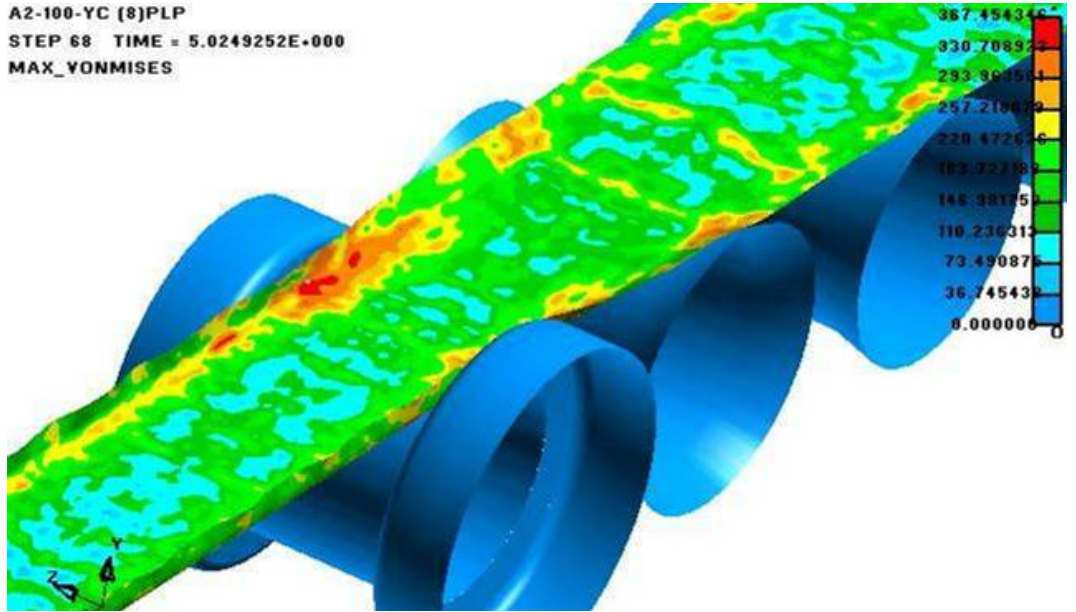
A2-100-YC (8)PLP
STEP 68 TIME = 5.0249252E+000
EPS_XX(TOP)



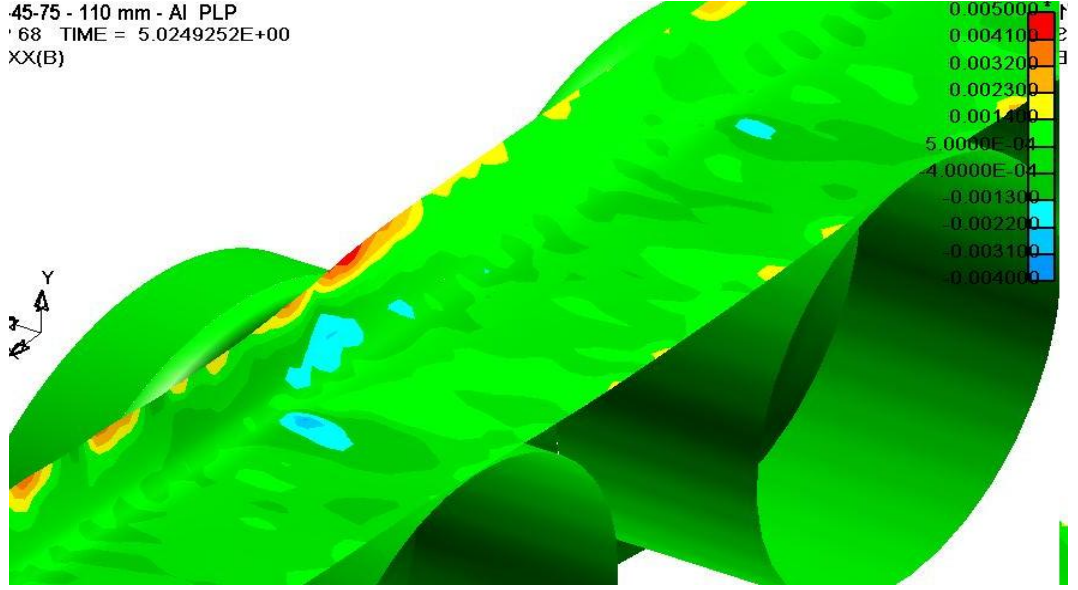
Şekil A.46: A2-100-Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (üst yüzey) (t= 5s)



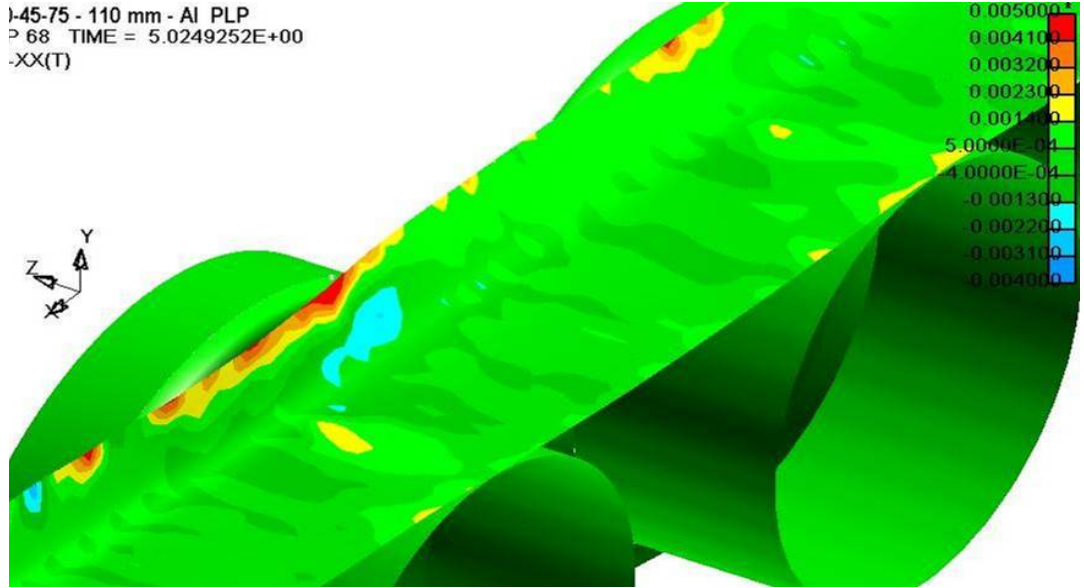
Şekil A.47: A2-100-Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası x-yönünde gerilme dağılımı (t= 5s)



Şekil A.48: A2-100-Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası maksimum Von Mises gerilme dağılımı (t= 5s)

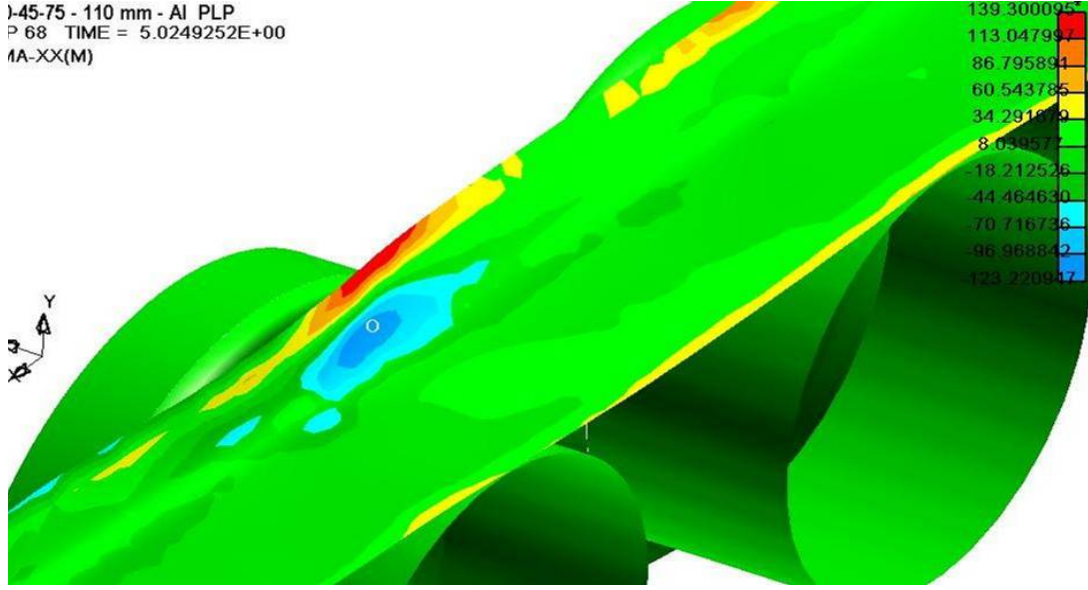


Şekil A.49: 15°-30°-45°-75°- 110 mm - Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (alt yüzey) (t= 5s)



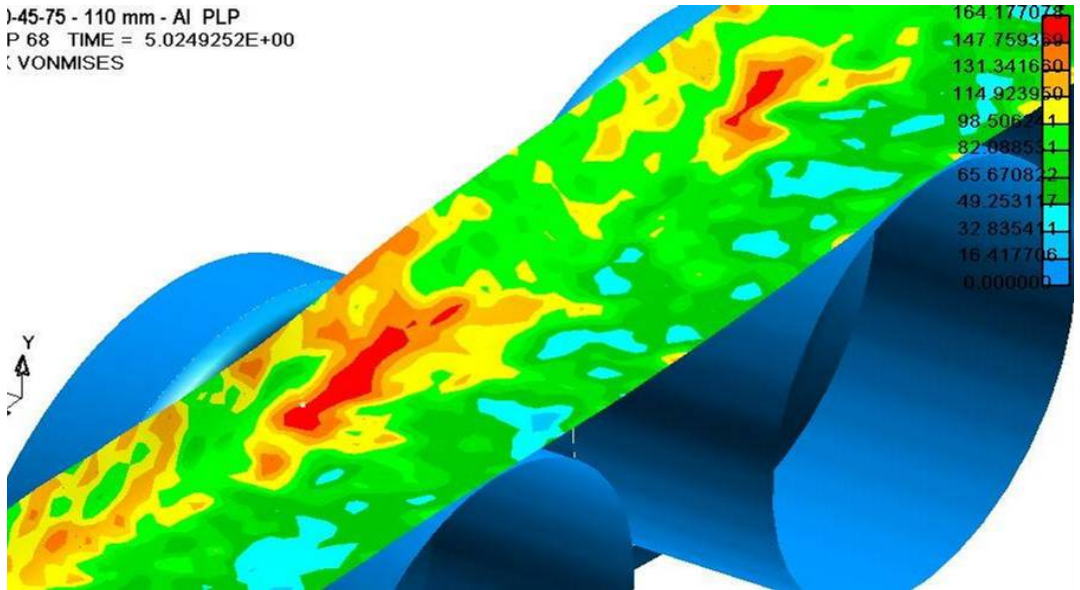
Şekil A.50: 15°-30°-45°-75°- 110 mm - Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (üst yüzey) (t= 5s)

)-45-75 - 110 mm - Al PLP
P 68 TIME = 5.0249252E+00
1A-XX(M)



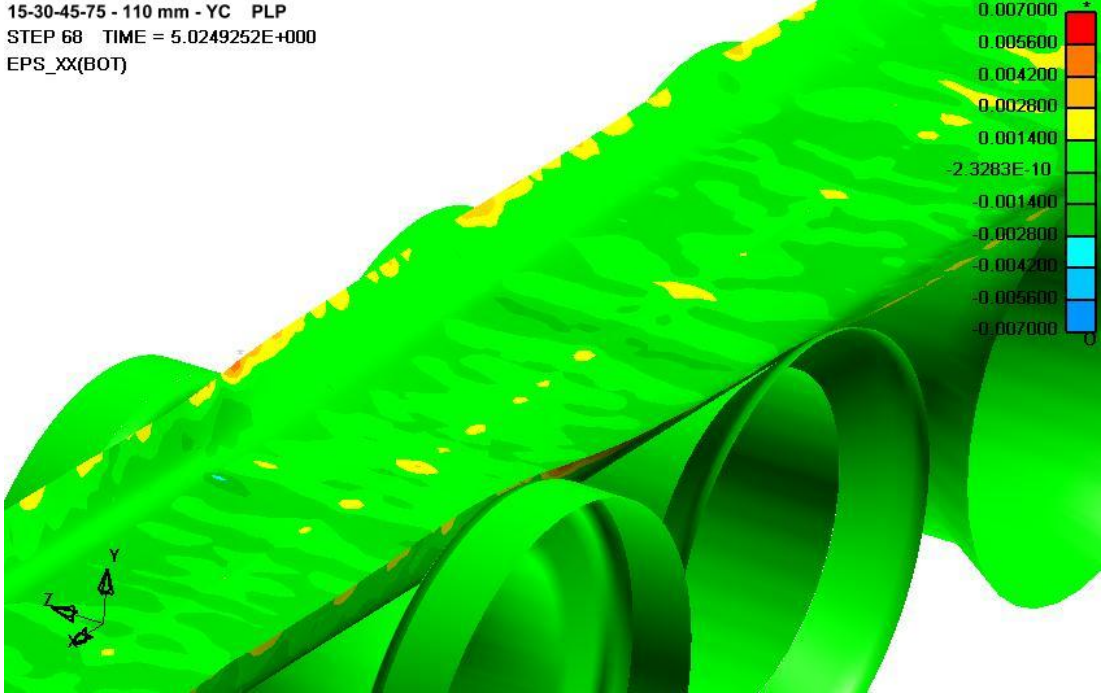
Şekil A.51: 15°-30°-45°-75°- 110 mm - Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası x-yönünde gerilme dağılımı (orta katman) (t= 5s)

)-45-75 - 110 mm - Al PLP
P 68 TIME = 5.0249252E+00
: VONMISES



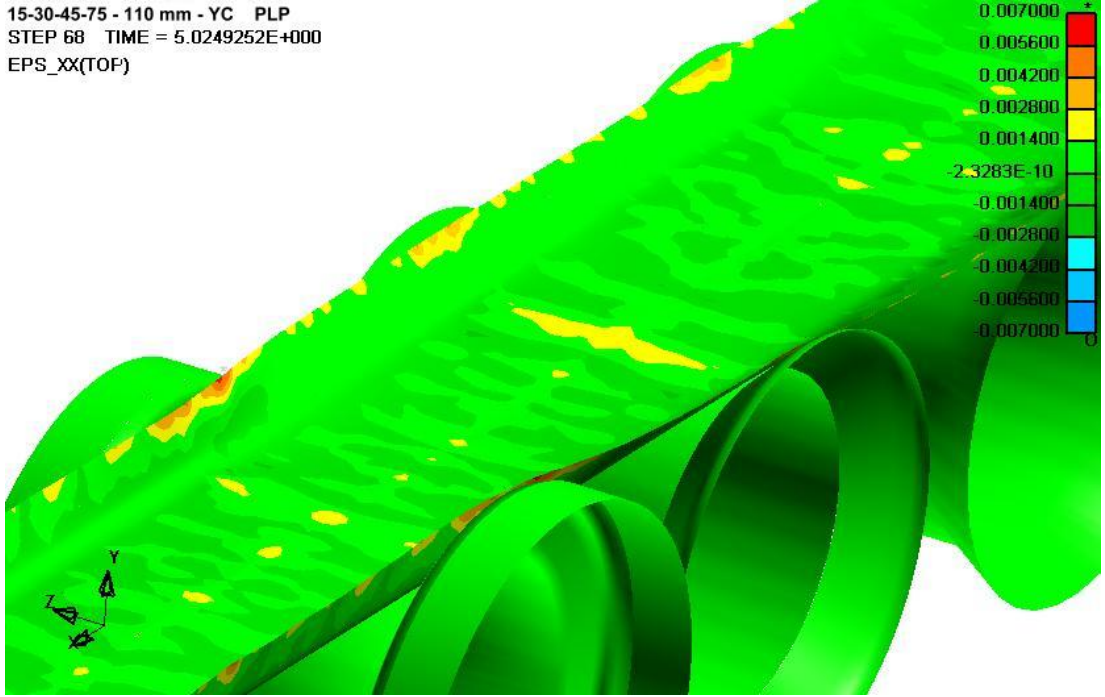
Şekil A.52: 15°-30°-45°-75°- 110 mm - Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası maksimum Von Misses gerilme dağılımı (t= 5s)

15-30-45-75 - 110 mm - YC PLP
STEP 68 TIME = 5.0249252E+000
EPS_XX(BOT)



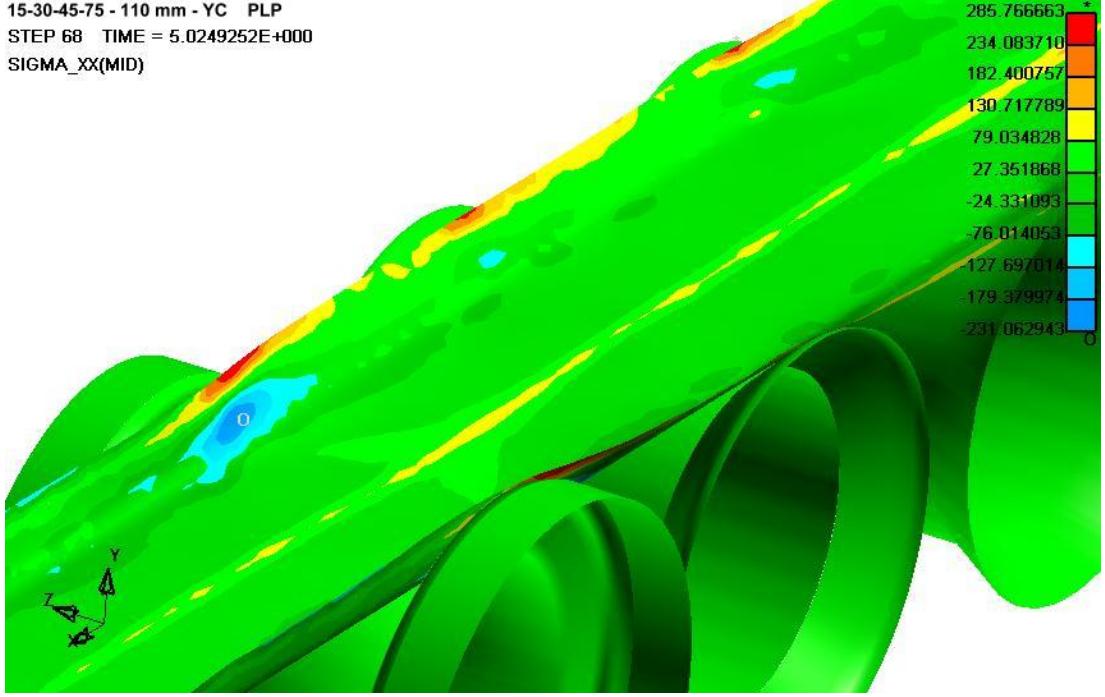
Şekil A.53: 15°-30°-45°-75°- 110 mm – Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (alt yüzey) (t= 5s)

15-30-45-75 - 110 mm - YC PLP
STEP 68 TIME = 5.0249252E+000
EPS_XX(TOP)



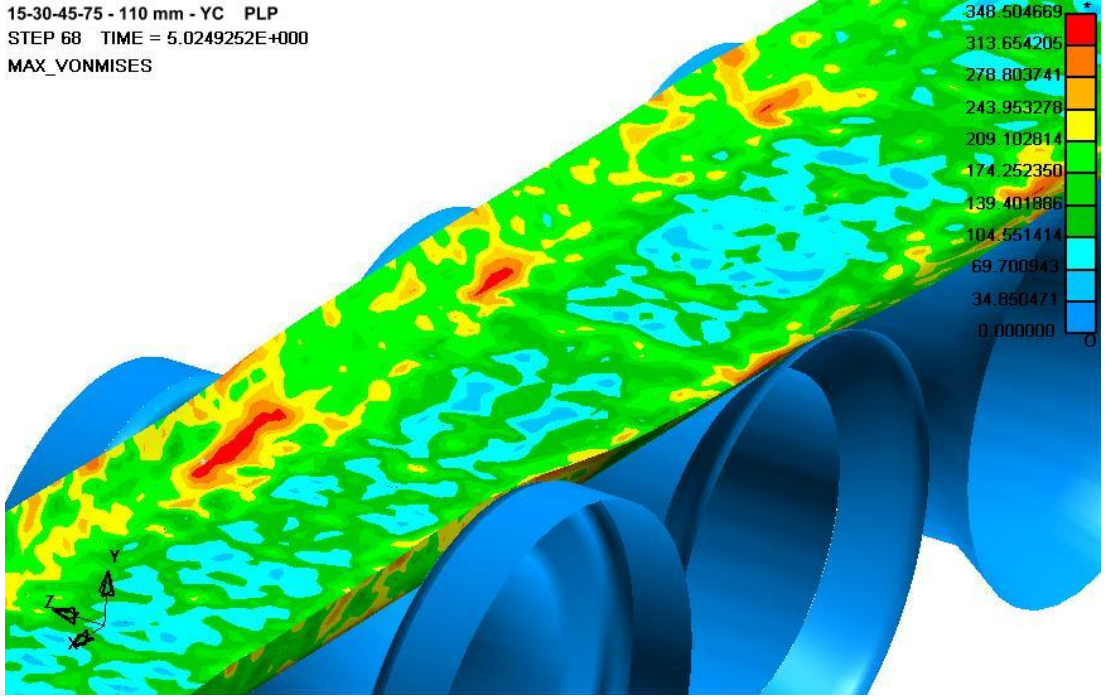
Şekil A.54: 15°-30°-45°-75°- 110 mm - Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (üst yüzey) (t= 5s)

15-30-45-75 - 110 mm - YC PLP
STEP 68 TIME = 5.0249252E+000
SIGMA_XX(MID)



