

**T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÇOK PARÇALI SAC KONSTRÜKSİYONLARDA KÜMÜLATİF ÖLÇÜ  
SAPMALARININ ÖLÇME VE ANALİZLERE DAYALI OLARAK BELİRLENMESİ  
VE BİR ALGORİTMA GELİŞTİRİLMESİ**

**CEM YURCİ**

**DOKTORA TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
İMAL USULLERİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN  
DOÇ. DR. ANIL AKDOĞAN**

**İSTANBUL, 2017**

**T.C.**  
**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÇOK PARÇALI SAC KONSTRÜKSİYONLARDA KÜMÜLATİF ÖLÇÜ SAPMALARININ ÖLÇME  
VE ANALİZLERE DAYALI OLARAK BELİRLENMESİ VE BİR ALGORİTMA GELİŞTİRİLMESİ**

Cem YURCİ tarafından hazırlanan tez çalışması 21/12/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı**

Doç. Dr. Anıl AKDOĞAN

Yıldız Teknik Üniversitesi

**Eş Danışman**

Prof. Dr. M. Numan DURAKBAŞA

Viyana Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

Doç. Dr. Anıl AKDOĞAN

Yıldız Teknik Üniversitesi

\_\_\_\_\_

Prof. Dr. Nihat AKKUŞ

Marmara Üniversitesi

\_\_\_\_\_

Doç. Dr. Ahmet SAĞIRLI

Yıldız Teknik Üniversitesi

\_\_\_\_\_

Prof. Dr. Erhan ALTAN

Yıldız Teknik Üniversitesi

\_\_\_\_\_

Prof. Dr. Adnan DİKİCİOĞLU

İstanbul Teknik Üniversitesi

\_\_\_\_\_

Bu alışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü' nün 2014-06-01-DOP04 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

## ÖNSÖZ

---

Direnç nokta kaynağı, otomotiv başta olmak üzere, sac malzemelerden imalat yapan kuruluşlar için çok önemli bir yer tutmaktadır. Çünkü, özellikle ince sac parçaların montajı için, bunların birleştirmelerinde uygulanan yegane yöntemin bu olduğu söylene büyük bir hata yapılmamış olur. Asıl hedef, Geometrik Mamul Özellikleri kapsamında ölçü ve biçim tamlığı yüksek imalat yapmaktır. Bunu sağlamak üzere, imalat öncesinde, sac parçalardan başlayarak gruplanmış konstrüksiyonlar için ortaya çıkabilecek boyut toleranslarını tahmin etmek büyük önem taşımaktadır.

Endüstri 4.0'a giden yolda, tasarım ve imalat aşamalarının fonksiyonel olarak nasıl bir araya getirilebileceği de gösterilmiş olmaktadır. Tez konusunda yapılan çalışmaların asıl amacı, sac parça konstrüksiyonlarında ölçü ve biçim sapmaları için önceden tahminde bulunarak önlem alınmasını sağlamak olsa da, bir diğer hedef de Endüstri 4.0 yolunda adım atmaktır. Bunun da imalatçılar için önemli bir dayanak noktası oluşturabileceği düşünülmüştür.

Tez çalışmaları sırasında bana her türlü katkıyı sunan danışman hocam Sayın Doç. Dr. Anıl AKDOĞAN'a teşekkürü bir borç bilirim. Bu yolda bana yardımcı olan hocalarım eş danışmanım Sayın Prof. Dr. Numan DURAKBAŞA'ya, Sayın Prof. Dr. Nihat AKKUŞ'a, Sayın Prof. Dr. Haydar LİVATYALI ve Sayın Doç. Dr. Ahmet SAĞIRLI'ya da değerli katkıları için teşekkür ederim.

Sağlamış olduğu doktora burs imkanı ile tez çalışmalarımın gerçekleştirilmesinde başlıca destekçim olan TÜBİTAK BİDEB'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmasının endüstriyel uygulanması açısından, Doblo USA aracının ön şasi grubundan örnek olarak alınmasında yardımcı olan TOFAŞ Fabrikasının Üretim Teknolojileri Bölümü'ne, söz konusu örneğin hat üzerindeki imalatına yardımcı olan Gövde Bölümü çalışanlarına, bu sırada bana yardımcı olan Toleranslandırma Uzmanı Sayın Zelkif AYDIN'a, malzeme testlerini gerçekleştirdiğim Ermetal firması yetkililerine, punta kaynağı deneyimlerini gerçekleştirdiğim Mistaş A.Ş. firmasının sahibi rahmetli Sayın Türker ÇİLİNGİR'e, kaynak simülasyon yazılımı konusunda bana çok büyük desteği olan Netform A.Ş. sahibi Sayın Mert AYGİN'e ve ayrıca Onatus Firması yetkililerine, tez çalışmasının başındaki temrinlik çalışması için destek olan Öztiryakiler A.Ş.'ye, bu sırada tarama desteği veren ORSA Danışmanlık Şirketi ve CADEM A.Ş.'ye, çalışmaya başlarken yardımcı olan Beyçelik ve Renault firması çalışanlarına, malzeme



desteği veren Borçelik'e ve yine desteklerini gördüğüm REDLAB Mühendislik şirketimizdeki ortaklarım Yalçın TAŞ ve Ertan TAŞ'a çok teşekkür ederim.

Bu uzun ve zorlu süreçte benden desteklerini esirgemeyen ve hep yanımda olan aileme çok teşekkür ederim. Aynı zamanda Hocam olan babam Sayın Prof. M. Emin YURCİ'ye hem mesleki ve hem de özel yaşamım boyunca arkamda olmasından dolayı ayrıca çok teşekkür ederim.

Aralık, 2017

Cem YURCİ

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                                   | Sayfa |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| SİMGE LİSTESİ .....                                                                               | ix    |
| KISALTMA LİSTESİ .....                                                                            | xi    |
| ŞEKİL LİSTESİ.....                                                                                | xii   |
| ÇİZELGE LİSTESİ .....                                                                             | xvi   |
| ÖZET .....                                                                                        | xvii  |
| ABSTRACT .....                                                                                    | xix   |
| BÖLÜM 1                                                                                           |       |
| GİRİŞ .....                                                                                       | 1     |
| 1.1    Literatür Özeti .....                                                                      | 1     |
| 1.2    Tezin Amacı .....                                                                          | 11    |
| 1.3    Orijinal Katkı.....                                                                        | 12    |
| BÖLÜM 2                                                                                           |       |
| DİSTORSİYON NEDENİ OLARAK PUNTA KAYNAĞI VE GERİ ESNEME .....                                      | 15    |
| 2.1    PUNTA KAYNAĞI .....                                                                        | 15    |
| 2.1.1    Yöntem Tanıtımı ve Esasları.....                                                         | 15    |
| 2.1.2    Nokta direnç kaynağının adımları.....                                                    | 17    |
| 2.1.3    Punta Kaynağı Kalitesine Etki Eden Faktörler – Punta Kaynağı<br>Parametreleri .....      | 20    |
| 2.1.3.1    Kaynak akımı .....                                                                     | 21    |
| 2.1.3.2    Elektrodlar ve Elektrod Kuvveti.....                                                   | 22    |
| 2.1.3.3    Sıkma ve tutma zamanı .....                                                            | 23    |
| 2.1.3.4    Diğer ayarlanabilir parametreler.....                                                  | 23    |
| 2.1.4    Isı Girişi .....                                                                         | 24    |
| 2.1.5    Soğuk haddelenmiş kaplanmış ve kaplanmamış çelik sacların kaynak<br>edilebilirliği ..... | 24    |
| 2.1.5.1    Sacların kaynak edilebilirliği .....                                                   | 24    |

|                                          |                                                                               |           |
|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.1.5.2                                  | Galvanize çelik sacların direnç kaynağı .....                                 | 26        |
| 2.1.5.3                                  | Yapıştırılmış ve boya ile kaplanmış çeliklerin kaynağı.....                   | 27        |
| 2.1.6                                    | Punta Kaynağında Kullanılan Elektrodlar .....                                 | 27        |
| 2.1.7                                    | Punta Kaynağında Temas Direnci, Belirlenmesi ve Önemi.....                    | 29        |
| 2.1.8                                    | Punta Kaynağında Muayene Yöntemleri .....                                     | 34        |
| 2.1.8.1                                  | Tahribatlı Muayene .....                                                      | 34        |
| 2.1.8.2                                  | Tahribatsız Muayene.....                                                      | 40        |
| 2.1.9                                    | Kaynakta Distorsiyon .....                                                    | 47        |
| 2.2                                      | Geri Esneme .....                                                             | 49        |
| <b>BÖLÜM 3</b>                           |                                                                               |           |
| <b>KULLANILAN ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ .....</b> |                                                                               | <b>55</b> |
| 3.1                                      | Toleranslar .....                                                             | 55        |
| 3.1.1                                    | Tolerans Tipleri .....                                                        | 55        |
| 3.1.2                                    | Tolerans Analizi ve Yöntemleri .....                                          | 56        |
| 3.1.3                                    | Üç Boyutlu Tarama Yönteminde Kullanılan Hizalama Yöntemleri ....              | 60        |
| 3.2                                      | İstatistiksel Yöntemler .....                                                 | 61        |
| 3.2.1                                    | Proses Yeterlilik Analizleri ve Katsayıları .....                             | 61        |
| 3.2.2                                    | Regresyon Analizleri-Central Composite Design (Merkezi Kompozit Tasarım)..... | 63        |
| 3.2.3                                    | Full Factorial, Merkezi Kompozit, Yanıt Yüzey Analizleri.....                 | 63        |
| 3.2.4                                    | Taguchi ve Etki Analizi .....                                                 | 65        |
| <b>BÖLÜM 4</b>                           |                                                                               |           |
| <b>DENEYSEL ÇALIŞMA .....</b>            |                                                                               | <b>66</b> |
| 4.1                                      | Temrinlik Ön Çalışma .....                                                    | 68        |
| 4.1.1                                    | Tarama Çalışmaları .....                                                      | 68        |
| 4.1.2                                    | Weld Planner Analiz Çalışmaları.....                                          | 70        |
| 4.2                                      | Punta Makinası Kullanım Tanımaya Yönelik Ön Çalışmalar.....                   | 72        |
| 4.3                                      | Küçük Parçalar için Regresyon Denemesi .....                                  | 74        |
| 4.3.1                                    | Çözülen Sorunlara Örnek – Temas Problemi.....                                 | 75        |
| 4.4                                      | TOFAŞ Endüstriyel Uygulama Örneği.....                                        | 80        |
| 4.4.1                                    | Kaynak Uygulaması.....                                                        | 80        |
| 4.4.2                                    | 3B Tarama İşlemler .....                                                      | 86        |
| 4.4.2.1                                  | Tekil Parçaların Tarama İşlemi Öncesi Hazırlık.....                           | 86        |
| 4.4.2.2                                  | Punta Kaynak Distorsiyonlarının Belirlenmesine Yönelik Tarama İşlemleri ..... | 89        |
| 4.4.2.3                                  | Verilerin Çakıştırılması ve Taramaların Raporlanması .....                    | 95        |
| 4.4.3                                    | Analiz Çalışması 1 .....                                                      | 97        |
| 4.4.4                                    | Analiz Çalışması 2 .....                                                      | 99        |
| 4.4.4.1                                  | Kaynak Parametreleri ve Temini .....                                          | 101       |
| 4.4.4.2                                  | Fikstür Özellikleri.....                                                      | 102       |
| 4.4.5                                    | Ultrasonik Testler .....                                                      | 104       |
| 4.4.5.1                                  | Ultrasonik Testlerin Uygulanması, Sonuçlar ve Yorumlar.....                   | 104       |

|         |                                                                      |     |
|---------|----------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.4.6   | Puntalama Noktalarına Sıyırma ve Çekme Testlerinin Uygulanması ..... | 107 |
| 4.4.6.1 | Deney Kurulumları ve Gerçekleştirilmesi .....                        | 107 |
| 4.4.6.2 | Kaynak Parametrelerinin Ayarlanması .....                            | 113 |