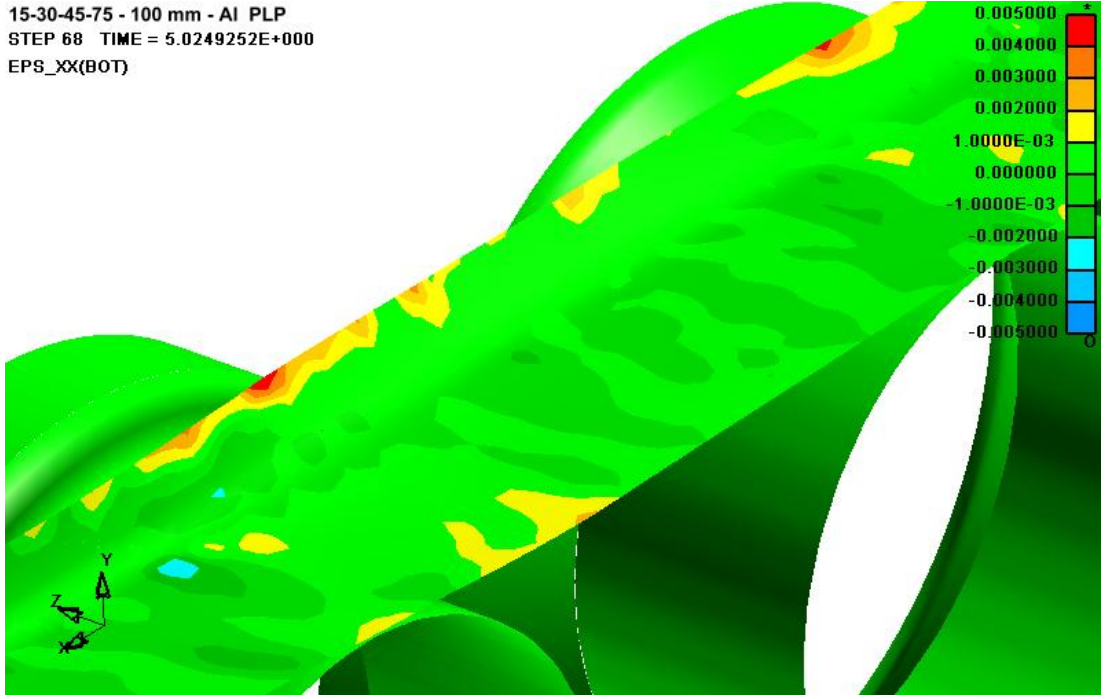
Şekil A.55: 15°-30°-45°-75°- 110 mm - Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası x-yönünde gerilme dağılımı (orta katman) (t= 5s)

15-30-45-75 - 110 mm - YC PLP
STEP 68 TIME = 5.0249252E+000
MAX_VONMISES



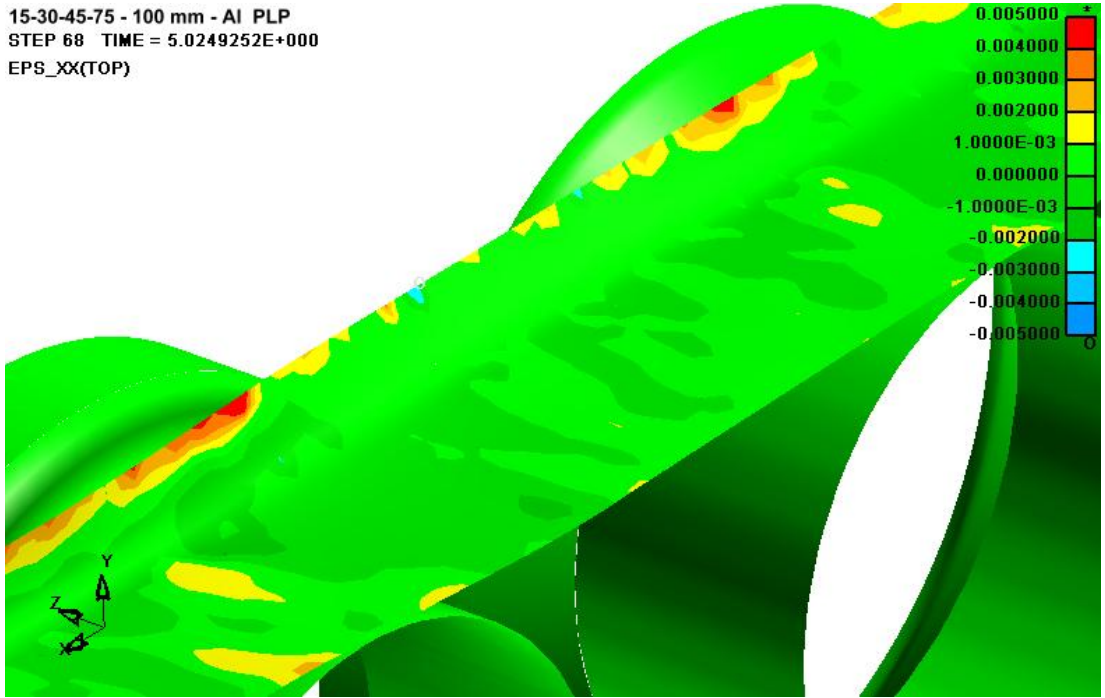
Şekil A.56: 15°-30°-45°-75°- 110 mm - Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası maksimum Von Misses gerilme dağılımı (t= 5s)

15-30-45-75 - 100 mm - Al PLP
STEP 68 TIME = 5.0249252E+000
EPS_XX(BOT)

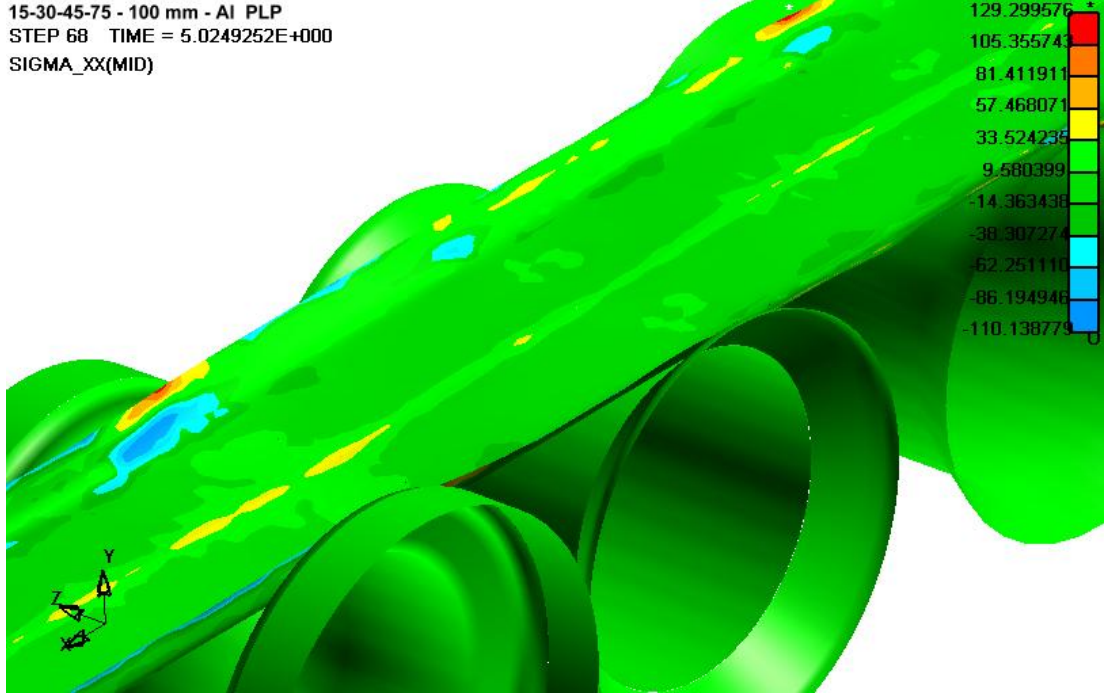


Şekil A.57: 15°-30°-45°-75°- 100 mm - Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (alt yüzey) (t= 5s)

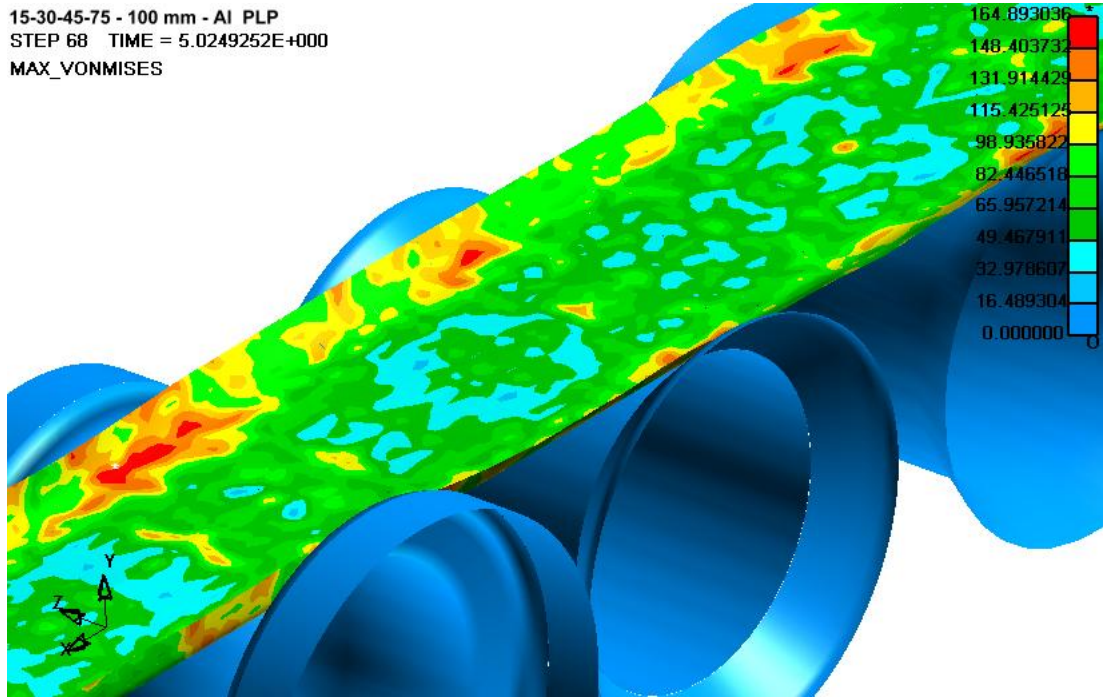
15-30-45-75 - 100 mm - Al PLP
STEP 68 TIME = 5.0249252E+000
EPS_XX(TOP)



Şekil A.58: 15°-30°-45°-75°- 100 mm - Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (üst yüzey) (t= 5s)

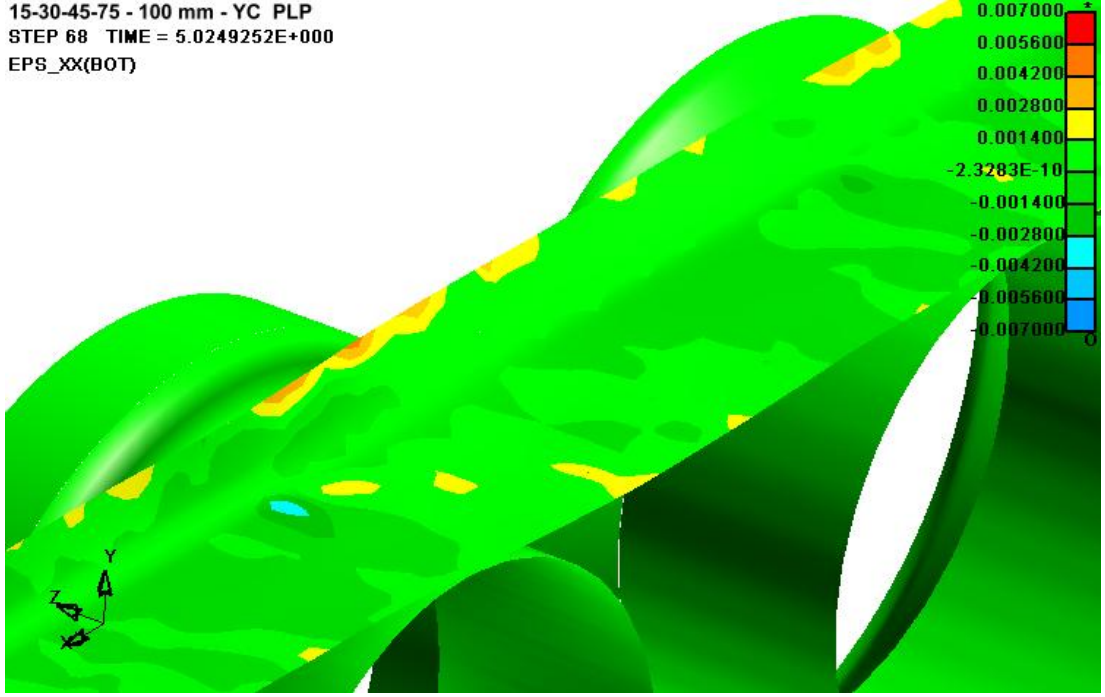


Şekil A.59: 15°-30°-45°-75°- 100 mm - Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası x-yönünde gerilme dağılımı (orta katman) (t= 5s)



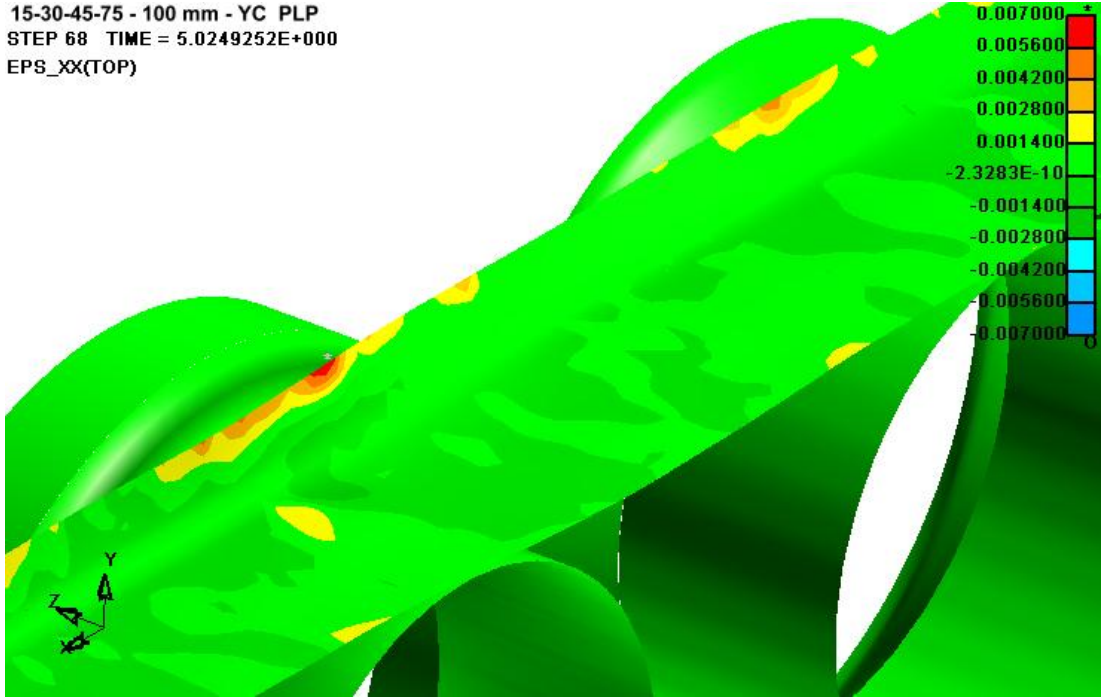
Şekil A.60: 15°-30°-45°-75°- 100 mm - Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası maksimum Von Misses gerilme dağılımı (t= 5s)

15-30-45-75 - 100 mm - YC PLP
STEP 68 TIME = 5.0249252E+000
EPS_XX(BOT)



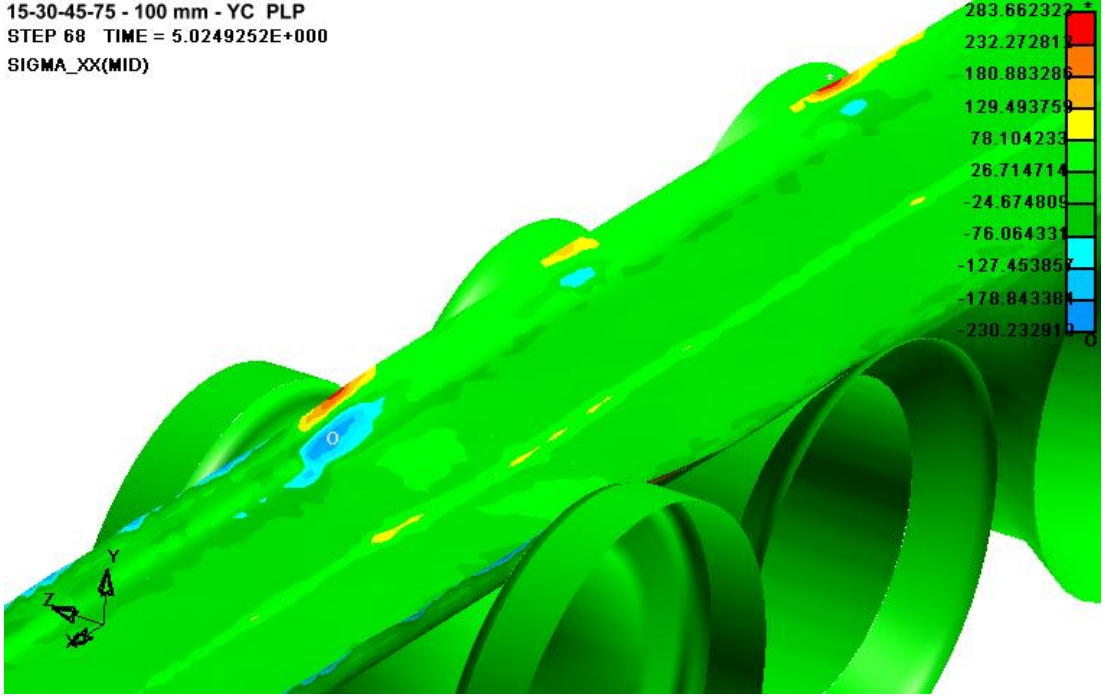
Şekil A.61: 15°-30°-45°-75°- 100 mm – Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (alt yüzey) (t= 5s)

15-30-45-75 - 100 mm - YC PLP
STEP 68 TIME = 5.0249252E+000
EPS_XX(TOP)



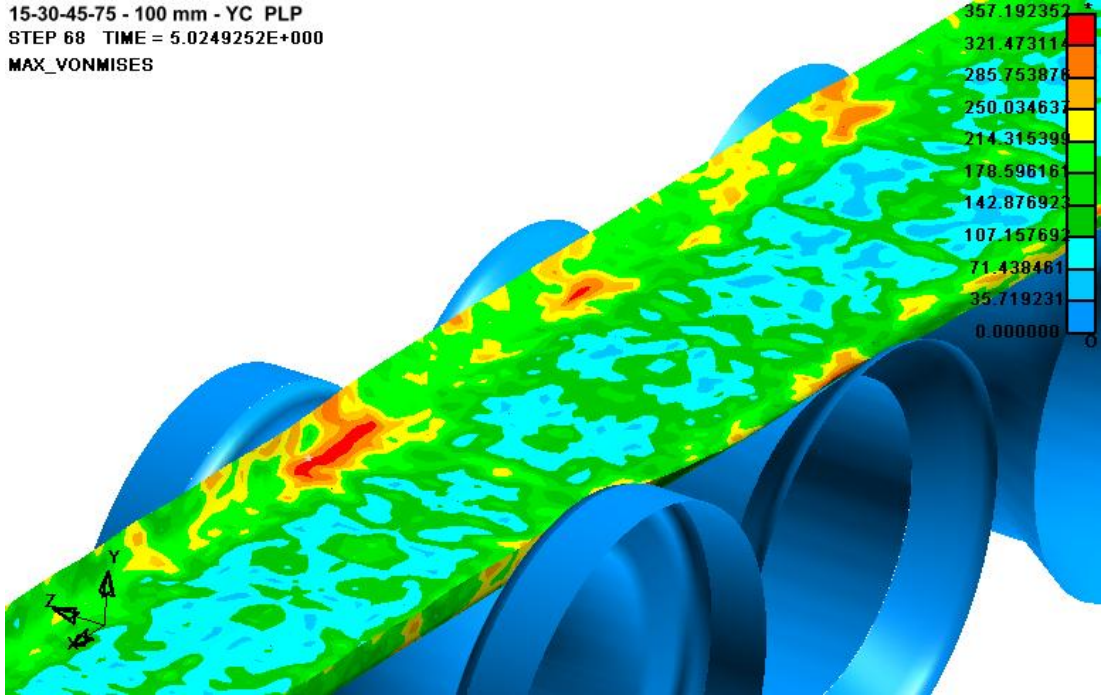
Şekil A.62: 15°-30°-45°-75°- 100 mm – Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (üst yüzey) (t= 5s)

15-30-45-75 - 100 mm - YC PLP
STEP 68 TIME = 5.0249252E+000
SIGMA_XX(MID)



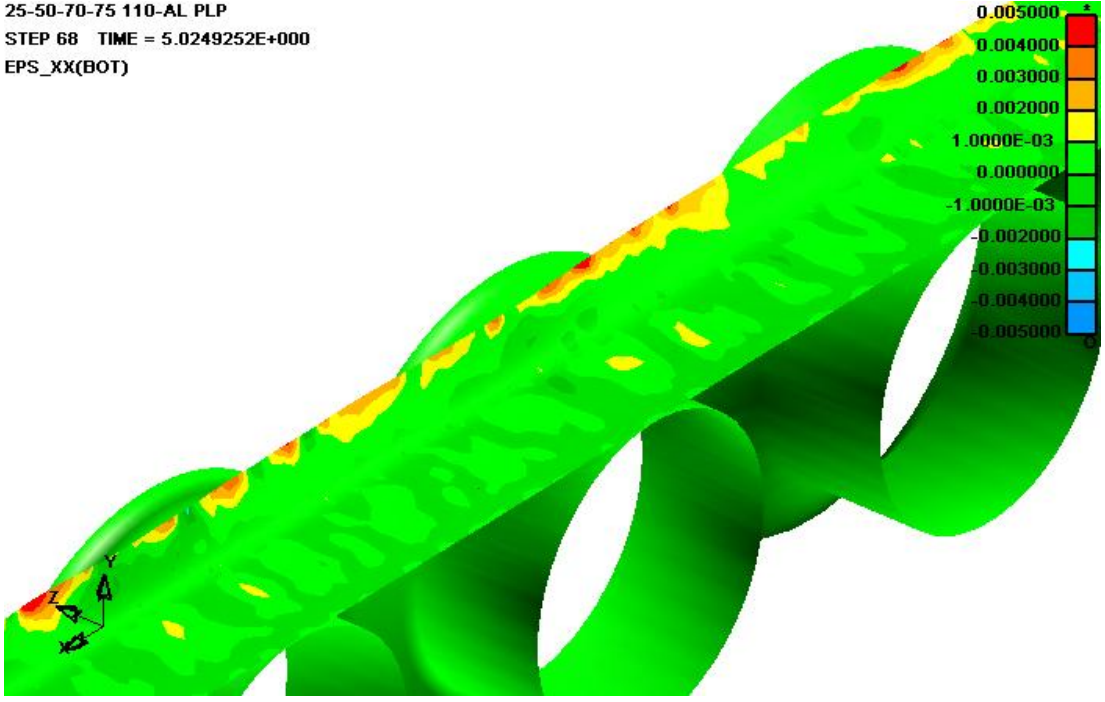
Şekil A.63: 15°-30°-45°-75°- 100 mm – Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası x-yönünde gerilme dağılımı (orta katman) (t= 5s)

15-30-45-75 - 100 mm - YC PLP
STEP 68 TIME = 5.0249252E+000
MAX_VONMISES



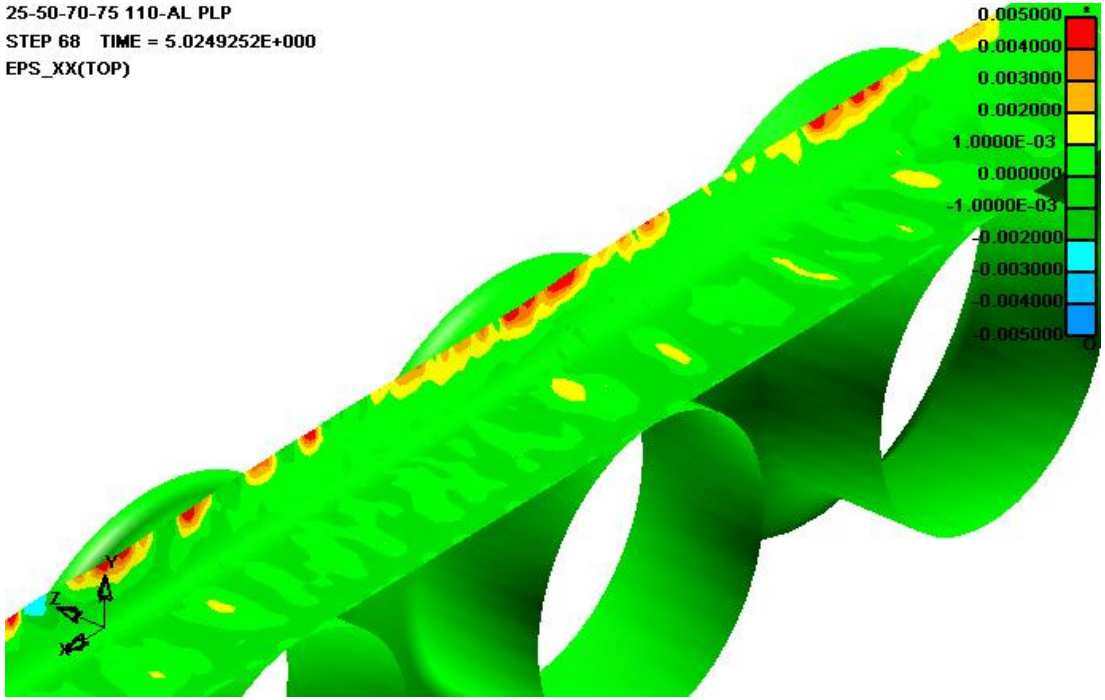
Şekil A.64: 15°-30°-45°-75°- 100 mm – Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası maksimum Von Misses gerilme dağılımı (t= 5s)

25-50-70-75 110-AL PLP
STEP 68 TIME = 5.0249252E+000
EPS_XX(BOT)



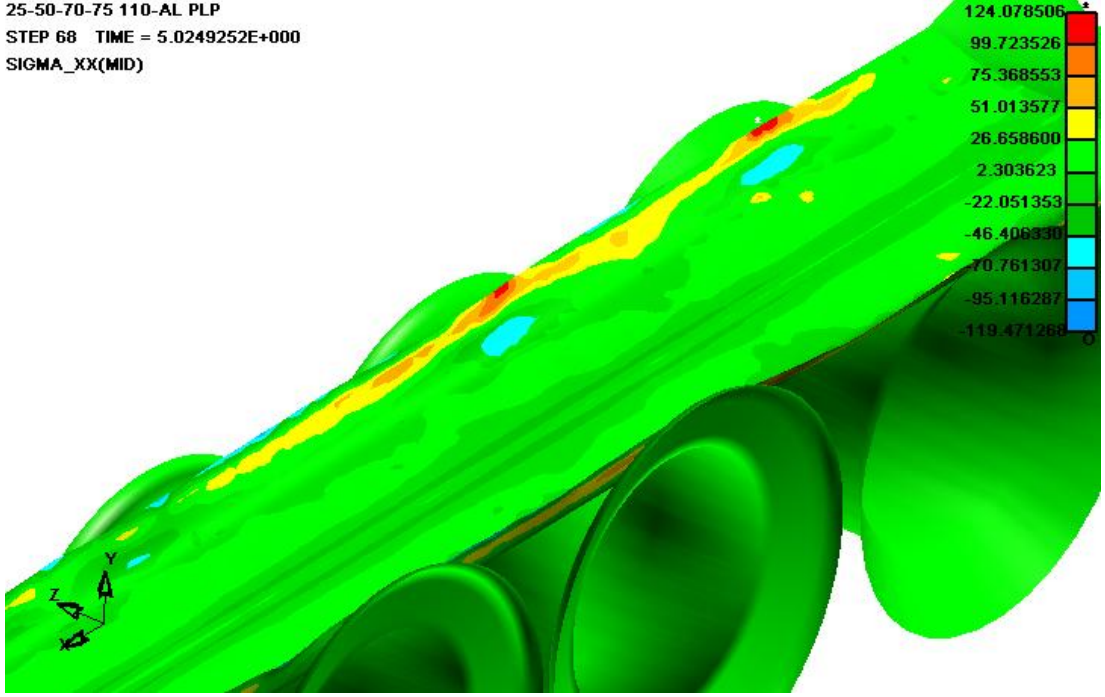
Şekil A.65: 25°-50°-70°-75°- 110 mm - Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (alt yüzey) (t= 5s)

25-50-70-75 110-AL PLP
STEP 68 TIME = 5.0249252E+000
EPS_XX(TOP)



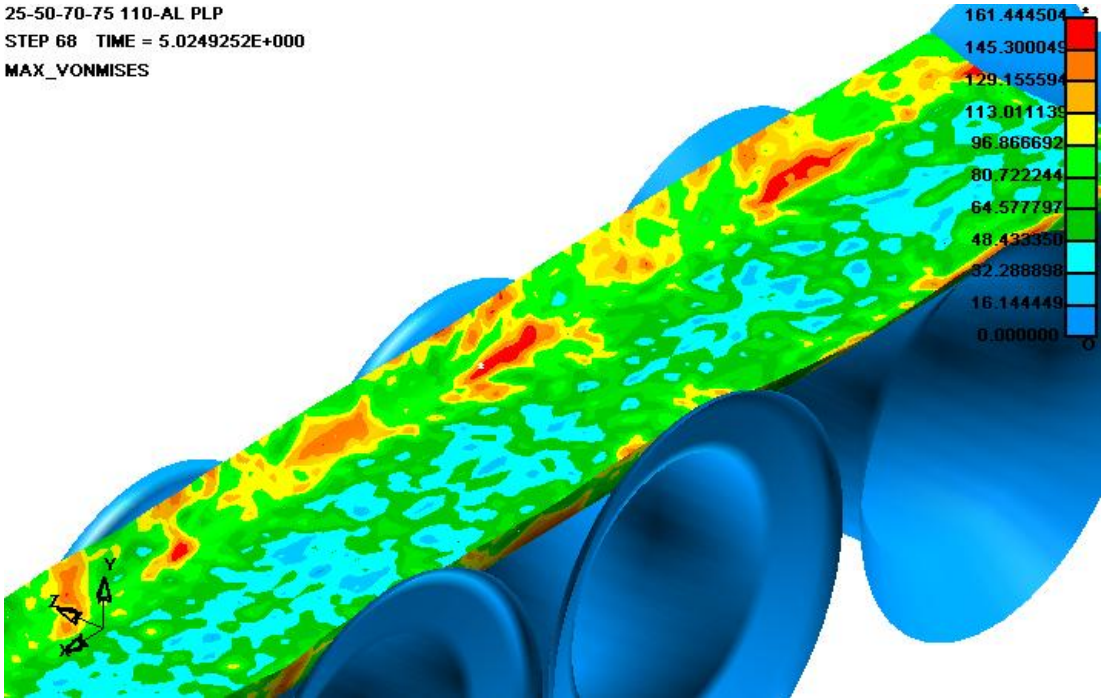
Şekil A.66: 25°-50°-70°-75°- 110 mm - Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (üst yüzey) (t= 5s)

25-50-70-75 110-AL PLP
STEP 68 TIME = 5.0249252E+000
SIGMA_XX(MID)



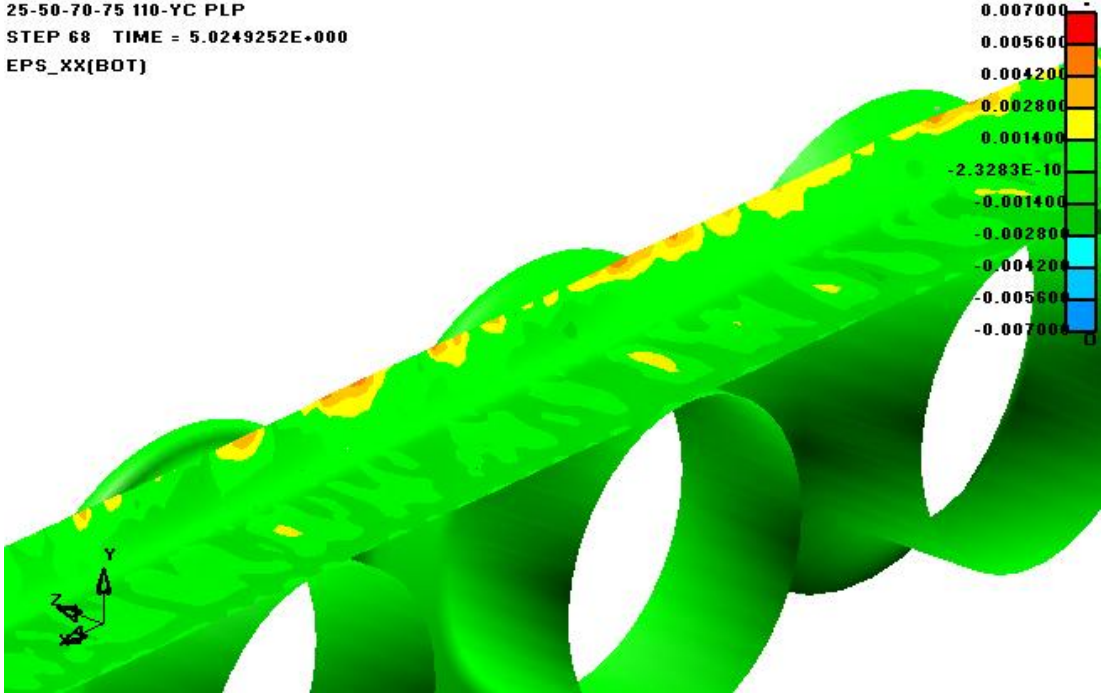
Şekil A.67: 25°-50°-70°-75°- 110 mm - Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası x-yönünde gerilme dağılımı (orta katman) (t= 5s)

25-50-70-75 110-AL PLP
STEP 68 TIME = 5.0249252E+000
MAX_VONMISES



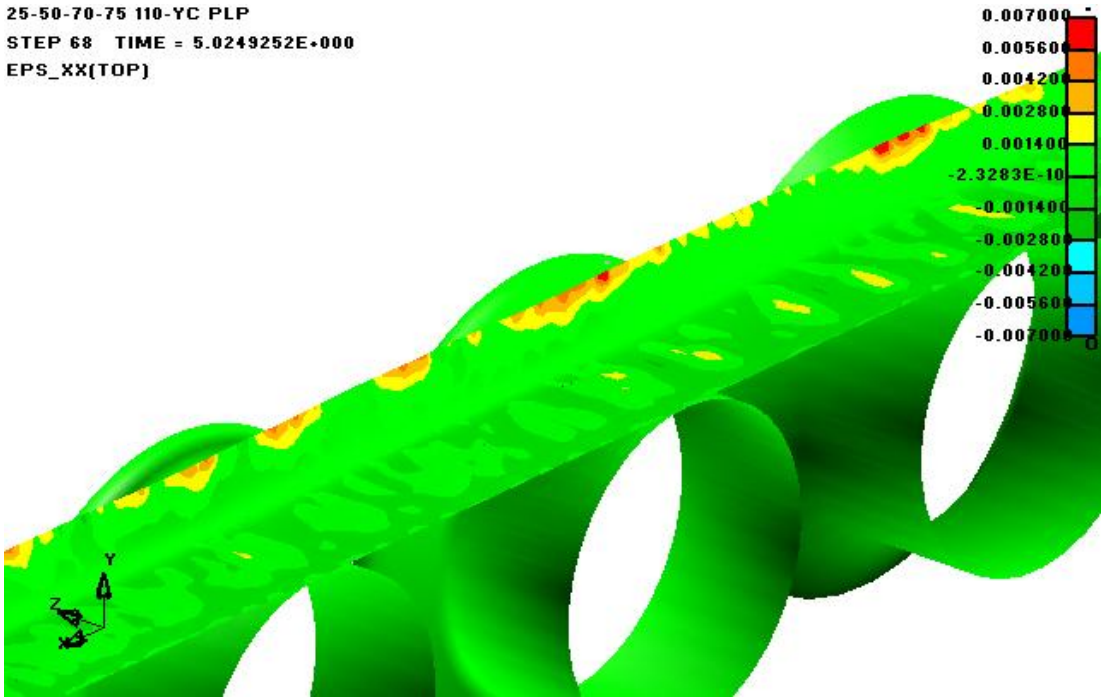
Şekil A.68: 25°-50°-70°-75°- 110 mm - Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası maksimum Von Misses gerilme dağılımı (t= 5s)

25-50-70-75 110-YC PLP
STEP 68 TIME = 5.0249252E+000
EPS_XX(BOT)



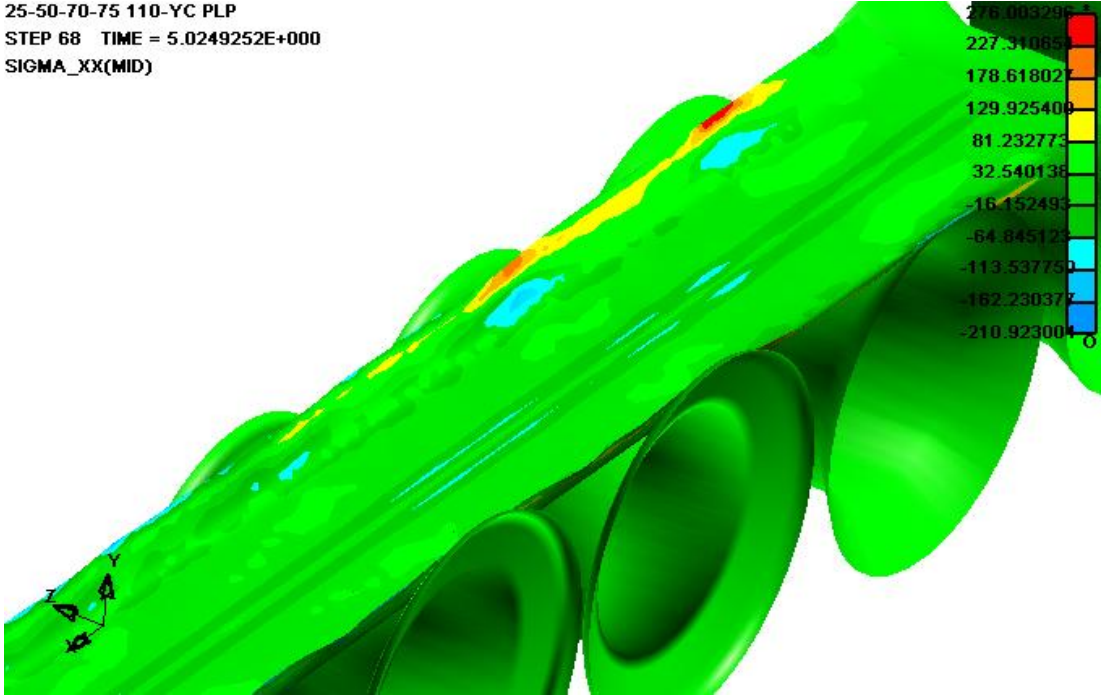
Şekil A.69: 25°-50°-70°-75°- 110 mm – Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (alt yüzey) (t= 5s)

25-50-70-75 110-YC PLP
STEP 68 TIME = 5.0249252E+000
EPS_XX(TOP)



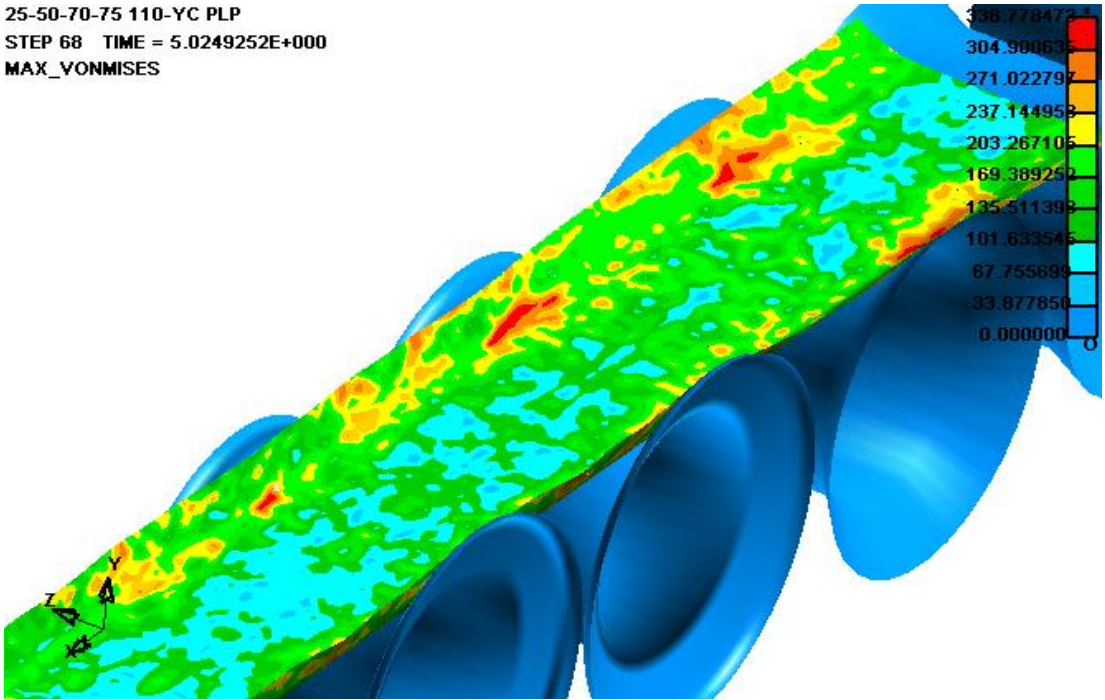
Şekil A.70: 25°-50°-70°-75°- 110 mm – Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (üst yüzey) (t= 5s)

25-50-70-75 110-YC PLP
STEP 68 TIME = 5.0249252E+000
SIGMA_XX(MID)



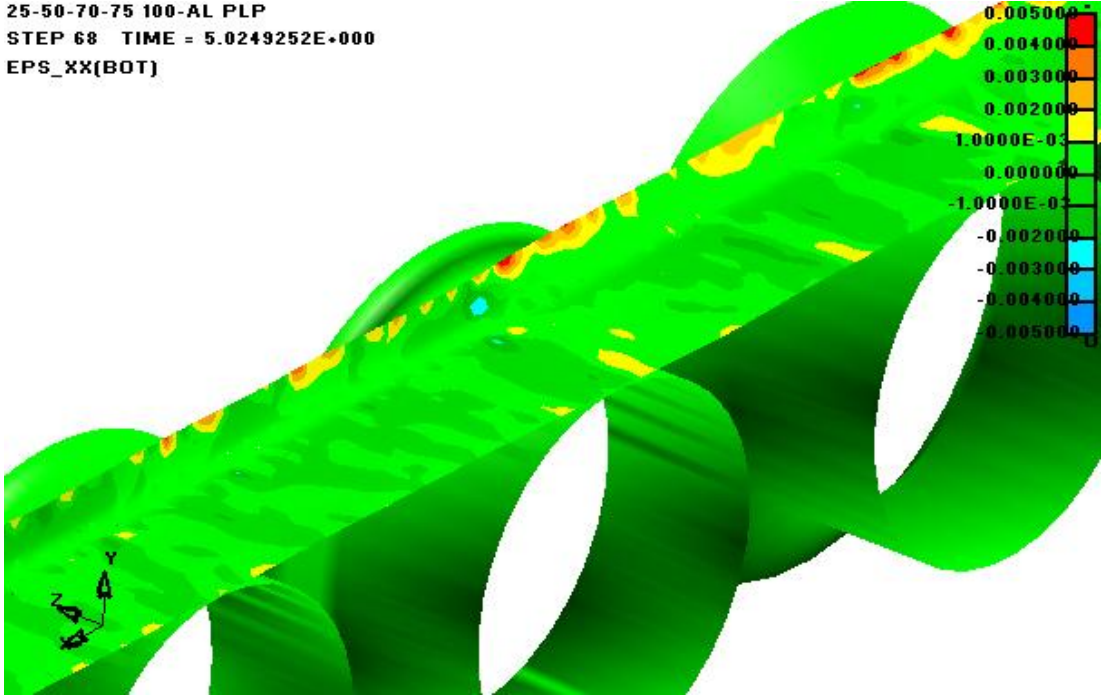
Şekil A.71: 25°-50°-70°-75°- 110 mm – Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası x-yönünde gerilme dağılımı (orta katman) (t= 5s)