## BÖLÜM 5

|                                                                                                                        |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| DENEY VE ANALİZ SONUÇLARI .....                                                                                        | 115 |
| 5.1 Temrinlik Çalışma .....                                                                                            | 115 |
| 5.1.1 Tarama Çalışmaları Sonuçları .....                                                                               | 115 |
| 5.1.1.1 Gerçekleştirilmiş olan Karşılaştırma Analizi Sonuçları (Sapma Miktarları (mm)) .....                           | 116 |
| 118                                                                                                                    |     |
| 5.1.1.2 Gom Inspect'te gerçekleştirilen Açısal Sınırların Tayini .....                                                 | 119 |
| 5.1.2 İlgili Temrinlik Çalışma için Hazırlanan Matematiksel Model Önerileri .....                                      | 120 |
| 5.1.3 Matlab ile GOM Sonucunu Yüzey Haline Dönüştürme (Yüzeyleri Fonksiyonel olarak Modelleme).....                    | 129 |
| 5.2 Punta Makinası Kullanım Tanıma Çalışmaları Sonuçları .....                                                         | 132 |
| 5.3 Küçük Parçalar için Regresyon Denemesi Sonuçları .....                                                             | 133 |
| 5.3.1 Çeşitli Simülasyon Denemeleri ve Distorsiyon Sonuçları (Şekil 5.22'de karşılık gelen orta noktada bulunan) ..... | 133 |
| 5.3.2 Taguchi Çalışmaları .....                                                                                        | 134 |
| 5.3.3 Sonuçlar .....                                                                                                   | 136 |
| 5.3.4 Tam Faktöriyel Çalışmaları .....                                                                                 | 137 |
| 5.3.4.1 Sonuçlar.....                                                                                                  | 138 |
| 5.4 TOFAŞ Endüstriyel Uygulama Örneği.....                                                                             | 139 |
| 5.4.1 Kaynak Uygulaması.....                                                                                           | 139 |
| 5.4.2 3B Tarama İşlemleri.....                                                                                         | 139 |
| 5.4.3 Analiz Çalışması 1 Sonuçları.....                                                                                | 142 |
| 5.4.4 Analiz Çalışması 2 Sonuçları.....                                                                                | 143 |
| 5.4.5 Ultrasonik Testlerin Sonuçları.....                                                                              | 148 |
| 5.4.6 Punta Sıyırma ve Çekme Testleri .....                                                                            | 157 |
| 5.4.6.1 Kaynak Parametre Değerleri ve Sonuç Tablosu .....                                                              | 157 |
| 5.4.6.2 Numunelerin Taranması .....                                                                                    | 158 |
| 5.5 Uygulanan İstatistiksel Analiz ve Regresyon Sonuçları .....                                                        | 159 |
| 5.5.1 Lineer Regresyon Analiz Sonuçları.....                                                                           | 159 |
| 5.5.2 Taguchi Analiz Sonuçları ve Yorumları.....                                                                       | 161 |
| 5.5.3 Kaynak Sırasına Göre İstatistiksel Analiz .....                                                                  | 166 |
| 5.6 Eşleme Yazılımı.....                                                                                               | 168 |
| 5.6.1 Geliştirilmiş Yazılım.....                                                                                       | 169 |
| 5.7 Tolerans Analizi Örnekleri.....                                                                                    | 171 |
| 5.8 Eşleme Mekanizasyonu.....                                                                                          | 173 |

## BÖLÜM 6

SONUÇ VE ÖNERİLER ..... 176

KAYNAKLAR..... 182

## EK-A

TOFAŞ FİRMASI İLE HAZIRLANMIŞ OLAN TOLERANS ANALİZİ PROBLEM ÖRNEKLERİ .. 188

ÖZGEÇMİŞ..... 202

## SİMGE LİSTESİ

---

|                           |                                                         |
|---------------------------|---------------------------------------------------------|
| $q(t)$                    | Isı akışı                                               |
| $r_a$                     | Kaynak dikişinin yarıçapı                               |
| $r(t)$                    | Dikiş merkezinden anlık radyal uzaklık                  |
| $Q_A$                     | Kaynak arkından gelen ısı girişi                        |
| $\eta$                    | Ark yeterlilik katsayısı                                |
| $I$                       | Elektriksel akım                                        |
| $U$                       | Voltaj                                                  |
| $\epsilon^{\text{total}}$ | Toplam gerinim                                          |
| $\epsilon^e$              | Elastik gerinim                                         |
| $\epsilon^p$              | Plastik gerinim                                         |
| $\epsilon^{\text{th}}$    | Termal gerinim                                          |
| $Q$                       | Oluşan ısı                                              |
| $R$                       | İş parçasının toplam direnci                            |
| $t$                       | Isı girişinin toplam süresi (kaynak zamanı)             |
| $\sigma$                  | elektriksel iletkenlik                                  |
| $n$                       | Temas puntalarının sayısı                               |
| $H_v$                     | Sertlik                                                 |
| $s$                       | Film kalınlığı                                          |
| $\sigma_f$                | Filmin elektriksel iletkenliği                          |
| $\tilde{R}_0$             | $T_0$ sıcaklığında arayüzeyde elektriksel temas direnci |
| $\tilde{\sigma}_{liq}$    | Likidüsün ölçüsel elektriksel iletkenliği               |
| $\tilde{H}_{v0}$          | Ölçüsel sertlik                                         |
| $W$                       | Elektrod kuvveti                                        |
| $\tilde{r}_0$             | Ölçüsel elektrod yarıçapı                               |
| $R_c(T)$                  | $T^\circ\text{C}$ 'deki temas direnci                   |
| $\sigma_y(T)$             | $T^\circ\text{C}$ 'deki akma gerilmesi                  |
| $\phi$                    | Elektriksel potansiyel                                  |
| $\rho$                    | Yoğunluk                                                |
| $c$                       | Özgül ısı                                               |
| $K$                       | Isıl iletkenlik                                         |
| $\Delta\sigma$            | Gerilme artımı                                          |
| $\Delta\epsilon$          | Gerinim artımı                                          |
| $\Delta T$                | Sıcaklık artımı                                         |