25-50-70-75 110-YC PLP
STEP 68 TIME = 5.0249252E+000
MAX_VONMISES



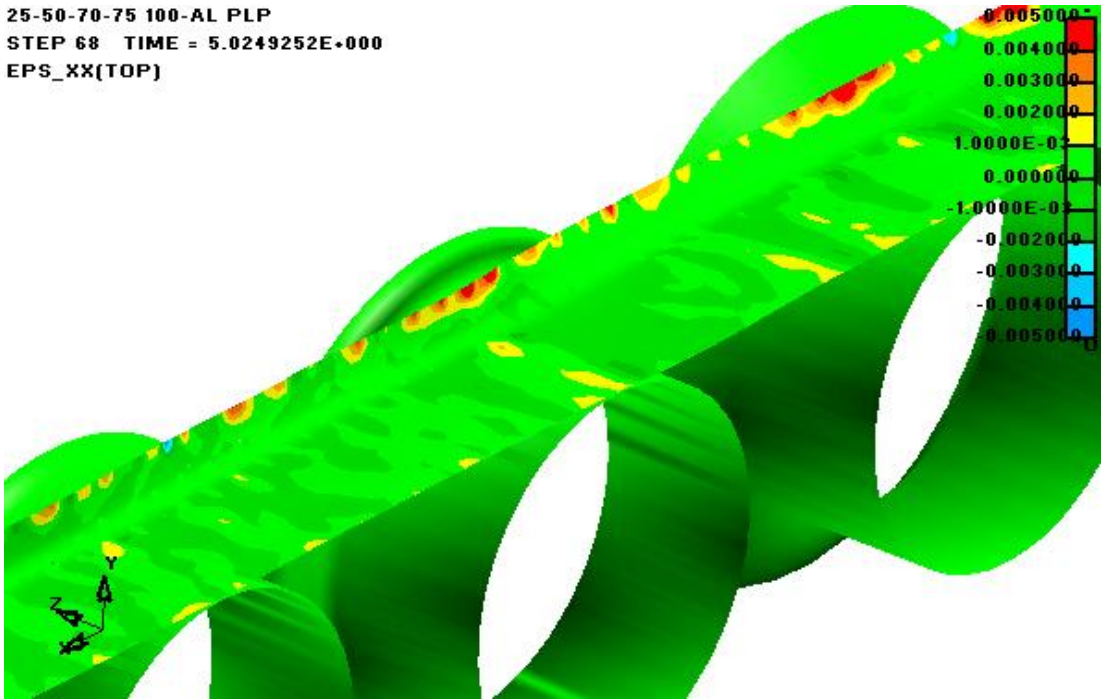
Şekil A.72: 25°-50°-70°-75°- 110 mm – Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası maksimum Von Misses gerilme dağılımı (t= 5s)

25-50-70-75 100-AL PLP
STEP 68 TIME = 5.0249252E+000
EPS_XX(BOT)



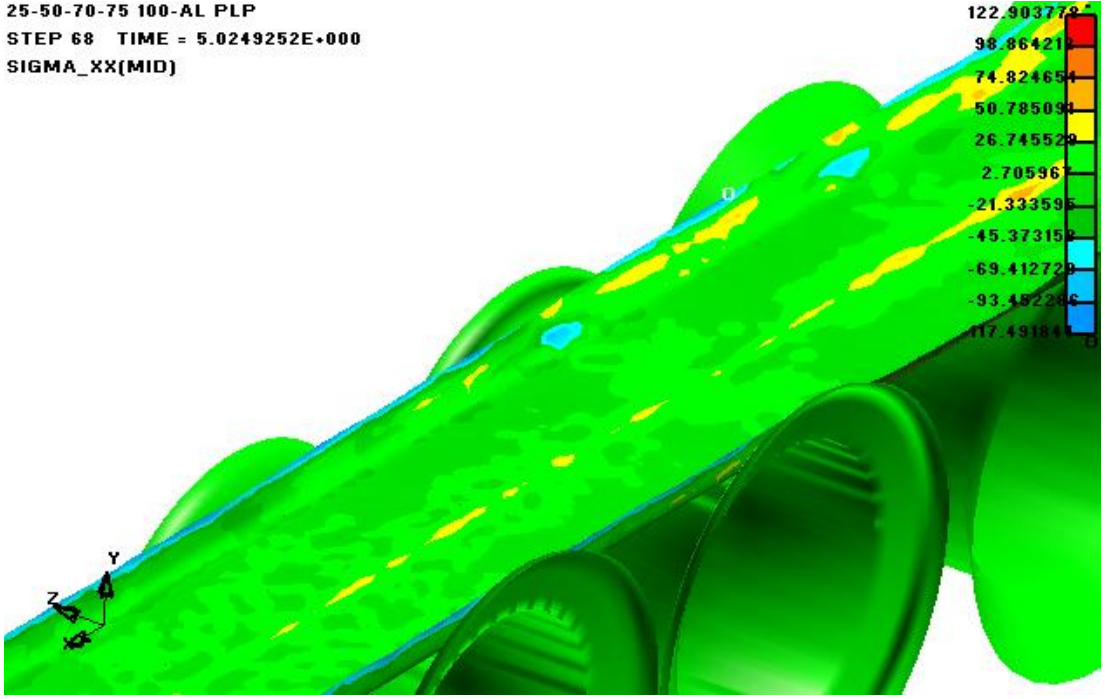
Şekil A.73: 25°-50°-70°-75°- 100 mm - Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (alt yüzey) (t= 5s)

25-50-70-75 100-AL PLP
STEP 68 TIME = 5.0249252E+000
EPS_XX(TOP)



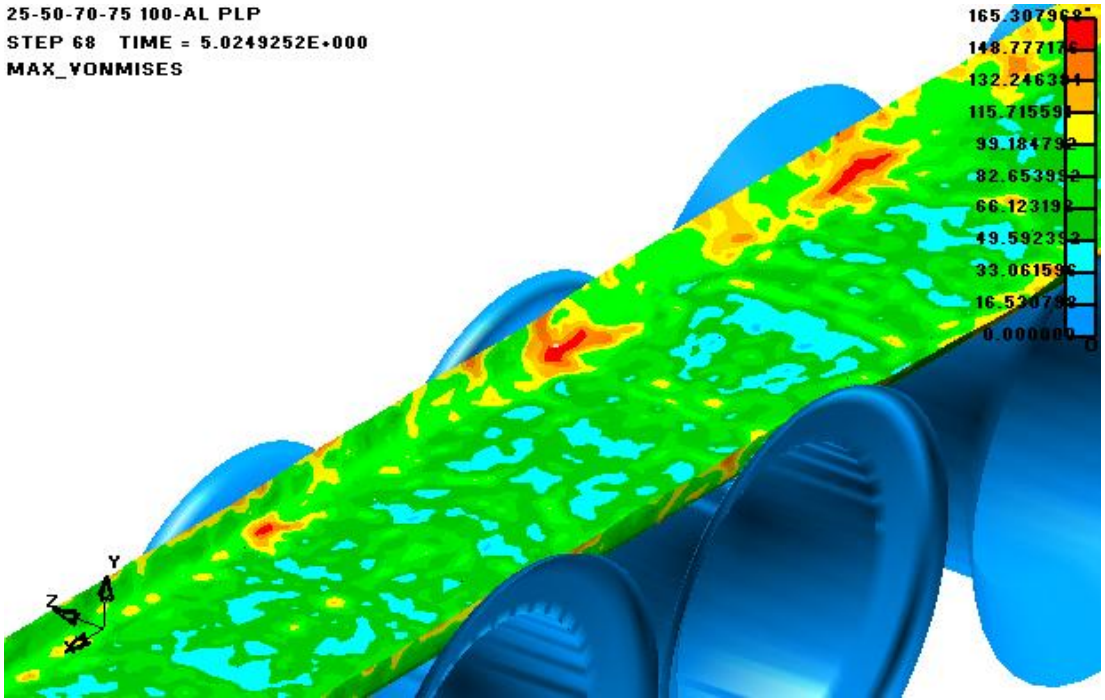
Şekil A.74: 25°-50°-70°-75°- 100 mm - Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (üst yüzey) (t= 5s)

25-50-70-75 100-AL PLP
STEP 68 TIME = 5.0249252E+000
SIGMA_XX(MID)



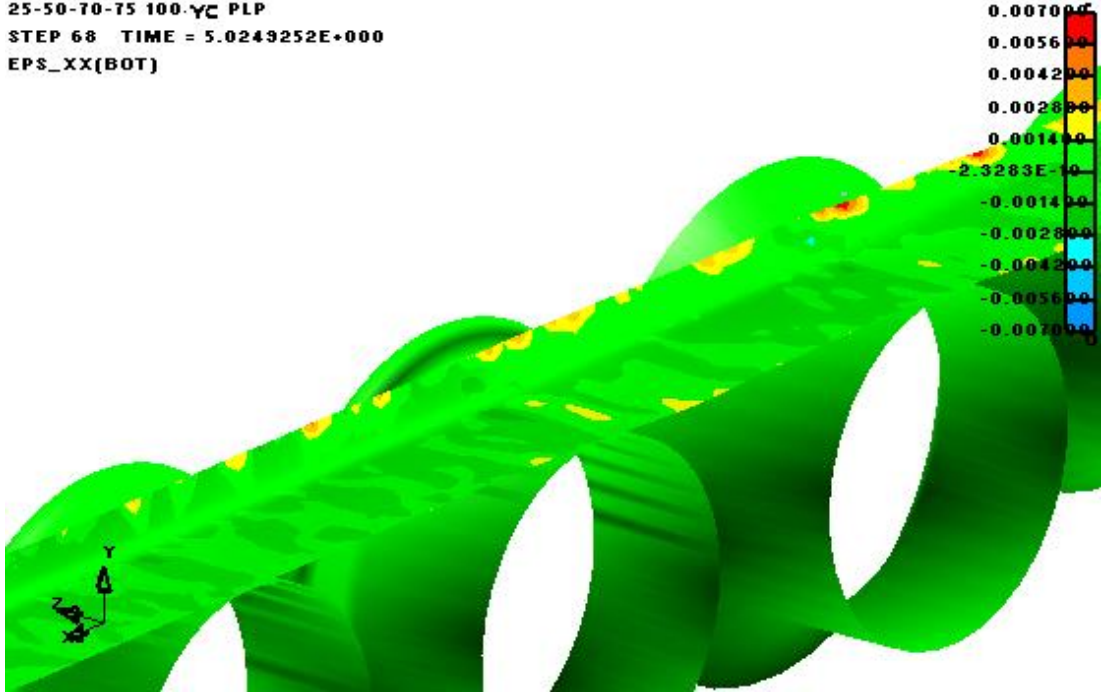
Şekil A.75: 25°-50°-70°-75°- 100 mm - Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası x-yönünde gerilme dağılımı (orta katman) (t= 5s)

25-50-70-75 100-AL PLP
STEP 68 TIME = 5.0249252E+000
MAX_VONMISES



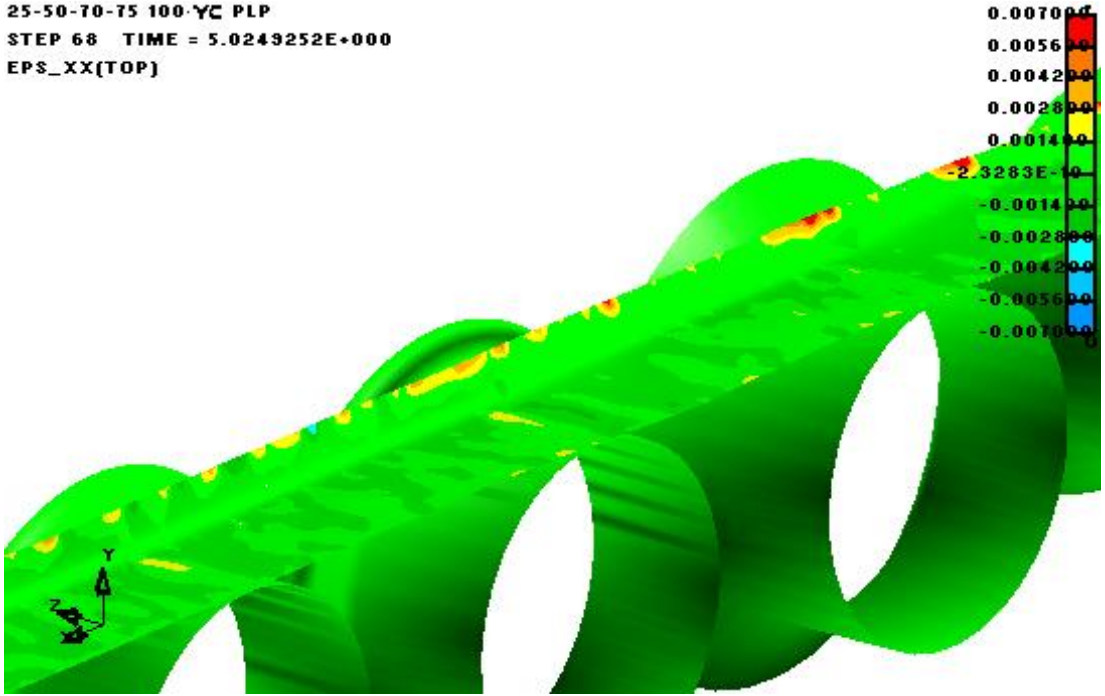
Şekil A.76: 25°-50°-70°-75°- 100 mm - Alüminyum kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası maksimum Von Misses gerilme dağılımı (t= 5s)

25-50-70-75 100- γ Ç PLP
STEP 68 TIME = 5.0249252E+000
EPS_XX(BOT)

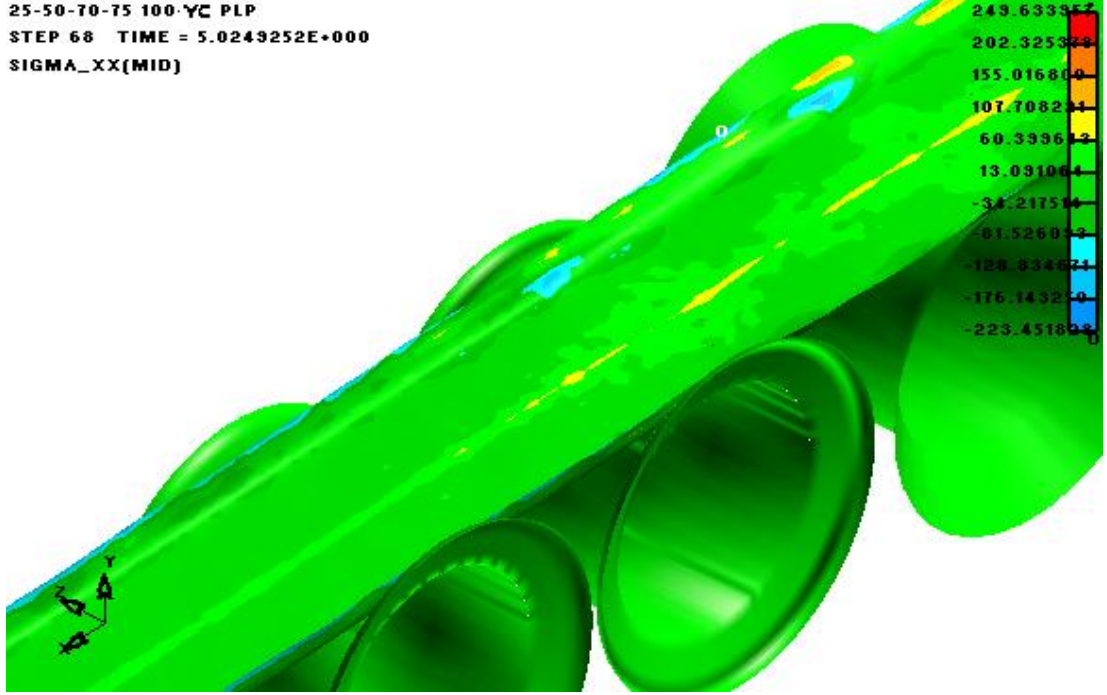


Şekil A.77: 25°-50°-70°-75°- 100 mm – Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (alt yüzey) (t= 5s)

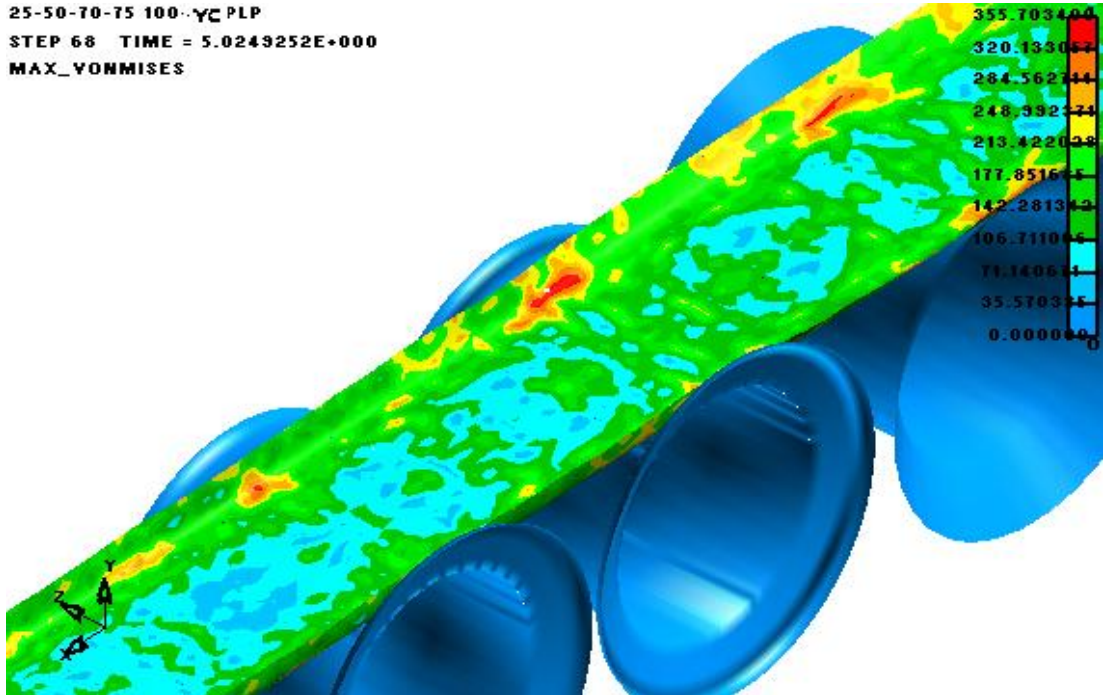
25-50-70-75 100- γ Ç PLP
STEP 68 TIME = 5.0249252E+000
EPS_XX(TOP)



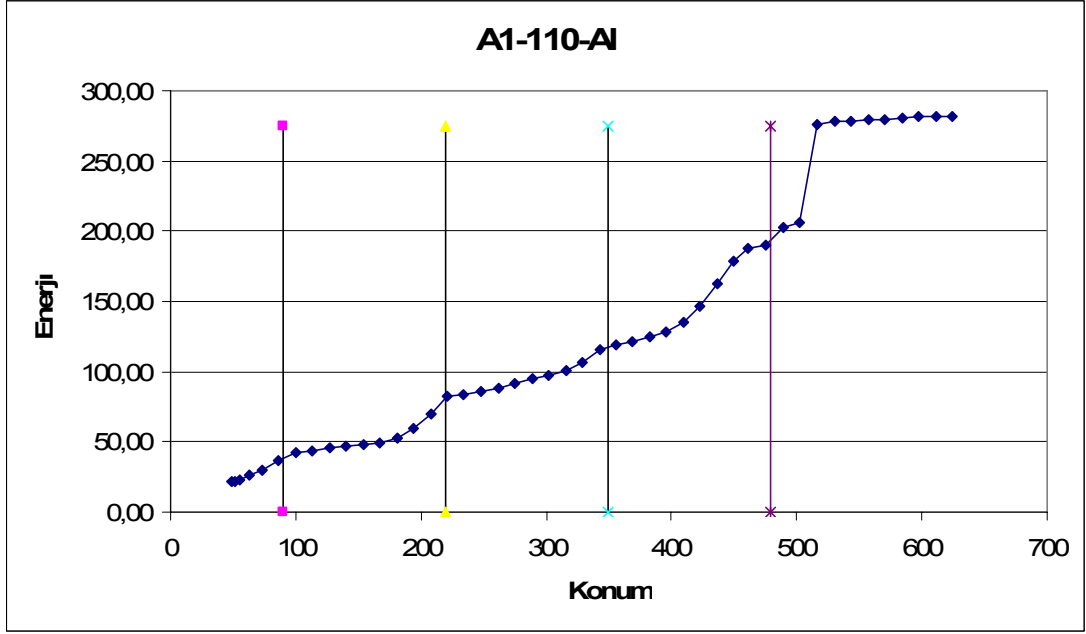
Şekil A.78: 25°-50°-70°-75°- 100 mm – Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası gerinim dağılımı (üst yüzey) (t= 5s)



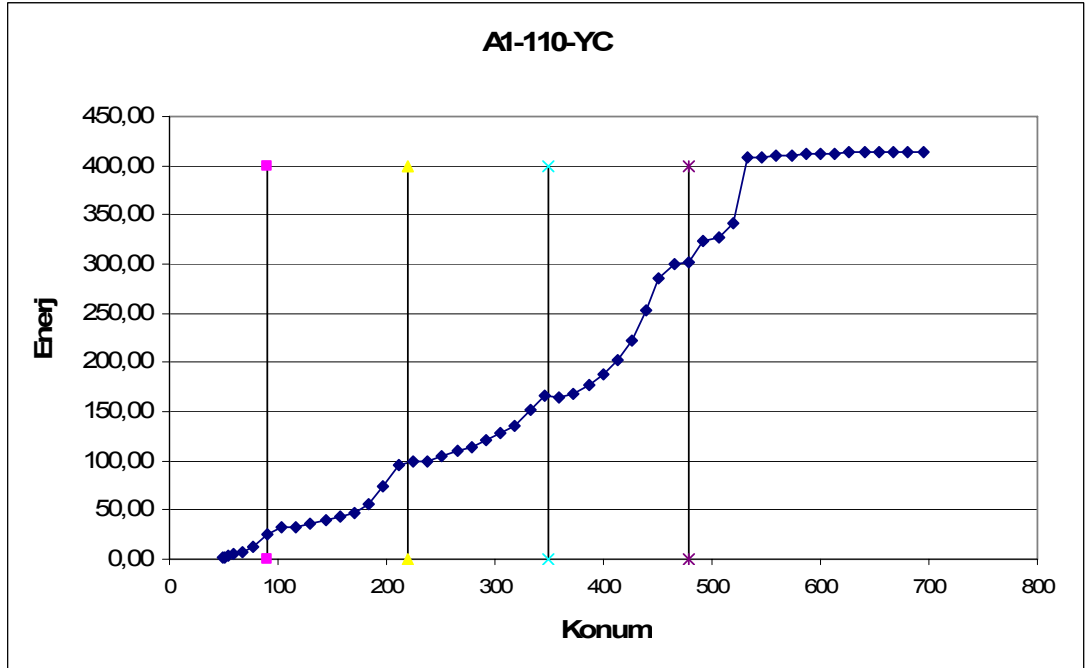
Şekil A.79: 25°-50°-70°-75°- 100 mm – Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası x-yönünde gerilme dağılımı (orta katman) (t= 5s)



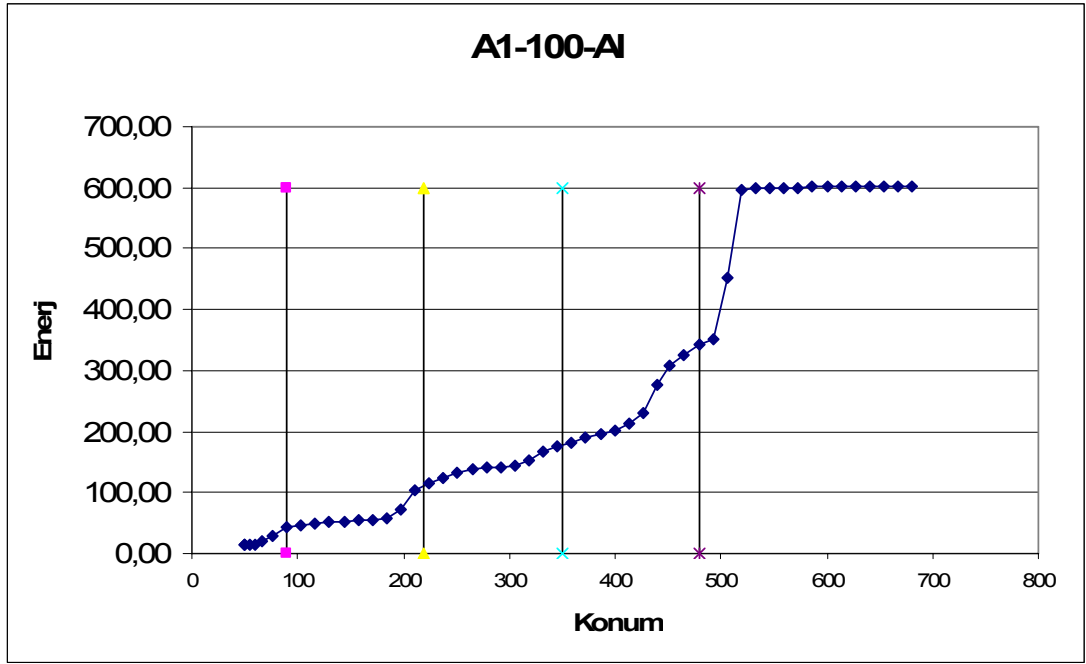
Şekil A.80: 25°-50°-70°-75°- 100 mm – Sünek Çelik kombinasyonu için 4. ve 5. makara seti arası maksimum Von Mises gerilme dağılımı (t= 5s)



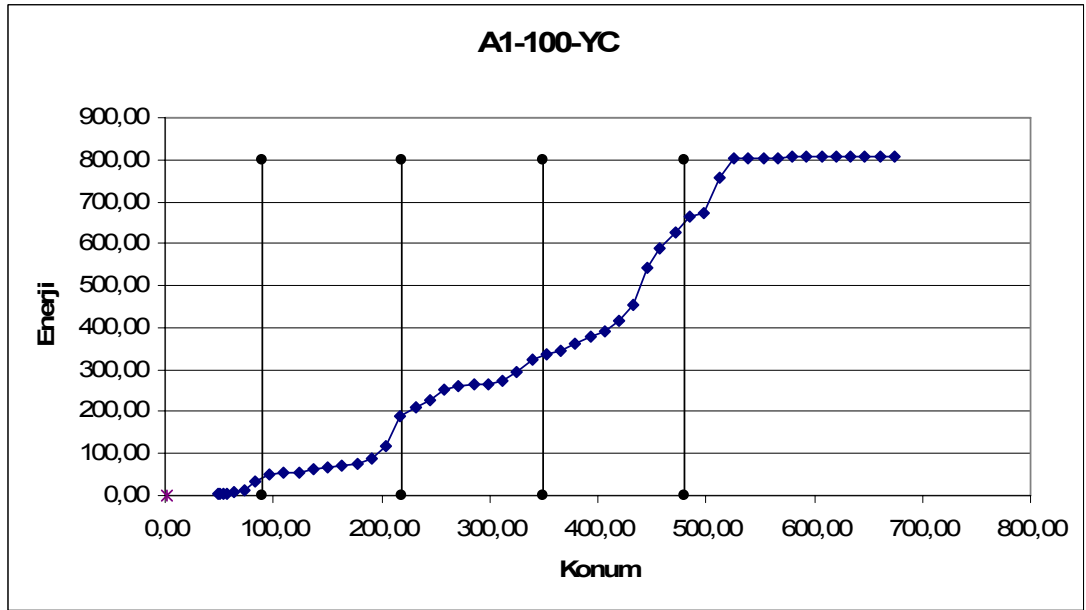
Şekil A.81: A1-110-AI kombinasyonda, kenar ucundaki ilk 100 eleman için x-yönünde konuma bağlı toplam iç enerji grafiği



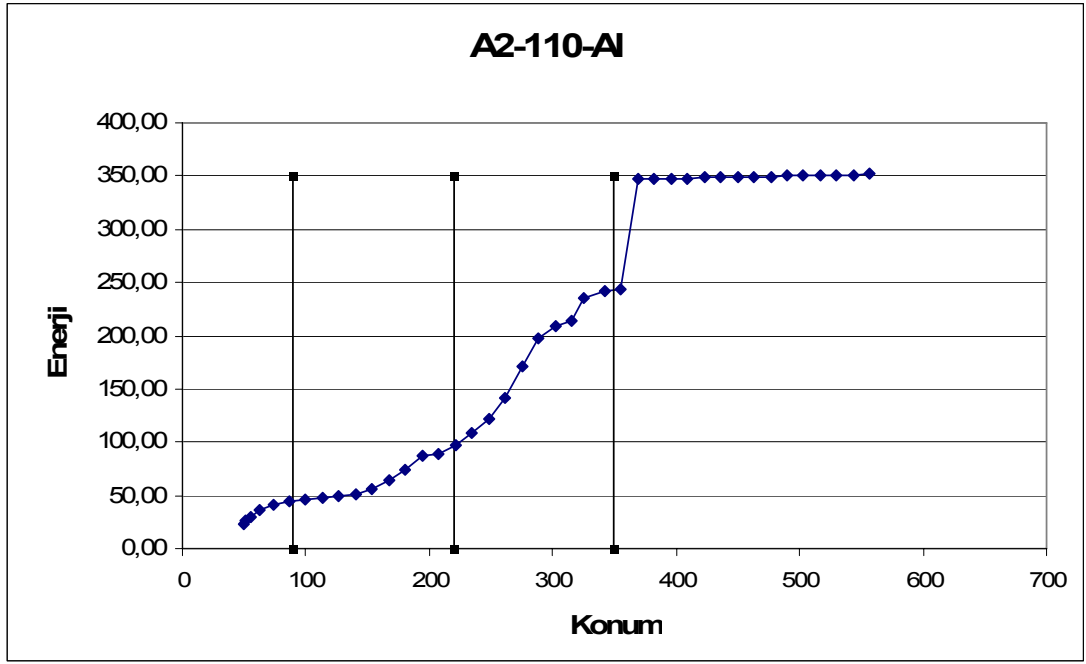
Şekil A.82: A1-110-YC kombinasyonda, kenar ucundaki ilk 100 eleman için x-yönünde konuma bağlı toplam iç enerji grafiği



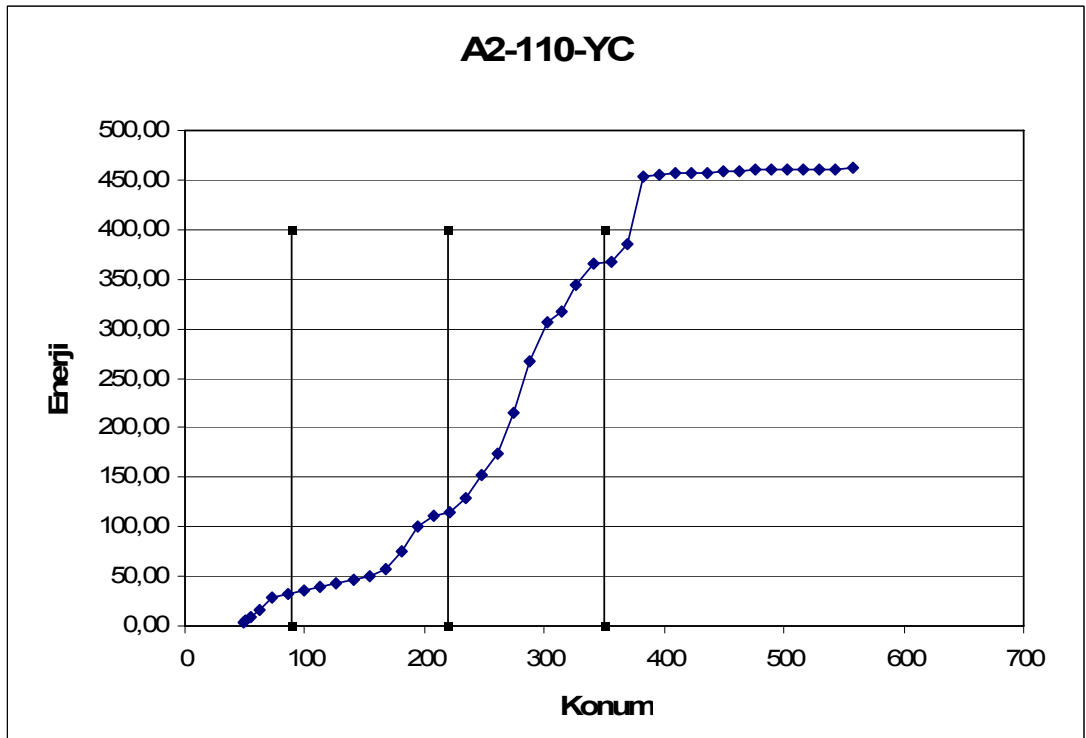
Şekil A.83: A1-100-AI kombinasyonda, kenar ucundaki ilk 100 eleman için x-yönünde konuma bağlı toplam iç enerji grafiği



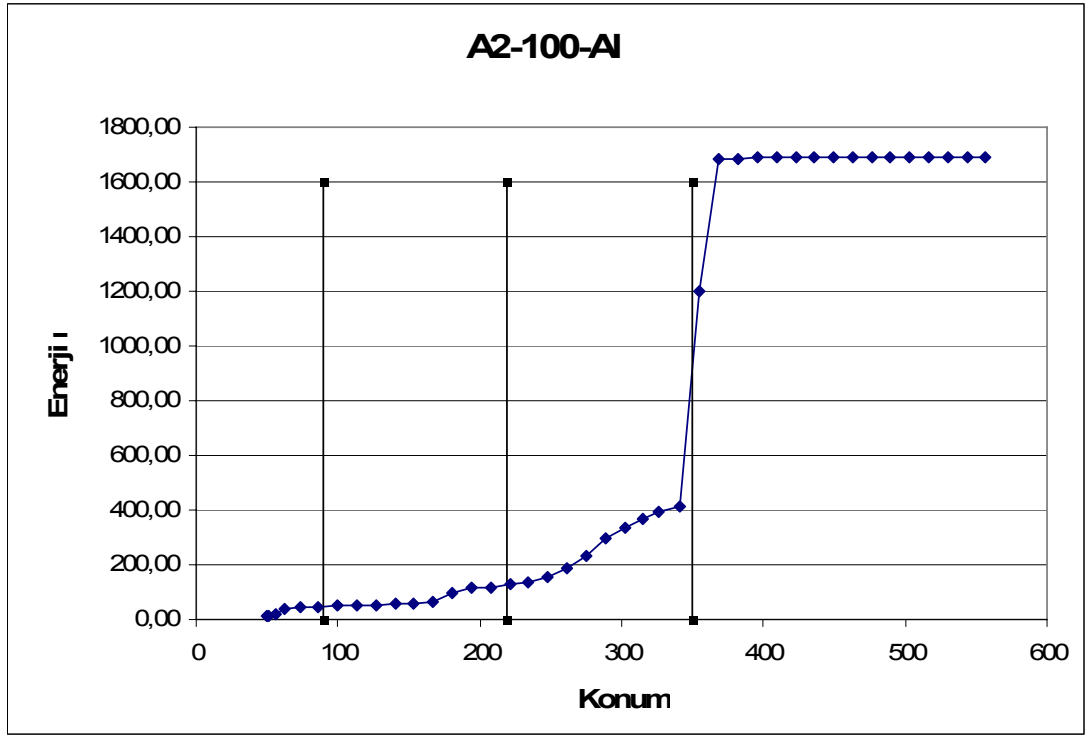
Şekil A.84: A1-100-YC kombinasyonda, kenar ucundaki ilk 100 eleman için x-yönünde konuma bağlı toplam iç enerji grafiği



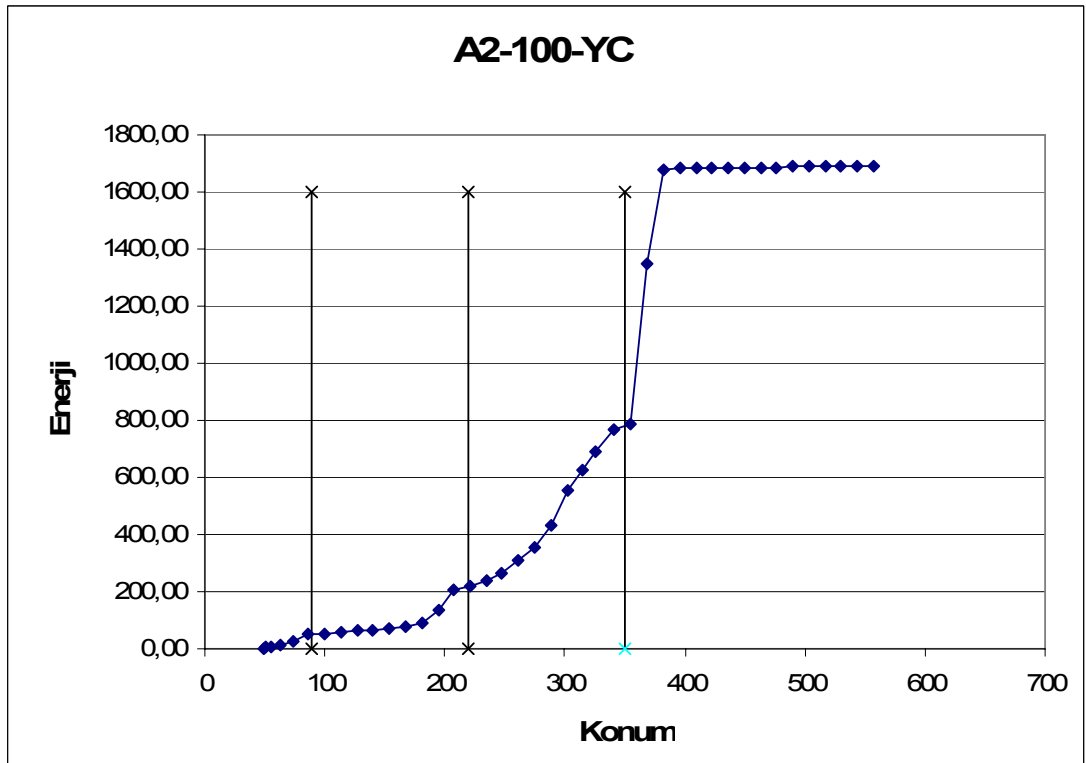
Şekil A.85: A2-110-AI kombinasyonda, kenar ucundaki ilk 100 eleman için x-yönünde konuma bağlı toplam iç enerji grafiği



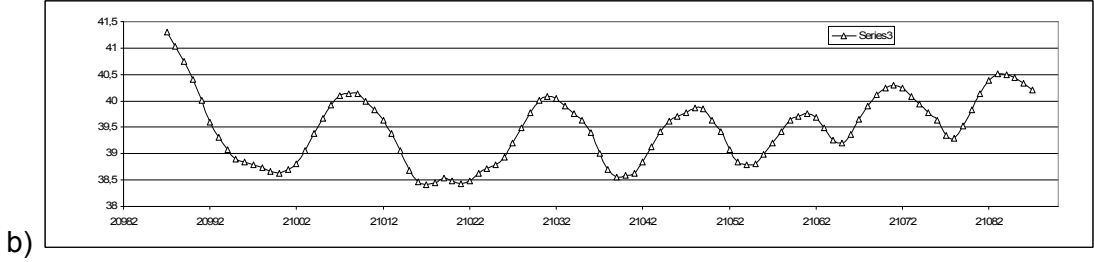
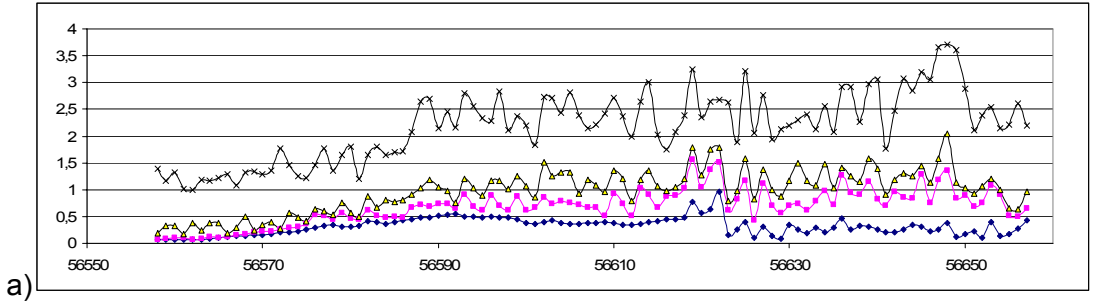
Şekil A.86: A2-110-YC kombinasyonda, kenar ucundaki ilk 100 eleman için x-yönünde konuma bağlı toplam iç enerji grafiği



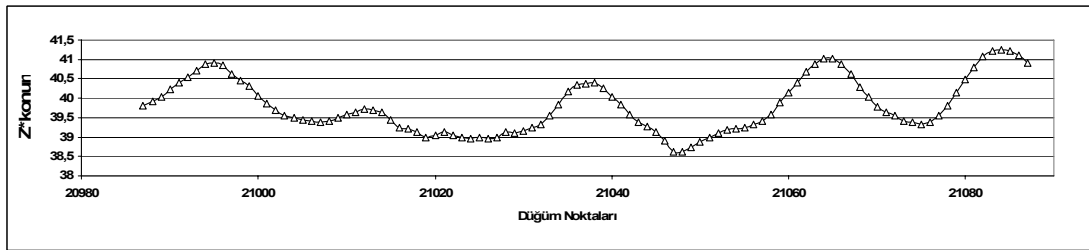
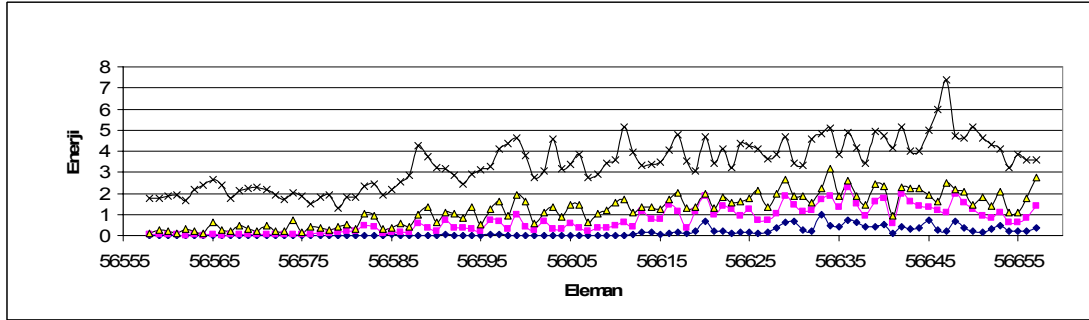
Şekil A.87: A2-100-AI kombinasyonunda, kenar ucundaki ilk 100 eleman için x-yönünde konuma bağlı toplam iç enerji grafiği



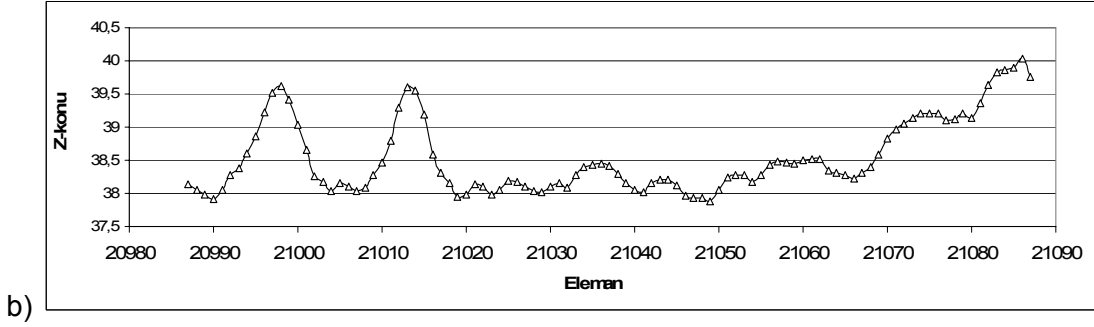
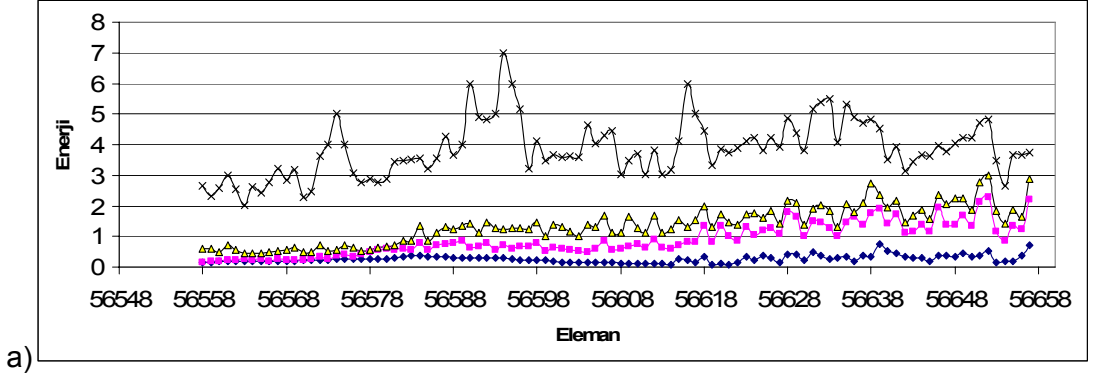
Şekil A.88: A2-100-YC kombinasyonunda, kenar ucundaki ilk 100 eleman için x-yönünde konuma bağlı toplam iç enerji grafiği



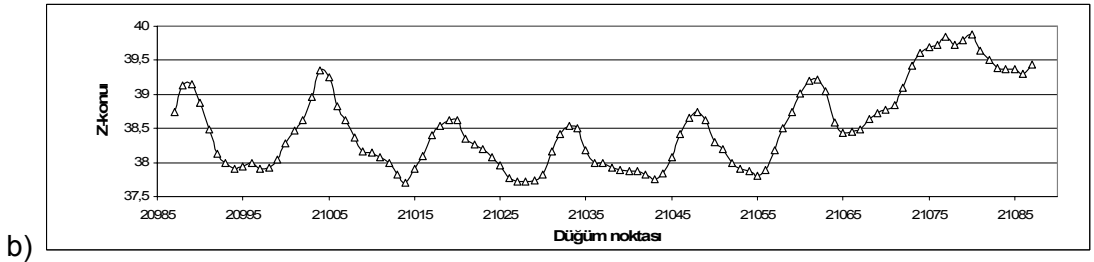
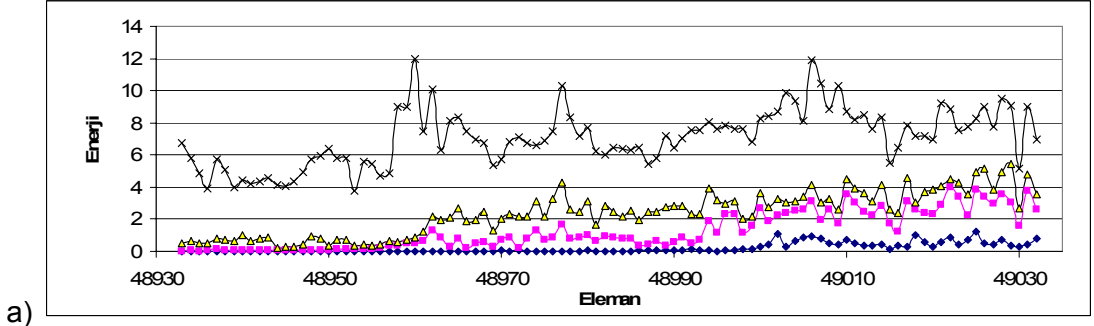
Şekil A.89: A1-110-AI kombinasyonu için: a) Bükülen kenar üzerindeki ilk 100 eleman üzerinde iç enerji dağılımı (MPa) (sırasıyla en alttan en üste $t=0,97s$, $t=1,72s$, $t=2,33s$, $t=10s$) b) Kenar ucundaki ilk 101 düğüm noktası için z-yönünde konum.