|                             |                                                               |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------------|
| $D$                         | Elastike ve plastik katılık matrisi                           |
| $C$                         | Termal katılık vektörü                                        |
| $\rho$                      | Malzemenin özgül direnci                                      |
| $l$                         | İleticinin uzunluğu                                           |
| $A$                         | İleticinin kesiti                                             |
| $\rho_t$                    | $t$ °C'deki özgül direnç                                      |
| $\rho_0$                    | Oda sıcaklığında özgül direnç                                 |
| $\alpha$                    | Sıcaklık katsayısı                                            |
| $A_0$                       | Gerçek temas yüzeyi                                           |
| $a$                         | Başlangıç akım geçiş yüzeyleri                                |
| $R_h$                       | Dış zarf direnci                                              |
| $R_e$                       | Akım geçen boğaz direnci                                      |
| $R_k$                       | Toplam temas direnci                                          |
| $\sigma_n$                  | Arayüzeydeki temas (dik) basınç                               |
| $\rho_{\text{contaminant}}$ | Yüzeyde bulunan oksit, su buharı ve yağ gibi öğelerin direnci |
| $k_{\text{contact}}$        | Temas ısı iletkenliği                                         |
| $\eta$                      | Temastaki pürüzlülüklerin yoğunluk numarası                   |
| $\alpha$                    | Temas halindeki pürüzlülüklerin ortalama yarıçapı             |
| $2l$                        | Pürüzlerin arasındaki düzlem içindeki ortalama mesafe         |
| $a$                         | Başlangıç akım geçiş yüzeyleri                                |
| $R_h$                       | Dış zarf direnci                                              |
| $R_e$                       | Akım geçen boğaz direnci                                      |
| $R_k$                       | Toplam temas direnci                                          |

## KISALTMA LİSTESİ

---

|      |                                                    |
|------|----------------------------------------------------|
| 3 B  | 3 Boyutlu                                          |
| BP   | Back Propagation                                   |
| BPN  | Back Propagation Neural                            |
| CAD  | Computer Aided Drawing (Bilgisayar Destekli Çizim) |
| Dist | Distorsiyon Sonuçları                              |
| DOE  | Design of Experiments (Deneylerin Tasarımı)        |
| FEM  | Finite Element Method (Sonlu Elemanlar Yöntemi)    |
| ISO  | Uluslararası Standart Organizasyonu                |
| İTA  | İstatistiksel Tolerans Analizi                     |
| LMGR | Laser-Guided Measuring Robot                       |
| LSL  | Alt Sınır Limit Değeri                             |
| PPZ  | Popülasyon Parametre Bölgesi                       |
| SMR  | Spherical mounted retro-reflector                  |
| TIG  | Tungsten Inert Gas                                 |
| USL  | Üst Sınır Limit Değeri                             |
| UT   | Ultrasonik Test                                    |
| WC   | Worst Case                                         |



## ŞEKİL LİSTESİ

|                                                                                   | Sayfa |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 1. 1 Şönt etkisi gösterimi .....                                            | 5     |
| Şekil 1. 2 İki çeşit kaynak gösterimi .....                                       | 5     |
| Şekil 2. 1 Punta kaynağı ve makinası gösterimi .....                              | 16    |
| Şekil 2. 2 Punta kaynağı detaylı gösterimi .....                                  | 17    |
| Şekil 2. 3 Punta kaynağı işlem adımları .....                                     | 18    |
| Şekil 2. 4 Kaynak yapılabirlik aralığı .....                                      | 19    |
| Şekil 2. 5 Punta kaynağı işlem basamakları ve zamana dayalı gösterimi .....       | 20    |
| Şekil 2. 6 Mistaş'tan alınan akım, kuvvet zaman diyagramı .....                   | 21    |
| Şekil 2. 7 Elektrod Tipleri ve Boyut Gösterimleri .....                           | 28    |
| Şekil 2. 8 Albaksan'a göre Elektrod Tipleri ve Boyutları .....                    | 29    |
| Şekil 2. 9 Saf demirin özgül direncinin değişim gösterimi .....                   | 32    |
| Şekil 2. 10 Nokta direnç kaynağında temas yüzeyleri .....                         | 33    |
| Şekil 2. 11 Keski testi .....                                                     | 35    |
| Şekil 2. 12 Soyma testi .....                                                     | 36    |
| Şekil 2. 13 Tahribatlı muayenede gerilme dağılımları .....                        | 37    |
| Şekil 2. 14 Sıyırma testi numune ve boyutları .....                               | 38    |
| Şekil 2. 15 Sıyırma testinde dengeleyici sac kullanımı .....                      | 39    |
| Şekil 2. 16 Çekme Testi numune ve boyutları .....                                 | 40    |
| Şekil 2. 17 Olası Tahribatsız Muayene Sonuçları .....                             | 41    |
| Şekil 2. 18 Küçük ve büyük çekirdek çapları için UT sonuçları .....               | 42    |
| Şekil 2. 19 Değişik çekirdek kalınlıkları için UT sonuçları .....                 | 43    |
| Şekil 2. 20 Gözeneklilik içeren küçük kaynak çekirdekleri için UT sonuçları ..... | 43    |
| Şekil 2. 21 Dışarı taşma içeren punta kaynağı için UT sonuçları .....             | 44    |
| Şekil 2. 22 Kaynak tipleri için UT sonuçları .....                                | 45    |
| Şekil 2. 23 Çeşitli eko dağılımları .....                                         | 45    |
| Şekil 2. 24 Çeşitli kaynak sonuçlarının yük taşıma kapasiteleri .....             | 46    |
| Şekil 2. 25 İyi bir kaynak için ultrasonik dalga yansıması .....                  | 47    |
| Şekil 2. 26 Kaynak sonrası distorsiyon tipleri .....                              | 48    |
| Şekil 2. 27 Bükme sonrası gerilme dağılımları .....                               | 49    |
| Şekil 2. 28 Gerinim Pekleşmesi Belirlenmesi .....                                 | 50    |
| Şekil 3. 1 Tolerans tipleri .....                                                 | 56    |
| Şekil 3. 2 Bir mil dişli montajı için Tolerans Analiz hesabı örneği .....         | 57    |
| Şekil 3. 3 Ölçüler ve toleranslar için Worst-Case zinciri .....                   | 58    |
| Şekil 3. 4 Kuadratik Yöntemde Dağılım .....                                       | 58    |