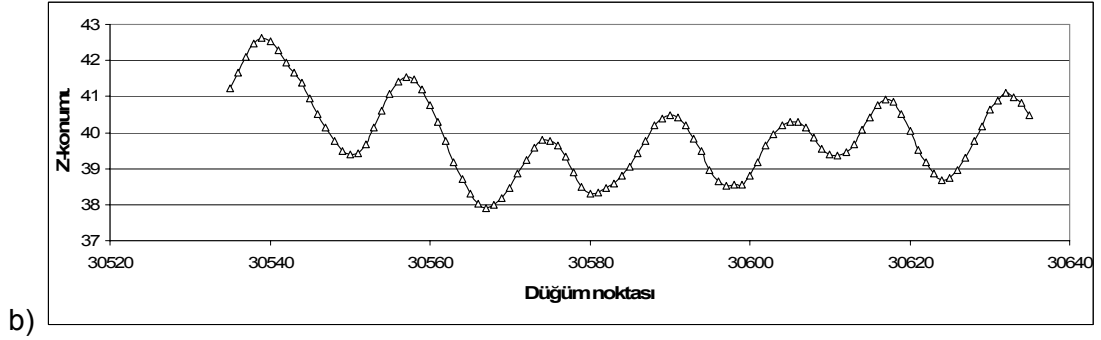
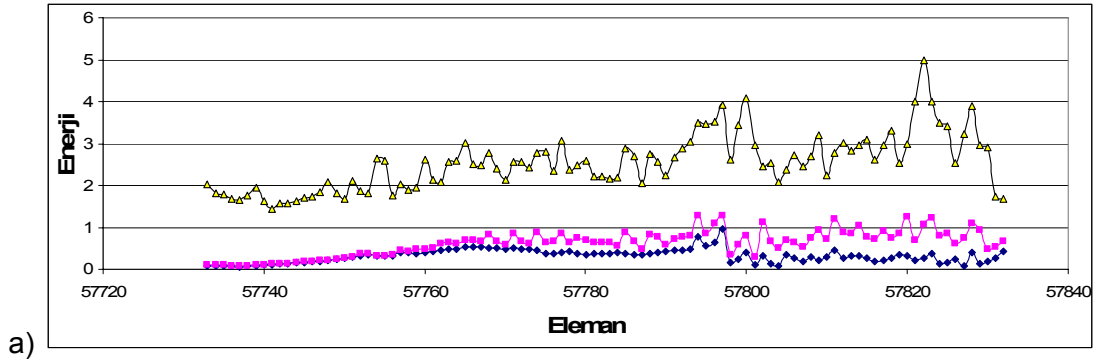
Şekil A.90: A1-110-YC kombinasyonu için: a) Bükülen kenar üzerindeki ilk 100 eleman üzerinde iç enerji dağılımı (MPa) (sırasıyla en alttan en üste $t=0,97s$, $t=1,72s$, $t=2,33s$, $t=10s$) b) Kenar ucundaki ilk 101 düğüm noktası için z-yönünde konum.



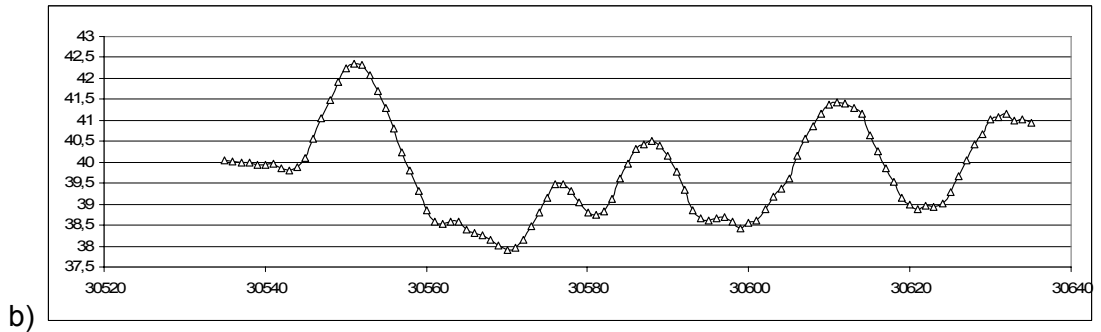
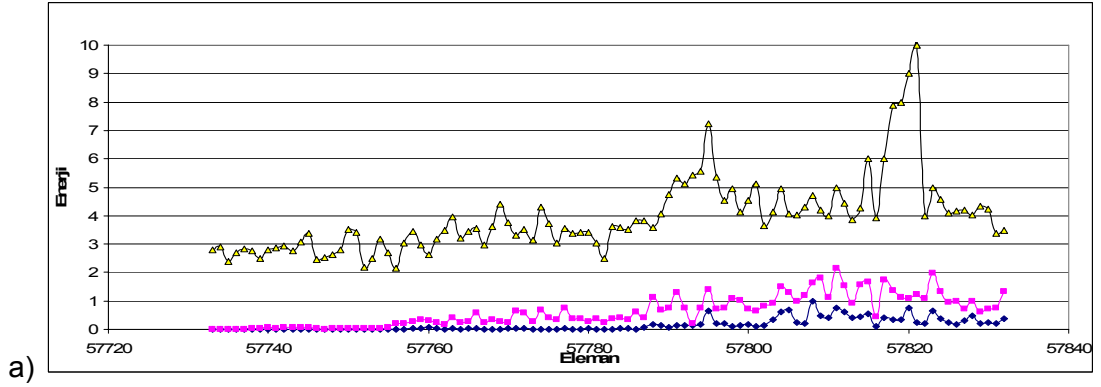
Şekil A.91: A1-100-AI kombinasyonu için: a) Bükülen kenar üzerindeki ilk 100 eleman üzerinde iç enerji dağılımı (MPa) (sırasıyla en alttan en üste $t=0,97s$, $t=1,72s$, $t=2,33s$, $t=10s$) b) Kenar ucundaki ilk 101 düğüm noktası için z-yönünde konum.



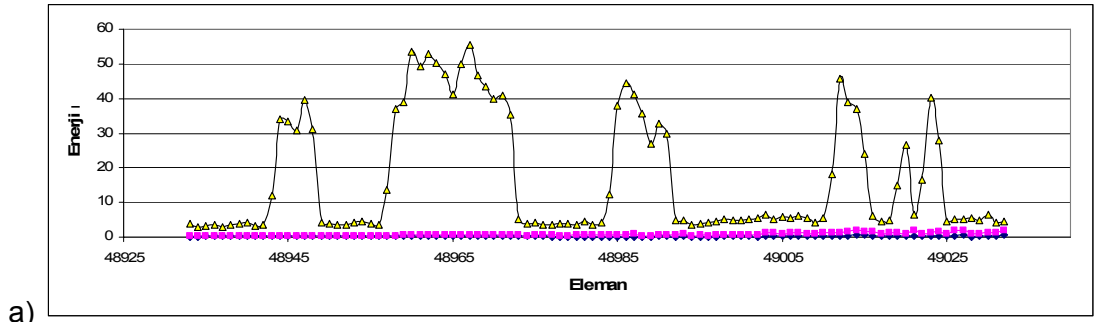
Şekil A.92: A1-100-YC kombinasyonu için: a) Bükülen kenar üzerindeki ilk 100 eleman üzerinde iç enerji dağılımı (MPa) (sırasıyla en alttan en üste $t=0,97s$, $t=1,72s$, $t=2,33s$, $t=10s$) b) Kenar ucundaki ilk 101 düğüm noktası için z-yönünde konum.



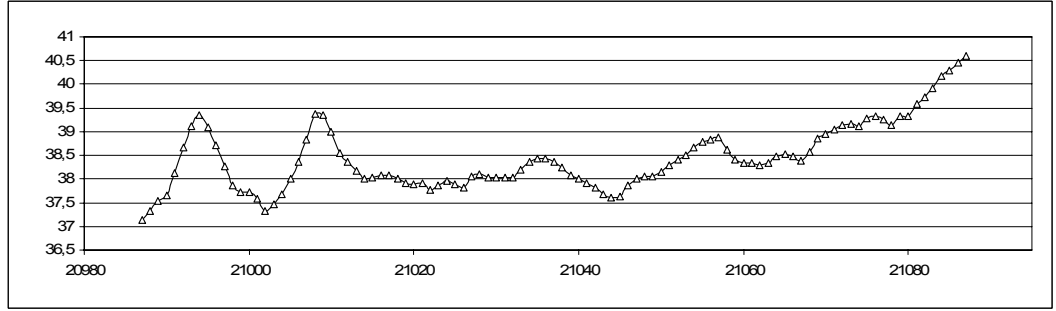
Şekil A.93: A2-110-AI kombinasyonu için: a) Bükülen kenar üzerindeki ilk 100 eleman üzerinde iç enerji dağılımı (MPa) (sırasıyla en alttan en üste $t=0,97s$, $t=1,57s$, $t=9s$) b) Kenar ucundaki ilk 101 düğüm noktası için z-yönünde konum.



Şekil A.94: A2-110-YC kombinasyonu için: a) Bükülen kenar üzerindeki ilk 100 eleman üzerinde iç enerji dağılımı (MPa) (sırasıyla en alttan en üste $t=0,97s$, $t=1,57s$, $t=9s$) b) Kenar ucundaki ilk 101 düğüm noktası için z-yönünde konum.

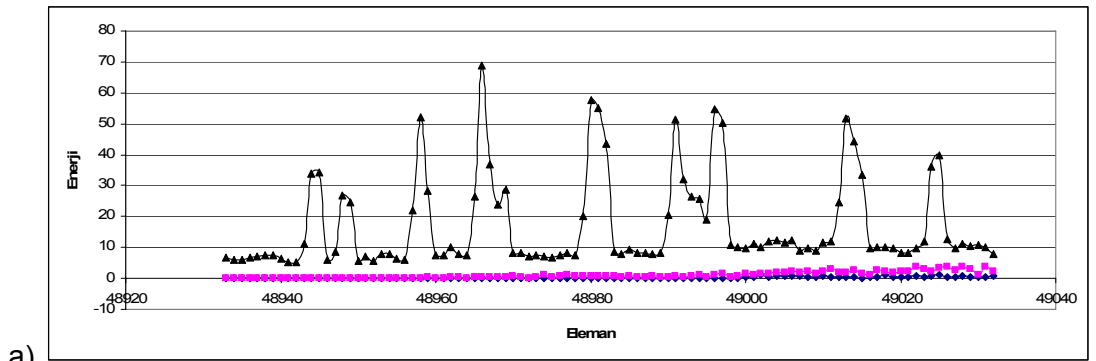


a)

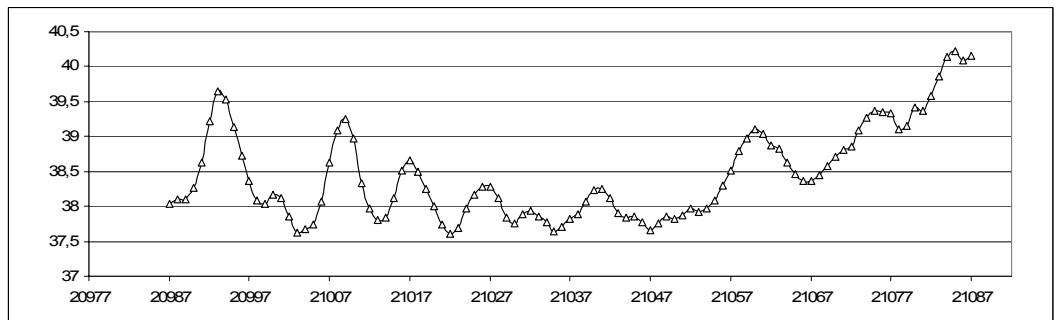


b)

Şekil A.95: A2-100-AI kombinasyonu için: a) Bükülen kenar üzerindeki ilk 100 eleman üzerinde iç enerji dağılımı (MPa) (sırasıyla en alttan en üste $t=0,97s$, $t=1,57s$, $t=9s$) b) Kenar ucundaki ilk 101 düğüm noktası için z-yönünde konum.

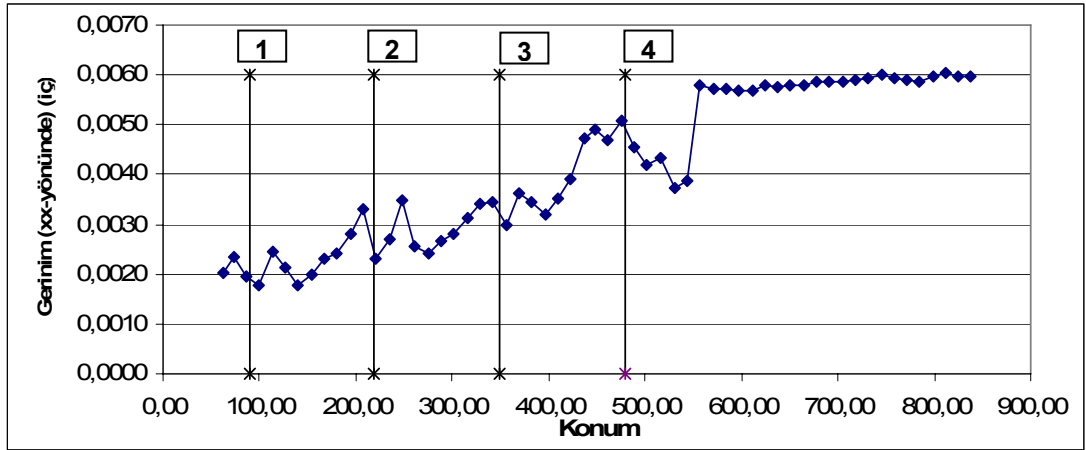


a)

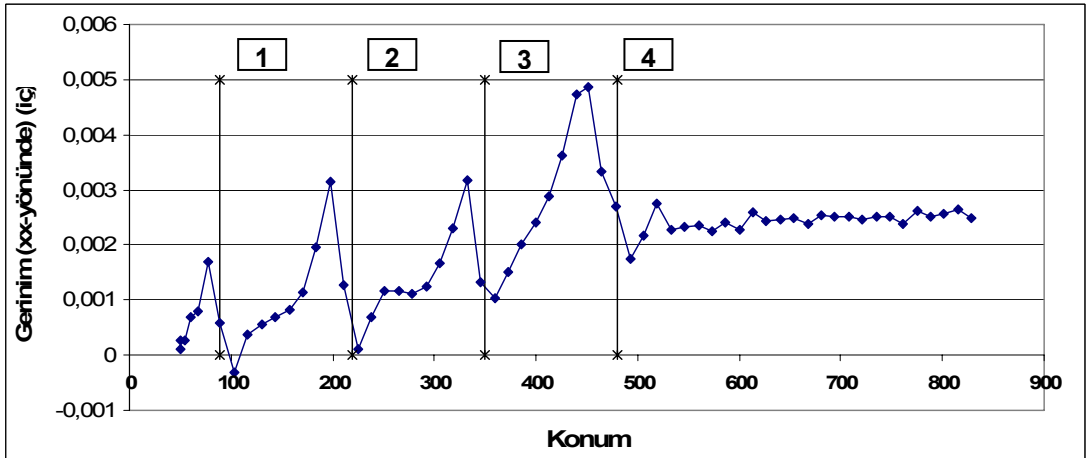


b)

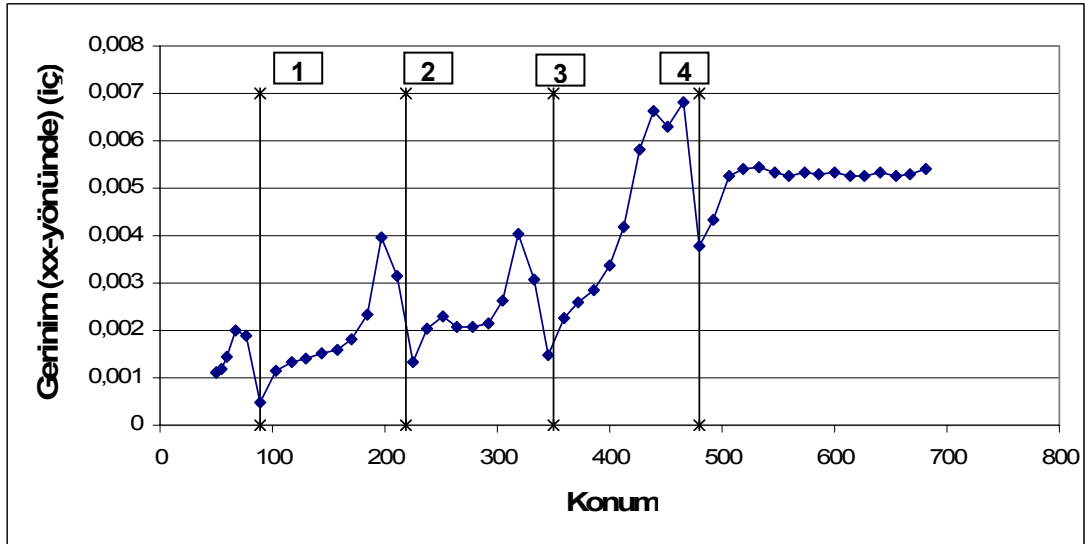
Şekil A.96: A2-100-YC kombinasyonu için: a) Bükülen kenar üzerindeki ilk 100 eleman üzerinde iç enerji dağılımı (MPa) (sırasıyla en alttan en üste $t=0,97s$, $t=1,57s$, $t=9s$) b) Kenar ucundaki ilk 101 düğüm noktası için z-yönünde konum.



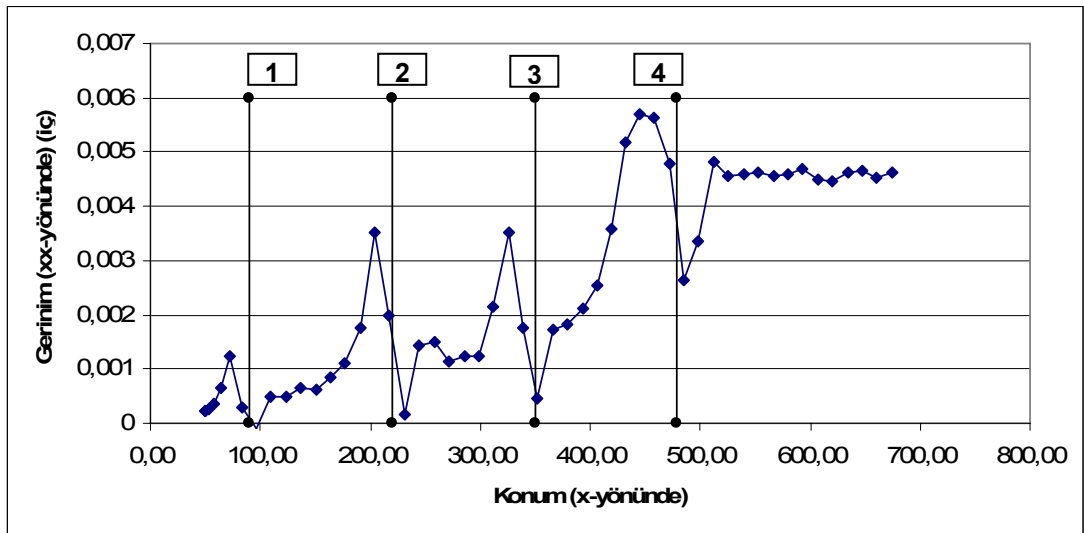
Şekil A.97: A1-110-AI kombinasyonu için, ilerleme yönünde, konuma bağlı ortalama iç yüzey gerinim değerleri (dikey çizgiler soldan sağa 1. ila 4. makara setleri merkez konumlarını simgelemektedir).



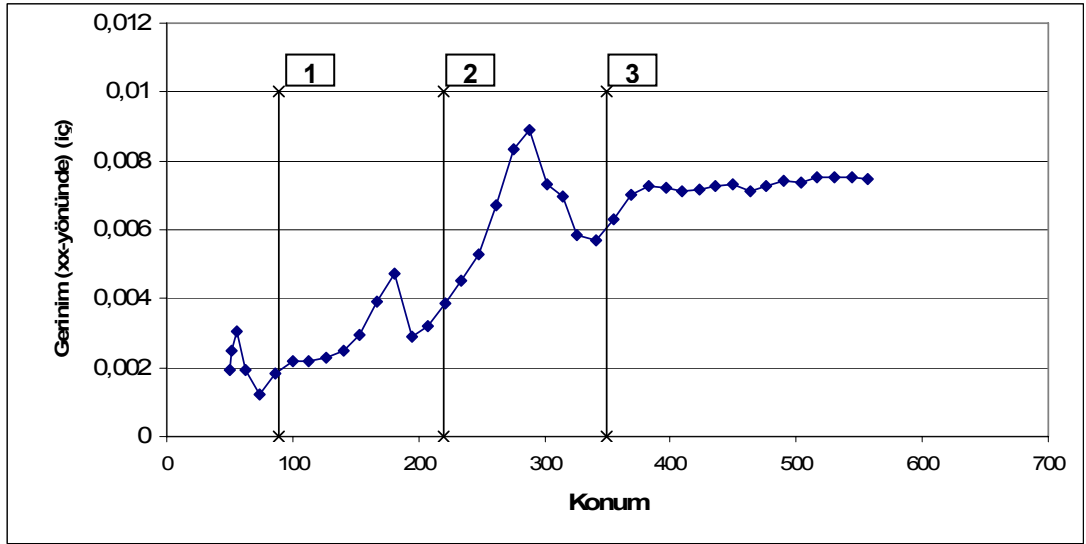
Şekil A.98: A1-110-YC kombinasyonu için konuma bağlı ortalama iç yüzey gerinim değerleri (dikey çizgiler soldan sağa 1. ila 4. makara setleri merkez konumlarını simgelemektedir).



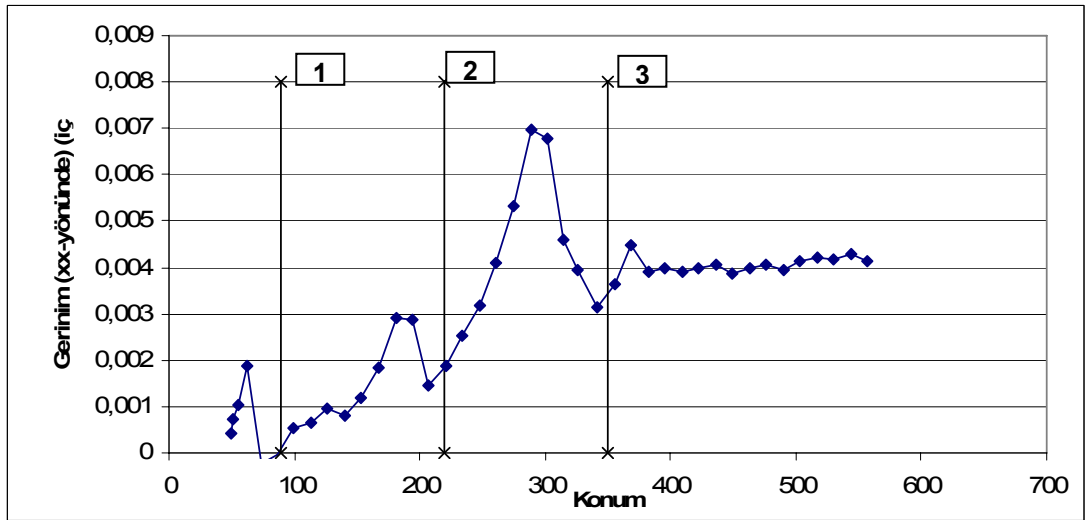
Şekil A.99: A1-100-AI kombinasyonu için, ilerleme yönünde, konuma bağlı ortalama iç yüzey gerinim değerleri (dikey çizgiler soldan sağa 1. ila 4. makara setleri merkez konumlarını simgelemektedir).



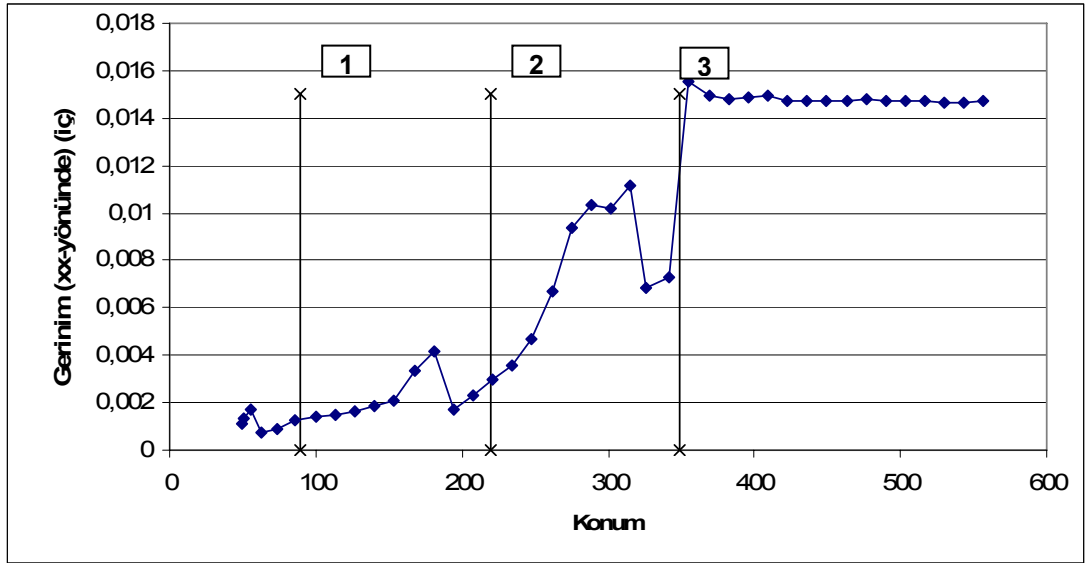
Şekil A.100: A1-100-YC kombinasyonu için, ilerleme yönünde, konuma bağlı ortalama iç yüzey gerinim değerleri (dikey çizgiler soldan sağa 1. ila 4. makara setleri merkez konumlarını simgelemektedir).



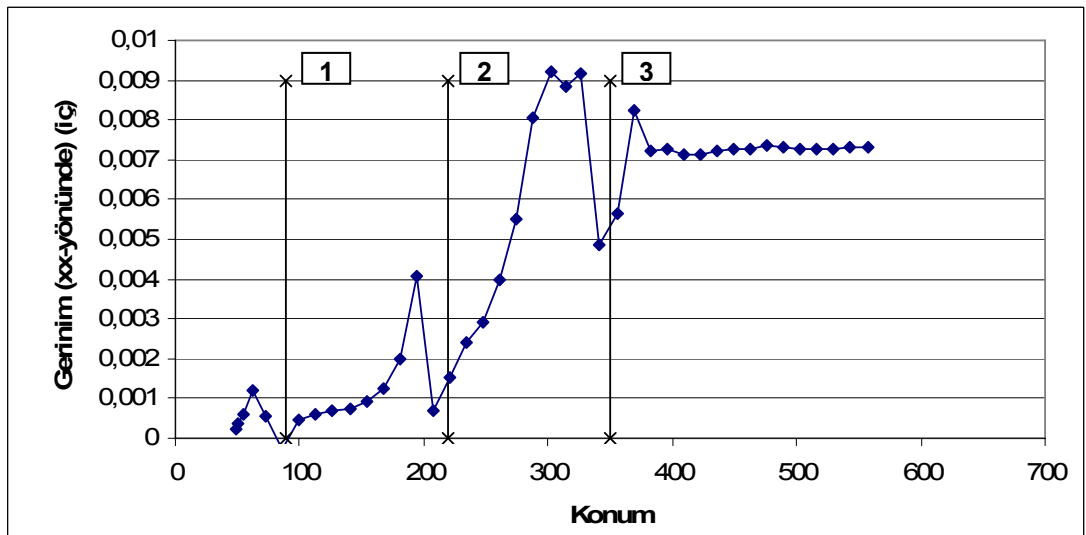
Şekil A.101: A2-110-AI kombinasyonu için, ilerleme yönünde, konuma bağlı ortalama iç yüzey gerinim değerleri (dikey çizgiler soldan sağa 1. ila 3. makara setleri merkez konumlarını simgelemektedir).



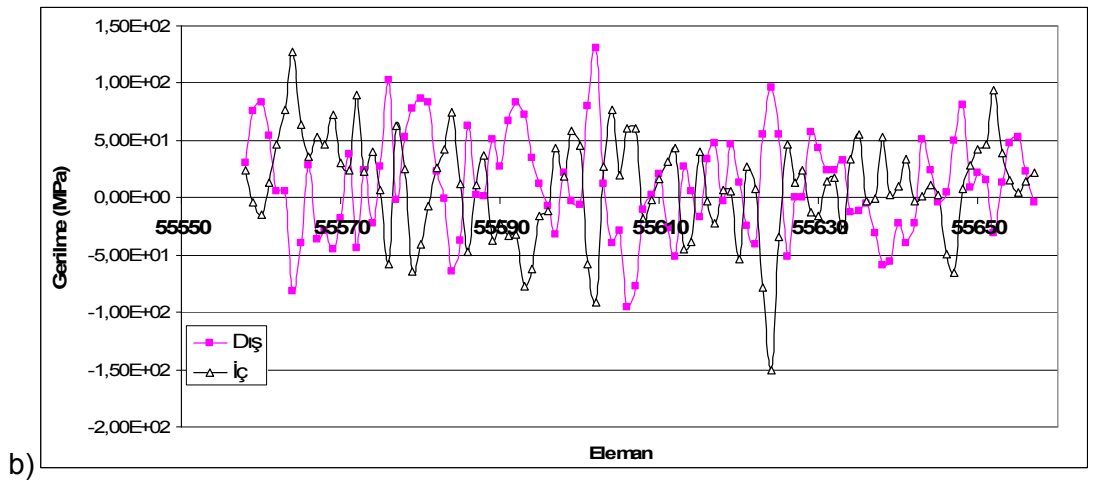
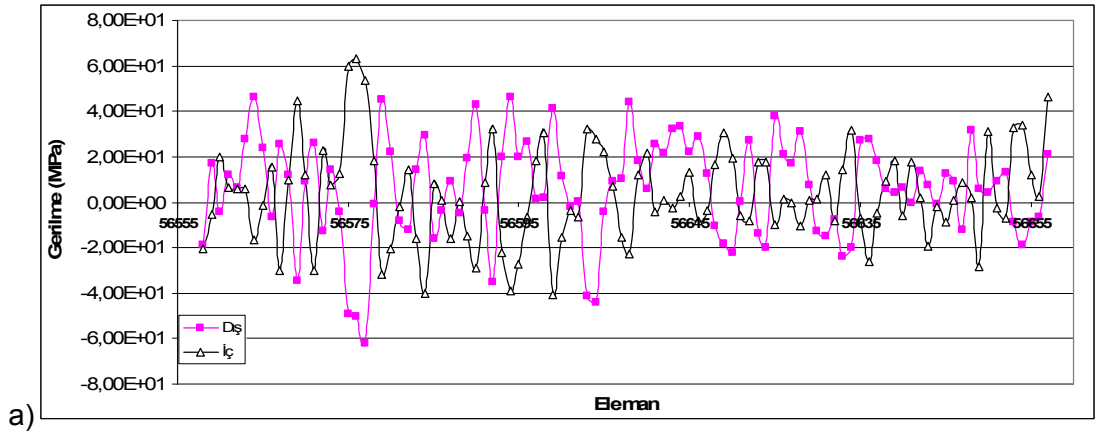
Şekil A.102: A2-110-YC kombinasyonu için, ilerleme yönünde, konuma bağlı ortalama iç yüzey gerinim değerleri (dikey çizgiler soldan sağa 1. ila 3. makara setleri merkez konumlarını simgelemektedir).



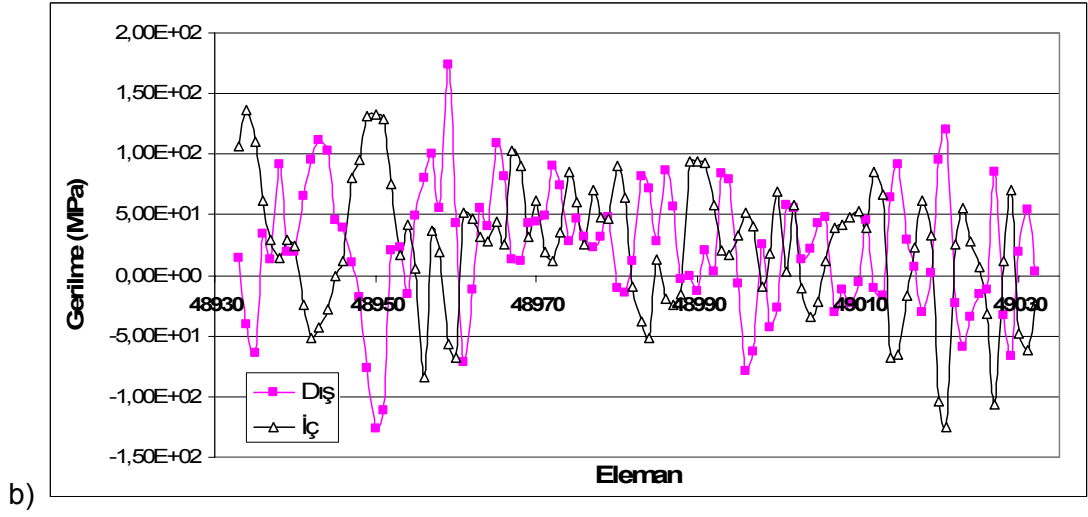
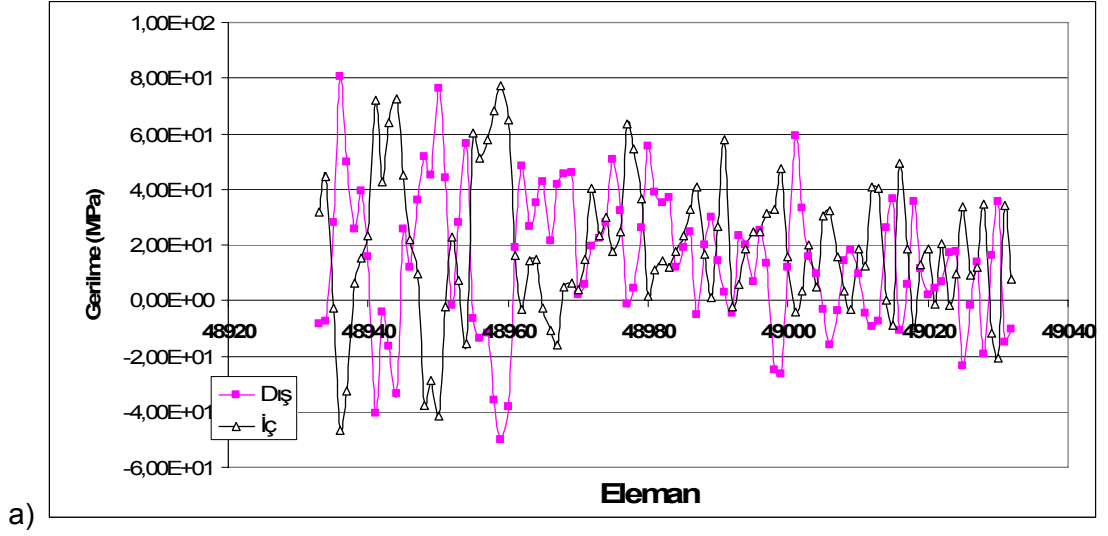
Şekil A.103: A2-100-AI kombinasyonu için, ilerleme yönünde, konuma bağlı ortalama iç yüzey gerinim değerleri (dikey çizgiler soldan sağa 1. ila 3. makara setleri merkez konumlarını simgelemektedir).



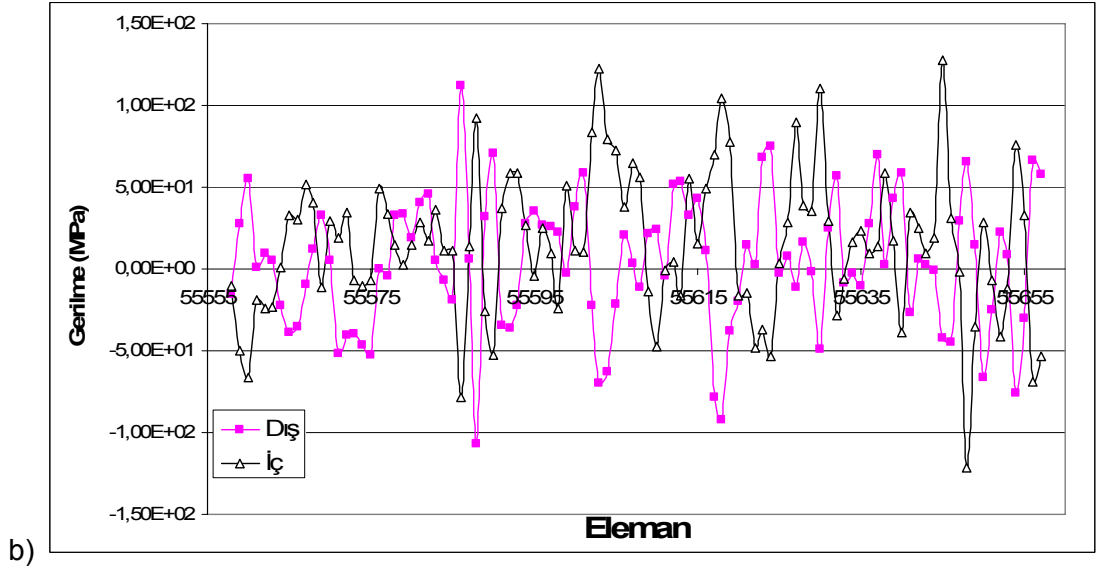
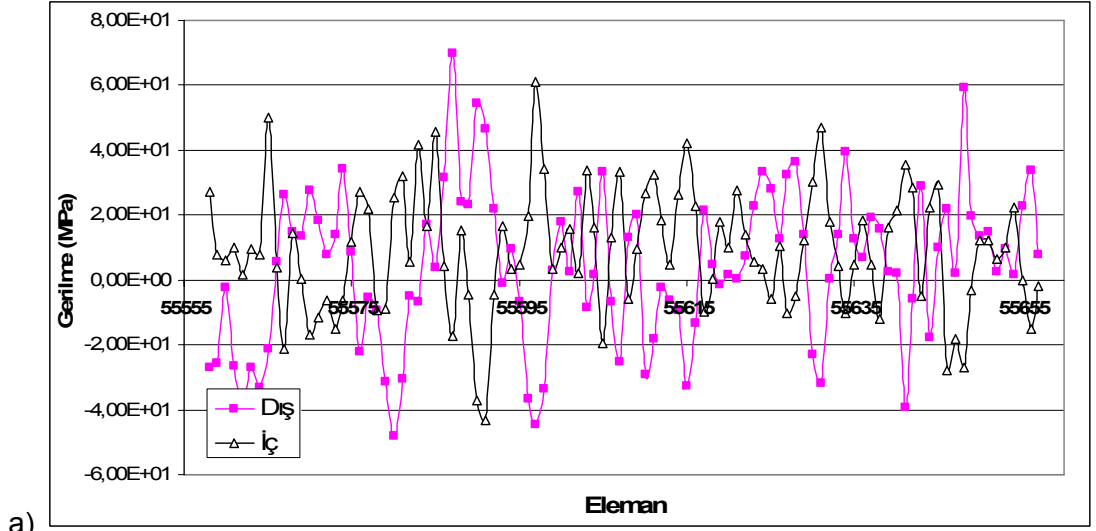
Şekil A.104: A2-100-YC kombinasyonu için, ilerleme yönünde, konuma bağlı ortalama iç yüzey gerinim değerleri (dikey çizgiler soldan sağa 1. ila 3. makara setleri merkez konumlarını simgelemektedir).



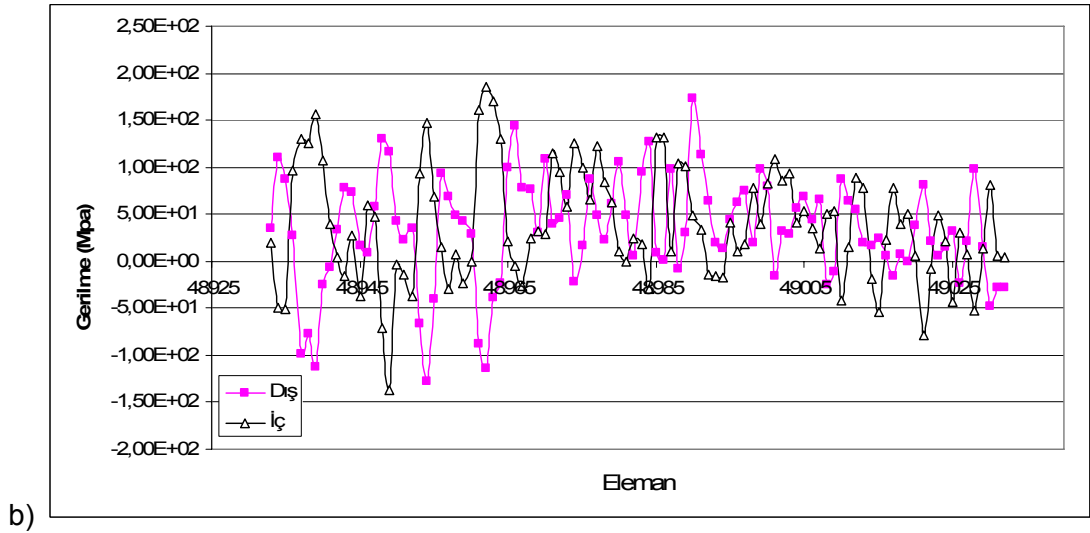
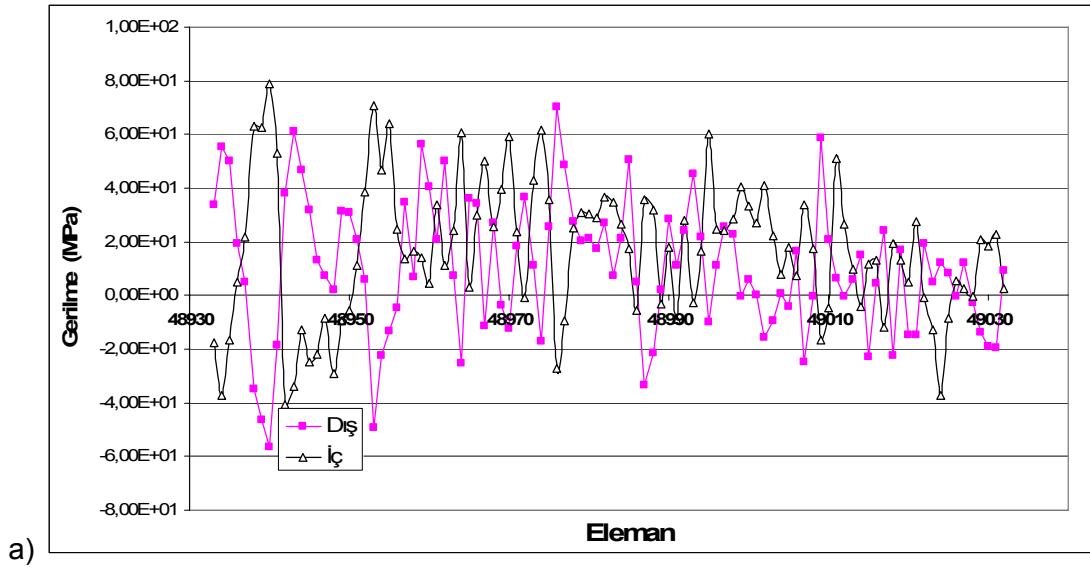
Şekil A.105: Geri yaylanma analizi sonrası kenar yüzey ucunda ilk 100 eleman üzerinde oluşan iç ve dış yüzey gerilme (xx-yönünde) dağılımları: a) A1-110-AI kombinasyonu için, b) A1-110-YC kombinasyonu için.