|             |                                                                                                     |    |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 3. 5  | Bir Tolerans Analiz Örneği.....                                                                     | 59 |
| Şekil 3. 6  | Geometrik toleransların doğrusal toleranslara çevirilmesi .....                                     | 60 |
| Şekil 3.7   | RPS Yöntemi.....                                                                                    | 61 |
| Şekil 3. 8  | Popülasyon Parametre Bölgesi (PPZ).....                                                             | 62 |
| Şekil 3. 9  | Üç faktörlü üç seviyeli bir tam faktöriyel deney planı .....                                        | 64 |
| Şekil 3. 10 | İki faktörlü merkezi kompozit dizayn .....                                                          | 64 |
| Şekil 3. 11 | Üç faktörlü merkezi kompozit dizayn .....                                                           | 65 |
| Şekil 4. 1  | Tasarlanmış parçaların teknik resimleri.....                                                        | 68 |
| Şekil 4. 2  | Orsa Proje firmasında Parça 1 için 3B tarama çalışması.....                                         | 69 |
| Şekil 4. 3  | Sıcaklık Dağılımı (Islatma) Problemi.....                                                           | 71 |
| Şekil 4. 4  | Punta etrafındaki asimetrik Mesh .....                                                              | 71 |
| Şekil 4. 5  | Punta Etrafına Simetrik Mesh Atma .....                                                             | 72 |
| Şekil 4. 6  | Mistaş Firması ‘MPR3-120kVA’ Model Punta Kaynak Makinası.....                                       | 73 |
| Şekil 4. 7  | Örnek Parça Uygulamaları .....                                                                      | 73 |
| Şekil 4. 8  | Sıyırma Testi Örnekleri.....                                                                        | 74 |
| Şekil 4. 9  | Kaynak Bölgesi Tetkik Örnekleri .....                                                               | 74 |
| Şekil 4. 10 | Taguchi yöntemi için kurulan model sonucu örneği.....                                               | 75 |
| Şekil 4. 11 | Simufact Punta Kaynağı Proses model örneği .....                                                    | 76 |
| Şekil 4. 12 | Örnek parça (kalınlık: 1mm) ölçü ve punta noktalarının yerleri.....                                 | 76 |
| Şekil 4. 13 | Fikstür (clamping) geometri ve noktaları.....                                                       | 77 |
| Şekil 4. 14 | Zamana bağlı akım tablosu örneği .....                                                              | 77 |
| Şekil 4. 15 | Zamana bağlı elektrod kuvveti tablosu örneği .....                                                  | 78 |
| Şekil 4. 16 | İlk punta noktasından sonra simülasyonun durduğu an ve çok büyük yanlış distorsiyon sonuçları ..... | 79 |
| Şekil 4. 17 | Simufact.Welding 5.0’da Punta Kaynağı Sonrası Distorsiyon Sonuçları .....                           | 79 |
| Şekil 4. 18 | ‘Doblo USA Sağ Ön Şase Kolu Alt Komitesi’ ve kapsadığı tekil elemanlar ..                           | 80 |
| Şekil 4. 19 | Komplenin Doblo USA model araç üzerinde gösterimi .....                                             | 81 |
| Şekil 4. 20 | Örnek Alınan Montaj Grubunu Oluşturan Tekil Parçalar .....                                          | 81 |
| Şekil 4. 21 | İlk Kaynak Adımı.....                                                                               | 82 |
| Şekil 4. 22 | İkinci kaynak adımı için elemine edilen sınırlandırmalar .....                                      | 82 |
| Şekil 4. 23 | Montaj grubu için uygulanmış kaynak sıraları .....                                                  | 83 |
| Şekil 4. 24 | Akım seviye parametrelerinin belirlenme örneği .....                                                | 86 |
| Şekil 4. 25 | Scatolamento Puntone ve Montante DX Atacco sosp. parçası kopyalama yüzeyleri ölçüm noktaları.....   | 87 |
| Şekil 4. 26 | Scatolamento Puntone completo cs. için ölçüm noktaları .....                                        | 88 |
| Şekil 4. 27 | Komple Parçanın Referans Noktaları .....                                                            | 88 |
| Şekil 4. 28 | Scatolamento Puntone parçasının referanslara göre fikstüre bağlanması .                             | 89 |
| Şekil 4. 29 | Tekil Parça Tarama İşlemi Örnekleri .....                                                           | 89 |
| Şekil 4. 30 | TOFAŞ-Tarama Sonucu Örnekleri-1 .....                                                               | 91 |
| Şekil 4. 31 | TOFAŞ-Tarama Sonucu Örnekleri-2 .....                                                               | 92 |
| Şekil 4. 32 | Bir Komple Tarama Örneği.....                                                                       | 93 |
| Şekil 4. 33 | Komple için geçerli referans noktaları .....                                                        | 94 |
| Şekil 4. 34 | Tarama öncesi komplenin fikstürlenmesi.....                                                         | 94 |
| Şekil 4. 35 | Fikstürün atanamadığı örnek .....                                                                   | 95 |
| Şekil 4. 36 | Montante Attacco DX parçası için kompledeki bir tarama ve raporlama örneği .....                    | 96 |

|             |                                                                                                        |     |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 4. 37 | Scatolamento Puntone DX parçası için kompledeki bir tarama örneği.....                                 | 96  |
| Şekil 4. 38 | Fikstür ve punta çapı bölgelerini içeren Weld Planner modeli.....                                      | 97  |
| Şekil 4. 39 | Weld Planner’da Kaynak Sırası ve ilgili adımlardaki fikstür girişi.....                                | 98  |
| Şekil 4. 40 | Montaj grubundaki fikstürler.....                                                                      | 98  |
| Şekil 4. 41 | Simufact’e girdi olarak verilecek TOFAŞ Analiz Modeli .....                                            | 99  |
| Şekil 4. 42 | Clamping ve Bearing’lerin gösterimi.....                                                               | 100 |
| Şekil 4. 43 | Clamping’lerin gösterimi.....                                                                          | 100 |
| Şekil 4. 44 | İlgili komple için zamana bağlı akım diyagramı .....                                                   | 101 |
| Şekil 4. 45 | İlgili komple için zamana bağlı kuvvet diyagramı.....                                                  | 101 |
| Şekil 4. 46 | Fikstür Açılma Açısına karşılık Sıkma Kuvveti (Clamping force against angle) - Tünkers marka .....     | 102 |
| Şekil 4. 47 | Kol Uzunluğuna karşılık Sıkma Kuvveti (Clamping force against length of clamping arm) - Tünkers .....  | 103 |
| Şekil 4. 48 | Kol konumuna karşılık Sıkma Kuvveti – Destaco Marka .....                                              | 103 |
| Şekil 4. 49 | Fikstürlere gelen tepki kuvvetlerinin kaynak süreci boyunca zamana bağlı değişimi .....                | 104 |
| Şekil 4. 50 | Komplelere Ultrasonik Test uygulama örneği .....                                                       | 105 |
| Şekil 4. 51 | Ultrasonik Test programı arayüz örnekleri .....                                                        | 106 |
| Şekil 4. 52 | Kritik kalınlıkların ölçümü .....                                                                      | 107 |
| Şekil 4. 53 | Sıyırma Testi numune boyutları örneği .....                                                            | 110 |
| Şekil 4. 54 | Çekme Testi numune boyutları örneği .....                                                              | 111 |
| Şekil 4. 55 | İkili ve üçlü sac için çekme testine hazır numune örnekleri .....                                      | 111 |
| Şekil 4. 56 | Numunelerin sıyırma testlerinin gerçekleştirilmesi.....                                                | 112 |
| Şekil 4. 57 | Üçlü sac numunelerinin çekme testlerinin gerçekleştirilmesi.....                                       | 113 |
| Şekil 4. 58 | Kaynak parametre sınır değerleri belirlenebilmesi için numunelere Tahribatlı Muayene uygulanması ..... | 114 |
| Şekil 4. 59 | Kaynak fikstür aparatı ve makina görünümü.....                                                         | 114 |
| Şekil 5. 1  | Parça 1 - RPS 4 için sonuçlar .....                                                                    | 115 |
| Şekil 5. 2  | Parça 1 için bir örnek uygulama.....                                                                   | 119 |
| Şekil 5. 3  | Üç parçanın model boyutları .....                                                                      | 120 |
| Şekil 5. 4  | Başlangıç durumu.....                                                                                  | 121 |
| Şekil 5. 5  | Tekil geri esneme ve kaynaklı montaj sonundaki distorsiyonlar sonucundaki durum.....                   | 121 |
| Şekil 5. 6  | Şekillendirilmiş parçanın GOM Inspect’teki STL formatındaki verisi .....                               | 122 |
| Şekil 5. 7  | Sac yüzeylerinin Gösterimi.....                                                                        | 123 |
| Şekil 5. 8  | Oluşan Çekirdek .....                                                                                  | 123 |
| Şekil 5. 9  | Kaynak Sıralarının gösterimi .....                                                                     | 123 |
| Şekil 5. 10 | Weld Planner’da Sıra 1 ve montaj grupları 3,4,5 için bir analiz örneği .....                           | 124 |
| Şekil 5. 11 | Orta noktadaki yer değiştirmeyi belirlemek için model .....                                            | 124 |
| Şekil 5. 12 | Punta Kaynak Analizi Örneği Sonucu .....                                                               | 126 |
| Şekil 5. 13 | Fikstürlerin Gösterimi ile Punta Kaynak Analizi Örneği Sonucu .....                                    | 126 |
| Şekil 5. 14 | Punta Kaynağı sonrası distorsiyon boyutları.....                                                       | 127 |
| Şekil 5. 15 | Punta kaynak analizi örneği sonucu (üçlü punta için).....                                              | 128 |
| Şekil 5. 16 | Fikstürlerin gösterimi ile punta kaynak analizi örneği sonucu (üçlü punta için).....                   | 128 |
| Şekil 5. 17 | Punta kaynağı sonrası distorsiyon boyutları (üçlü punta için).....                                     | 129 |

|             |                                                                                                                |     |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 5. 18 | GOM Inspect'te Kesitler Yardımı ile Deforme Olmuş Yüzeylerin Noktalarının Koordinatlarının Elde Edilmesi ..... | 130 |
| Şekil 5. 19 | Matlab'te Curve Fitting komutu ile Deforme Olmuş Yüzey Denklemi Eldesi .....                                   | 130 |
| Şekil 5. 20 | Matlab'te Curve Fitting komutu ile Deforme Olmuş Yüeyin Orta Ekseninin Gösterimi.....                          | 131 |
| Şekil 5. 21 | Örnek 14'teki istenen çekirdek oluşumu .....                                                                   | 132 |
| Şekil 5. 22 | Simufact Welding 6.0 Sonuç Örneği .....                                                                        | 133 |
| Şekil 5. 23 | Simufact Welding 6.0 çift punta çalışması .....                                                                | 134 |
| Şekil 5. 24 | Taguchi yöntemi için kurulan model sonucu örneği.....                                                          | 135 |
| Şekil 5. 25 | Taguchi sonuçları .....                                                                                        | 136 |
| Şekil 5. 26 | Rinforzo parçası için sonuç noktaları gösterimi .....                                                          | 140 |
| Şekil 5. 27 | 1. Kaynak sırası için Distorsiyon Sonuçları .....                                                              | 142 |
| Şekil 5. 28 | 2. Kaynak sırası için Distorsiyon Sonuçları .....                                                              | 142 |
| Şekil 5. 29 | Çeşitli mesh yöntemleri için çekirdek görüntüleri .....                                                        | 143 |
| Şekil 5. 30 | Distorsiyon sonuçlarının alındığı node gösterimi .....                                                         | 146 |
| Şekil 5. 31 | Tek katmanlı mesh sonucu .....                                                                                 | 147 |
| Şekil 5. 32 | Solid-shell mesh sonucu .....                                                                                  | 147 |
| Şekil 5. 33 | Single-shot yöntemi sonucu .....                                                                               | 148 |
| Şekil 5. 34 | Ultrasonik Testte Good Weld Örneği.....                                                                        | 148 |
| Şekil 5. 35 | Uygulanan Kaynak sırası 1'e göre diğer punta nokta numaraları.....                                             | 149 |
| Şekil 5. 36 | Montante Attacco Parçasının her iki Yüzeyinin Taranması .....                                                  | 151 |
| Şekil 5. 37 | (8000 A; 9 Per; 3200 N) Parametre Değerleri için Numune Tarama Sonucu .....                                    | 158 |
| Şekil 5. 38 | (12000A; 14 Per; 3200 N) Parametre Değerleri için Numune Tarama Sonucu .....                                   | 159 |
| Şekil 5. 39 | Rinforzo'ya Göre Lineer Regresyon Analizi Sonuçları.....                                                       | 160 |
| Şekil 5. 40 | Rinforzo 'pt7' Noktası ve Sonuçlar.....                                                                        | 160 |
| Şekil 5. 41 | Scatolamento 'pt2' Noktası ve Sonuçlar .....                                                                   | 161 |
| Şekil 5. 42 | Rinforzo 'pt7' noktası için Level 1 Taguchi Sonuç Tablosu ve Analiz Grafikleri .....                           | 162 |
| Şekil 5. 43 | Rinforzo 'pt7' noktası için Level 2 Taguchi Sonuç Tablosu ve Analiz Grafikleri .....                           | 163 |
| Şekil 5. 44 | Scatolamento 'pt2' noktası için Level 1 Taguchi Sonuç Tablosu ve Analiz G Grafikleri.....                      | 164 |
| Şekil 5. 45 | Scatolamento 'pt2' noktası için Level 2 Taguchi Sonuç Tablosu ve Analiz Grafikleri .....                       | 165 |
| Şekil 5. 46 | Scatolamento Parçası için Tarama Sonuç Örneği .....                                                            | 166 |
| Şekil 5. 47 | Proses yeterlilik istatistiği .....                                                                            | 168 |
| Şekil 5. 48 | İlk yazılım örneği .....                                                                                       | 170 |
| Şekil 5. 49 | Kaynak Parametrelerinin de Göz Önüne Alındığı İkinci Yazılım.....                                              | 170 |
| Şekil 5. 50 | Sağ ön şasi koluna Tolerans Analizi uygulanması .....                                                          | 171 |
| Şekil 5. 51 | Tolerans Analizi hesabının program ile gerçekleştirilmesi .....                                                | 172 |
| Şekil 5. 52 | Otomatik sistemin çalışma prensibi.....                                                                        | 174 |
| Şekil 5. 53 | Eşleme Simülasyon Gösterimi.....                                                                               | 175 |
| Şekil 5. 54 | Tasarlanan otomatik mekanizasyon için bir robot kolu seçimi .....                                              | 175 |