Şekil A.106: Geri yaylanma analizi sonrası kenar yüzey ucunda ilk 100 eleman üzerinde oluşan iç ve dış yüzey gerilme (xx-yönünde) dağılımları: a) A1-100-AI kombinasyonu için, b) A1-100-YC kombinasyonu için.



Şekil A.107: Geri yaylanma analizi sonrası kenar yüzey ucunda ilk 100 eleman üzerinde oluşan iç ve dış yüzey gerilme (xx-yönünde) dağılımları: a) A2-110-AI kombinasyonu için, b) A2-110-YC kombinasyonu için.



Şekil A.108: Geri yaylanma analizi sonrası kenar yüzey ucunda ilk 100 eleman üzerinde oluşan iç ve dış yüzey gerilme (xx-yönünde) dağılımları: a) A2-100-AI kombinasyonu için, b) A2-100-YC kombinasyonu için.

EK.B SEA MODELİ GİRDİ DOSYASI BİLGİLERİ

Bu çalışmada, Maker ve Zhu tarafından metal şekillendirme analizlerinde Ls-Dyna programı için tavsiye edilen aşağıdaki değerler kullanılmıştır [47]. Bunlardan bir kısmı hakkında şu şekilde bilgiler verilebilir:

*CONTROL_HOURLASS: Maker ve Zhu tarafından önerilen, kumsaati modeli olarak "Stiffness form type 2 : Flanagan-Belytschko" (IHQ = 4) formülasyonu kullanılmıştır. Bu metodun düşük hızlardaki (patlama/çarpışma simülasyonları yerine derin çekme gibi metal şekillendirmeler için) şekil değişimlerinde daha uygun olduğu için tavsiye edilmektedir.

*CONTROL_SHELL: Çarpılma açısı: aktif olarak kullanılmaktadır. Kullanılan elemanlarda şekil verme işleminde eğer çarpılma oluyorsa bunun dikkate alınması için, bu kontrol aktif hale getirilmiştir. Kalınlık değişimi: Bu hesaplama için, istupd değeri "1" yani hesaplama yapılması seçeneği seçildi. Ayrıca, üçgen eleman gerekmesi halinde kullanılması için, itrist seçeneğinde "1" yani gerekirse üçgen eleman opsiyonu seçildi. Teori olarak Belytschko-Wong-Chiang (10) kullanılmıştır.

*CONTROL_CONTACT: Kabuk eleman kalınlık hesabında, zaman kazandırması için, makaralar için hesaplama yapılmaması opsiyonu seçilmiştir (Shlthk=1).

*CONTROL_DAMPING veya *CONTROL_DYNAMIC_RELAXATION (versiyon farkından dolayı anahtar kelime farkı): Zhu ve Maker tarafından önerilen ve varsayılan değerler kullanılmıştır. Bunlar: yaklaşım kontrol (convergence control) için iterasyon (iteration) sayısı NRCYCK=250, Yaklaşım toleransı DRTOL= 0.001, Dinamik serbestlik faktörü DRFCTR=0.995

*DAMPING_GLOBAL: Temas sönümlemesinin yeterli olmaması üzerine malzemeye daha kararlı davranış göstermesi için genel bir sönümleme oranı bütün düğümlerde uygulanmıştır. En düşük frekans modunun 2 katı olarak uygulanması önerilmektedir.

*SECTION_SHELL: Sac malzeme hesaplamaları için çarpılma hesabı daha iyi olan "10 numara" Belytschko-Wong-Chiang shell element" kullanılmıştır. NIP (# of integration point) olarak sac malzeme için 7 kullanılmıştır. Makara setleri için ise daha hızlı hesaplama yapan Belytschko-Tsay (No.2) kullanılmıştır.

*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID: Sac malzemelerin makara ile ittirilmesi yani hareketin gerçek durumda olduğu gibi makaralar vasıtasıyla sağlanması için dönme hareketi verilmiştir. Bununla ilgili olarak zaman=0 sn makara = 0 radyan, zaman = 10 sn Makara = 40 radyanlık bir mesafe 5 makaradan da 10 saniye içinde geçmesi ve ortalama hız olarak makaralı bükme işlemlerinde gerçekçi bir rakam olan 180 mm/s hızına tekabül etmektedir.

Çalışmada kullanılan örnek SEA girdi dosyası (A1-110-AI için) 5 sayfayı geçtiği için aşağıda özetlenerek sunulmuştur.

```

*KEYWORD
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$
$ DYN3D(970) DECK WAS WRITTEN BY: ETA/FEMB VERSION 26
$ DATE : 05 Agu 2006 at 23:27:45
$
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$ (1) TITLE CARD.
*TITLE
A1-110-A1 (1) (plp)
$
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$ (2) CONTROL CARDS.
*CONTROL_TERMINATION
$ ENDTIM ENDCYC DTMIN ENDNEG ENDMAS
.100E+02 0 .000 .000 .000
*CONTROL_TIMESTEP
$
$
$ DTINIT SCFT ISDO TSLIMIT DTMS LCTM ERODE MS1ST
.000 .900 0 .750E-04
$
*CONTROL_HOURLASS
$ IHQ QH
4 .100
*CONTROL_BULK_VISCOSITY
$ Q2 Q1
1.500 .060
$
*CONTROL_SHELL
$ WRPANG ITRIST IRNXX ISTUPD THEORY BWC MITER
20.00 1 -1 1 10 1 1
$
*CONTROL_CONTACT
$ SLSFAC RWPNAL ISLCHK SHLTHK PENOPT THKCHG ORIEN
0.01 1 1 1 1
$ USRSTR USRFAC NSBCS INTERM XPENE SSTHK ECDT TIEDPRJ
0 0 10 0 4.000
$
*CONTROL_ENERGY
$ HGEN RWEN SLNTEN RYLEN
1 2 2 1
$
*CONTROL_DAMPING
$ NRCYCK DRTOL DRFCTR DRTERM TSSFDR IRELAL EDTTL IDRFLG
250 .001 .995
$
*CONTROL_OUTPUT
$ NPOPT NEECHO NREFUP IACCOP OPIFS IPNINT IKEDIT
0 0 1 0 .000 0 200
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$ (4) DATABASE CONTROL CARDS FOR ASCII FILE
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*DATABASE_GLSTAT
.750E-01
*DATABASE_RCFORC
.750E-01
*DATABASE_BNDOUT
$ DT/CYCL LC DT NOBEAM
.750E-01
*DATABASE_ELOUT
$ DT/CYCL LC DT NOBEAM
.750E-01
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$ (5) DATABASE CONTROL CARDS FOR BINARY FILE
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*DATABASE_BINARY_D3PLOT
$ DT/CYCL LC DT NOBEAM
.750E-01
*DATABASE_BINARY_D3THDT
$ DT/CYCL LC DT NOBEAM
.750E-01
$
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*DATABASE_EXTENT_BINARY

```

```

$   neiph      neips      maxint      strflg      sigflg      epsflg      rltflg      engflg
$     0         0         3         1         1         1         1         1
$   cmpflg     ieverp     beamip     dcomp       shge        stssz       n3thdt
$     0         0         0         0         0         0         0
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$                                     (6) DEFINE PARTS CARDS
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*PART
$HEADING
PART PID =          2 PART NAME :ALT1
$   PID      SID      MID      EOSID      HGID      GRAV      ADPOPT      TMID
$     2         2         1
*PART
$HEADING
PART PID =          3 PART NAME :ALT2
$   PID      SID      MID      EOSID      HGID      GRAV      ADPOPT      TMID
$     3         3         1
*PART
$HEADING
PART PID =          4 PART NAME :ALT3
$   PID      SID      MID      EOSID      HGID      GRAV      ADPOPT      TMID
$     4         4         1
*PART
$HEADING
PART PID =          5 PART NAME :ALT4
$   PID      SID      MID      EOSID      HGID      GRAV      ADPOPT      TMID
$     5         5         1
*PART
$HEADING
PART PID =          6 PART NAME :ALT5
$   PID      SID      MID      EOSID      HGID      GRAV      ADPOPT      TMID
$     6         6         1
*PART
$HEADING
PART PID =          7 PART NAME :UST1
$   PID      SID      MID      EOSID      HGID      GRAV      ADPOPT      TMID
$     7         7         1
*PART
$HEADING
PART PID =          8 PART NAME :UST2
$   PID      SID      MID      EOSID      HGID      GRAV      ADPOPT      TMID
$     8         8         1
*PART
$HEADING
PART PID =          9 PART NAME :UST3
$   PID      SID      MID      EOSID      HGID      GRAV      ADPOPT      TMID
$     9         9         1
*PART
$HEADING
PART PID =         10 PART NAME :UST4
$   PID      SID      MID      EOSID      HGID      GRAV      ADPOPT      TMID
$    10        10         1
*PART
$HEADING
PART PID =         11 PART NAME :UST5
$   PID      SID      MID      EOSID      HGID      GRAV      ADPOPT      TMID
$    11        11         1
$
$ ----- SAC MALZEME - TANIMLAMA -----
$
*PART
$HEADING
PART PID =         12 PART NAME :SAC
$   PID      SID      MID      EOSID      HGID      GRAV      ADPOPT      TMID
$    12        12         2         0         0         0         0         0
$
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$                                     (7) MATERIAL CARDS
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*MAT_RIGID
$   mid      ro      e      pr      n      couple      m      alias
$     1 7.830E-09 2.070E+05 3.300E-01 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
$   cmo      con1      con2
$     1.0      7.0      4.0
$lco or al      a2      a3      v1      v2      v3
$

```

```

*MAT_POWER_LAW_PLASTICITY
$      MID      RO      E      PR      K      n      src      srp
$      2 2.700E-09 6.427E+04 3.300E-01 1.864E+02 4.86E-02 0.0 0.0
$      SIGY      VP
$      1.390E+02
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$                      (7.1) SECTION CARDS
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$
*SECTION_SHELL
$      SID      ELFORM      SHRF      NIP      PROPT      QR/IRID      ICOMP      SETYP
$      2          2      .100E+01 .500E+01 .000E+00 .000E+00      0          1
$      T1          T2          T3          T4          NLOC
$      .200E+01 .200E+01 .200E+01 .200E+01 .000E+00
.....
*SECTION_SHELL
$      SID      ELFORM      SHRF      NIP      PROPT      QR/IRID      ICOMP      SETYP
$      11         2      .100E+01 .500E+01 .000E+00 .000E+00      0          1
$      T1          T2          T3          T4          NLOC
$      .200E+01 .200E+01 .200E+01 .200E+01 .000E+00
$
$----- SAC MALZEME shell ID=12 -----
$
*SECTION_SHELL
$      SID      ELFORM      SHRF      NIP      PROPT      QR/IRID      ICOMP      SETYP
$      12         10 .100E+01 .700E+01 .000E+00 .000E+00      0          1
$      T1          T2          T3          T4          NLOC
$      .500E+00 .500E+00 .500E+00 .500E+00 .000E+00
$
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$                      (8) NODAL POINT CARDS
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*NODE
$      NODE      X      Y      Z      TC      RC
$      1 .409910000E+01 .206499100E+03 .000000000E+00
$      2 .383282100E+01 .209287600E+03 .000000000E+00
...
$      21086 .464473700E+02 .251399100E+03 .550000000E+02
$      21087 .494490900E+02 .251399100E+03 .550000000E+02
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$                      (10) BEAM ELEMENT CARDS
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*ELEMENT_BEAM
$      EID      PID      N1      N2      N3
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$                      (11) SHELL ELEMENT CARDS
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*ELEMENT_SHELL
$      EID      PID      N1      N2      N3      N4
$      1          2      1      2      3      4
$      2          2      2      5      6      3
...
$      99         2      197     199     200     198
$      100        2      199      1      4      200
$
$      101        3      300     301     302     303
$      102        3      301     304     305     302
...
$      299        3      497     499     599     598
$      300        3      499     303     501     599
$
$      301        4      600     601     602     603
$      302        4      601     604     605     602
...
$      499        4      797     799     899     898
$      500        4      799     603     801     899
$
$      501        5      900     901     902     903
$      502        5      901     904     905     902
...
$      799        5      1198    1199    1299    1298
$      800        5      1199    1101    1201    1299
$
$      2000       6      1300    1301    1302    1303
$      2001       6      1301    1304    1305    1302
...
$      2958       6      2556    2558    2103    2100

```

\$	2959	6	2558	2559	2105	2103										
	801	7	12000	12001	12002	12003										
	802	7	12001	12004	12005	12002										
	...															
	899	7	12196	12198	12199	12197										
\$	900	7	12198	12000	12003	12199										
	901	8	12200	12201	12202	12203										
	902	8	12201	12204	12205	12202										
	...															
	998	8	12394	12396	12397	12395										
	999	8	12396	12398	12399	12397										
\$	1000	8	12398	12200	12203	12399										
	1001	9	12400	12401	12402	12403										
	1002	9	12401	12404	12405	12402										
	...															
	1099	9	12596	12598	12599	12597										
\$	1100	9	12598	12400	12403	12599										
	1101	10	12600	12601	12602	12603										
	1102	10	12601	12604	12605	12602										
	...															
	1199	10	12796	12798	12799	12797										
\$	1200	10	12798	12600	12603	12799										
	1201	11	12800	12801	12802	12803										
	1202	11	12801	12804	12805	12802										
	...															
	1414	11	13001	13073	12803	12803										
	1415	11	13039	13041	13040	13040										
\$																
\$	SAC MALZEME															
\$																
	49033	12	13132	13438	13439	13133										
	49034	12	13133	13439	13440	13134										
	...															
	56656	12	20779	21085	21086	20780										
	56657	12	20780	21086	21087	20781										
\$	----	1	----	2	----	3	----	4	----	5	----	6	----	7	----	8
\$	(16) BOUNDARY CONDITION CARDS															
\$	----	1	----	2	----	3	----	4	----	5	----	6	----	7	----	8
\$	*BOUNDARY_SPC_NODE															
\$	NID/NSID	CID	DOFX	DOFY	DOFZ	DOFRX	DOFRY	DOFRZ								
\$	Sac malzeme taban simetri ekseni z ekseni hareket kisitlamasi															
	13132	0	0	0	1	0	0	0								
	...															
	13366	0	0	0	1	0	0	0								
\$	Sac malzeme taban simetri ekseni y ve z hareket kisitlamasi															
	13367	0	0	1	1	0	0	0								
	...															
	13437	0	0	1	1	0	0	0								
\$	Sac malzeme uzeri y-yonunde hareket kisitlamasi															
	13673	0	0	1	0	0	0	0								
	...															
	13743	0	0	1	0	0	0	0								
\$	Bukulen kenar ucu x-yonunde donme kisitlamasi															
	21017	0	0	0	0	1	0	0								
	...															
	21087	0	0	0	0	1	0	0								
\$																
\$	----	1	----	2	----	3	----	4	----	5	----	6	----	7	----	8
\$	(16) BOUNDARY CONDITION CARDS															
\$	----	1	----	2	----	3	----	4	----	5	----	6	----	7	----	8
\$	*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID															
\$	pid	dof	vad	lcid	sf	vid	death									
	7	7	2	1	1.0											
.....																
\$	*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID															
\$	pid	dof	vad	lcid	sf	vid	death									
	11	7	2	1	1.0											
\$	*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID															
\$	pid	dof	vad	lcid	sf	vid	death									

EK-C KAVRAMLAR SÖZLÜĞÜ

Bu çalışmada İngilizce kaynaklarda kullanılan terimler ve kavramlara karşılık olarak aşağı sunulmakta olan Türkçe karşılıklar kullanılmıştır.

İngilizce Kavram	Karşılık olarak kullanılan Türkçe kavram
Bow	: Düşey düzlemde eğilme
Buckling	: Burkulma
CAD/CAM	: BDT/BDÜ (Bilgisayar Destekli Tasarım, Bilgisayar Destekli Üretim)
Channel section	: Simetrik u-tipi açık profillerde
Cold roll forming	: Makaralı-bükme işlemi
Compressive force	: Basma kuvveti
Compressive strain	: Basma uzama oranı
Contact	: Temas
Crimp	: Dalga, kıvrım
Curvature	: Eğrilik
Damping	: Sönümlenme
Damping matrix	: Sönümlenme matrisi
Default	: Varsayılan
Deformation Length	: Şekil değişim uzunluğu (iki röle arasında kalan sac malzeme uzunluğu)
Displacement	: Yer değiştirme
Distortion	: Çarpılma, biçim bozukluğu
Drift	: Kayma, sürüklenme
Edge	: Kenar
Edge buckling	: Kenar burkulması
Edge waviness	: Kenar dalgalanması
Effective	: Eşdeğer
Empirical	: Ampirik, deneysel
Exit Straightener	: Çıkış düzelticisi
Expert system	: Uzman sistem
Explicit algorithm	: Dinamik açık algoritma
Exponent	: Üst sayı, üstel
Fine mesh	: Sıkı (sonlu) eleman ağı
Flange	: Kenar
Force	: Kuvvet
Forming	: Şekil verme, şekillendirme

Grain size	: Malzeme içindeki tanecik boyu
Grid	: Izgara
Hardening rule	: Sertleşme kuralı
Horizontal curvature	: Yatay ekseninde eğrilik
Hybrid	: Karma
Implicit algorithm	: Kapalı algoritma
Internal energy	: İç enerji, elastik-plastik deformasyon enerjisi
Local buckling	: Bölgesel burkulma
Longitudinal	: Boylamasına
Mass	: Kütle
Mass matrix	: Kütle matrisi
Membrane strain	: Zar gerinimi
Mesh	: Ağ, sonlu elemanlarla örülen ağ
Mild distortions	: Hafif şekil bozuklukları
Mild steel	: Sünek çelik
Moment of inertia	: Atalet momenti
Node	: Düğüm
Ondulation	: Kenar dalgalanması
Outlier	: Sayısal hata
Out-of-plane bending	: Yüzey dışına doğru bükme
Over bend	: Aşırı bükme (geri yaylanma sonrası istenilen değeri alması için)
Overhung	: Ankastr, rölelerin tezgaha tek bir taraftan bağlandığı düzenek
Parameter	: Parametre, değişken, etken
Plane	: Düzlem
Peak	: Tepe
Re-meshing	: Yeniden (sonlu) elemanla kaplama
Residual stress	: Kalıntı gerilme
Rigid	: Katı
Roll	: Makara
Roll-forming	: Makaralı bükme işlemi
Shearing force	: Kesme kuvveti, kayma kuvveti
Sheet	: Sac
Shell Element	: Kabuk elemanı
Springback	: Geri yaylanma, geri esneme
Steel	: Çelik
Stiffener	: Kuvvetlendirici
Stiffness	: Rijitlik, bükülmezlik, bükülme direnci,
Stiffness matrix	: Rijitlik matrisi
Strain	: Gerinim, birim şekil değişimi
Strain gauge	: Gerinim ölçer, uzama ölçer

Stretching	:	Esneme
Stress	:	Gerilme
Strip	:	Şerit
Surface Strain	:	Yüzey uzama oranları
Sweep	:	Yana doğru eğilme
Tensile force	:	Çekme kuvveti
Transverse	:	Genişlik yönünde
Transverse shift	:	Enine hareket
Twist	:	Burulma, burma
V-section	:	V kesit
Warp	:	Çarpılma
Waviness	:	Dalgalanma
Web	:	Cep, taban, kanal
Web-buckling	:	Cep oluşumu, taban düzlemde potlukların oluşması
Work-hardening	:	Pekleşme, işleme sertleşmesi
Yield	:	Akma
Yield stress	:	Akma gerilmesi

ÖZGEÇMİŞ

Osman Eldar DÖNMEZ 28 Ocak 1973 yılında Çankırı'da doğmuştur. Ortaokul ve lise öğrenimini Yükseliş Koleji'nde (Ankara) tamamladıktan sonra 1990 yılında ODTÜ Makina Mühendisliği bölümünde başladığı üniversite eğitimini 1995 yılında tamamlayarak lisans derecesini almıştır. Pittsburgh Üniversitesinde 1996 yılında makina mühendisliği bölümünde başladığı yüksek lisans eğitimini 1997 yılında tamamlayarak derecesini almıştır. Yazarın ilgi konuları arasında sonlu elemanlarla analiz, simülasyon, BDT/BDÜ, vb. sıralanabilir.

Yazar, 1998 yılında Marmara Üniversitesinde Makina Mühendisliği BDT/BDÜ Laboratuvarında araştırma görevlisi olarak çalışmaya başlamış, 2000 yılından itibaren ise Tusaş Havacılık ve Uzay Sanayi A.Ş.'de alt sözleşme yöneticisi olarak çalışma hayatına devam etmektedir.