## ÇİZELGE LİSTESİ

|               | Sayfa                                                                                                           |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Çizelge 2. 1  | Elektrod uç ölçüleri ..... 28                                                                                   |
| Çizelge 3. 1  | Proses Yeterlilik Katsayıları ..... 62                                                                          |
| Çizelge 4. 1  | Deneysel Çalışmaların Gösterimi ..... 66                                                                        |
| Çizelge 4. 2  | TOFAŞ'taki kaynak işlemi deney kurulum tablosu ..... 85                                                         |
| Çizelge 4. 3  | Sıyırma testleri deney kurulum tablosu ..... 109                                                                |
| Çizelge 4. 4  | Çekme testleri deney kurulum tablosu ..... 110                                                                  |
| Çizelge 5. 1  | Parça 1 için ve RPS Yöntemi ile elde edilen veriler ..... 116                                                   |
| Çizelge 5. 2  | Parça 2 (Sol Nokta) için ve RPS Yöntemi ile elde edilen veriler ..... 117                                       |
| Çizelge 5. 3  | Parça 2 (Sağ Nokta) için ve RPS Yöntemi ile elde edilen veriler ..... 117                                       |
| Çizelge 5. 4  | Parça 3 için ve RPS Yöntemi ile elde edilen veriler ..... 118                                                   |
| Çizelge 5. 5  | Parça 1 için ve RPS Yöntemi ile elde edilen veriler ..... 118                                                   |
| Çizelge 5. 6  | Uygulanan kaynak parametreleri..... 132                                                                         |
| Çizelge 5. 7  | Taguchi yöntemi için girilen parametre seviye ve değerleri ..... 135                                            |
| Çizelge 5. 8  | Tam Faktöriyel yöntemi için girilen parametre seviye ve değerleri.....138                                       |
| Çizelge 5. 9  | Rinforzo için tekilde sapma miktarları ..... 140                                                                |
| Çizelge 5. 10 | Rinforzo için montajda sapma miktarları..... 140                                                                |
| Çizelge 5. 11 | Rinforzo için distorsiyon miktarları ..... 140                                                                  |
| Çizelge 5. 12 | Merkezi Kompozit Parametre Tasarım Yöntemine göre parametre değerleri ve ilgili distorsiyon sonuçları..... 145  |
| Çizelge 5. 13 | Montante Attacco Parçası Punta ve Raporlama Noktalarına Göre Kalınlık Sonuçları..... 152                        |
| Çizelge 5. 14 | Nokta 14 için Bilgiler ve Kalınlığa göre Ultrasonik Test Tablosu ..... 153                                      |
| Çizelge 5. 15 | Nokta 17 için Bilgiler ve Kalınlığa göre Ultrasonik Test Tablosu ..... 155                                      |
| Çizelge 5. 16 | Scatolamento ve Rinforzo Birleşim Bölgesini Temsil Sonucu ..... 157                                             |
| Çizelge 5. 17 | Önceden belirlenmiş noktalardaki her iki kaynak sırası için önceden belirlenmiş distorsiyon sonuçları ..... 167 |

**ÇOK PARÇALI SAC KONSTRÜKSİYONLARDA KÜMÜLATİF ÖLÇÜ  
SAPMALARININ ÖLÇME VE ANALİZLERE DAYALI OLARAK BELİRLENMESİ  
VE BİR ALGORİTMA GELİŞTİRİLMESİ**

Cem YURCİ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Anıl AKDOĞAN

Eş Danışman: Prof. Dr. Numan DURAKBAŞA

Günümüzde herhangi bir endüstriyel ürünün ortaya çıkarılışında, tasarım, imalat, ölçme sistemleri ve kalite yönetimi süreçleri birbiriyle içi içe geçmiş olup sıkı bağlarla bağlanmış durumdadır. Bu bağlar zaman içinde daha da güçlenerek fonksiyonel hale gelmiş ve sağlanan gelişmeler son yıllarda ortaya çıkan Endüstri 4.0 devriminin de temelini oluşturmuştur. Sanayi kuruluşlarının söz konusu fonksiyonel bağları kurma ve veri tabanlarını güçlendirme yönündeki çabaları ne ölçüde amacına ulaşabilmiş ise, çağın gerisinde kalma tehlikesinden de o ölçüde uzaklaşmaları mümkündür. Bu bakış açısının baskın şekilde görüldüğü sektörlerden birisi de otomotiv olduğundan, tez çalışmasının uygulama alanı buradan seçilmiştir. Buna yönelik olarak, yapılacak çalışmalar için seçilen şasi grubunda, sac parçaların şartnamesi ile uyumlu tolerans ve istatistiksel tolerans analiz yöntemleri ile şekillendirme sonucu oluşan geri esnemeler ve kaynak sonrası distorsiyonlar ele alınmaktadır. Kaynak öncesi ve sonrasında ortaya çıkan tüm sapmalar ile parçaların tasarım kriterleri ve proses parametreleri hep birlikte değerlendirilerek bir yaklaşım metodu kurulmaktadır. Böylelikle ölçü ve biçim sapmalarının toplamının önceden tahmini hedeflenmiş bulunmaktadır. Kurulan yaklaşım metodu, analiz ve uygulamalardan gelecek yeni parametrik değerlerin yüklenmesi ile sürekli iyileştirilebilir bir zeminde akıllı sistemlere doğru terfi edebilecek yapıdadır. İşletme içinde de, seri imalattan alınacak sürekli geri beslemeler ile kurulan

metodun sürdürülebilirliği ve aynı zamanda yeni grup ve parçalar açısından adaptasyonu sağlanabilecek durumdadır. Metodun, söz konusu çıkış noktasından hareketle; Endüstri 4.0 bağlamında diğer unsurlar ve yöntemler ile ilişkilendirilebileceği görülmektedir.

Teknolojik ve finansal kısıtlamalardan dolayı, imalat proseslerinin uygulanışı esnasında nominal ölçüleri sağlamak mümkün olamamaktadır. Bu yüzden başarılı bir montaj için toleranslandırma çok büyük önem taşımaktadır. Kompleks parçalar ile montajlı gruplar için toleransları tasarım aşamasında belirlemek zor bir iştir. Çünkü, tasarım sırasında öngörülebilecek ve imalat sırasında realize edilebilecek olanları iyi belirleyebilmek; bilgiye olduğu kadar aynı zamanda tecrübeye de dayanmaktadır. Küçük ölçü ve biçim sapmaları kümülatif birikime uğrayarak, montaj sırasında ortaya çıkan son toleranslara uyulamamasına yol açabilmektedir. Bu tez çalışmasının yapılış amaçlarından başta geleni, gerek geometrik ve gerekse de kaynak prosesi tasarımları esnasında söz konusu son aşamayı önceden tahmin ederek tasarımcıya bir çıkış yolu bulmaktır. Günümüzde belirli yüzeyler için yaklaşım modelleri bulunsa da, montajda toleransı direkt olarak temsil eden bir matematiksel model henüz mevcut değildir.

Tez çalışmasındaki uygulamalar için sac parçalar ele alındığı için sapmaları etkileyecek olan en büyük iki etken, şekillendirme sonrası geri esnemeler ile punta kaynağı sonrası distorsiyonlardır. Şekillendirme sonrası biçim sapmaları tarama yöntemi ile elde edilip bu veriye analiz yolu ile elde edilmiş kaynak distorsiyonları da eklenebilir. Bu safhada distorsiyonlar ile kaynak parametreleri arasında bulunacak matematiksel bağıntı kullanılacak olup bu parametre sınırları belirli testlerle tespit edilmiş bulunacaktır.

Tez çalışmalarının ikinci kolu, hiçbir düzeltme çabasına girmeden, montajı oluşturan parçaların imalattan çıkan sapmalarını olduğu gibi kabul edip bunların optimum toplam sapmayı sağlayabilecek şekilde kendi aralarındaki eşlenmelerini sağlamaya dayanmaktadır. Dolayısıyla, parçaların ölçümlerinden elde edilecek tekil sapma dataları kullanarak bileşik (kümülatif) toleransı optimize edebilecek bir yazılım hazırlanmış bulunmaktadır. Bunu sağlayacak şekilde oluşturulan yazılım, tekil parçaları İstatistiksel Tolerans Analiz Yöntemlerine göre eşlendirmekte ve kaynak öncesinde montaja hazır gruplamalar ortaya çıkmaktadır.

Tez çalışmalarının sonunda ortaya konan sistemin mekanizasyonu tasarlanıp prototipi de imal edilerek çalışır duruma getirilmiştir. Bu sistemin patent başvurusu yapılmış bulunmaktadır.

Sonuç olarak, yapılan tez çalışması toleransları, geometrik ölçü ve biçim ile kaynak proses parametrelerini usulüne ve standartlarına uygun bir şekilde bütünleşik halde tasarlamayı sağlayacaktır. Bununla da kalmayıp, elde mevcut olan imalatın kalite realitesinden hareketle, mevcut tekil toleranslardan grupsal optimum bileşik toleransa geçebilmeyi de mümkün kılmaktadır. Yukarıda da belirtildiği gibi, teklif edilen bu sistemlerin doktora sonrasında sürdürülecek çalışmalar ile akıllı hale getirilmesiyle, ülkemiz imalat sanayisinin Endüstri 4.0 devrimini yakalaması yolunda yardımcı olması amaçlanmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Birleşik (kümülatif) tolerans, İstatistiksel Tolerans Analiz yöntemleri, punta kaynağı ve parametreleri, eşleme

**DETERMINING OF CUMULATIVE DIMENSION DEVIATIONS IN MULTI –  
PART SHEET METAL CONSTRUCTIONS BY MEANS OF MEASUREMENTS  
AND ANALYSES AND DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM**

Cem YURCİ

Department of Mechanical Engineering

Ph.D. Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Anıl AKDOĞAN

Co-Advisor: Prof. Dr. M. Numan DURAKBAŞA

Today, by producing an industrial product design, manufacturing and measuring systems and quality management processes are interlaced and bonded with powerful links. These links have become in the time to a functional state and the provided improvements have formed the basis of Industrial 4.0 Revolution. Industrial establishments are trying to build the aforesaid functional links and to reinforce their databases. So, they have the possibility of the revulsion of being behind the times. Because the automotive industry is one of the main sectors where this point of view can be seen dominantly, the practical application field of this thesis has been chosen from here. So, in the selected chasis group, tolerances, tolerance stack-up analyses and distortions after welding are being handled. Distortions before welding and after welding are being evaluated with design criteria and process parameters and an approachment method is being created. So the estimation of the stack-up of dimensional and form deviations is being aimed. The created approachment method is in a structure that can be converted to intelligent systems by arriving of new parametric values coming from analyses and applications. In the establishment, with feedbacks got from the serial production, the sustainability of the method and its



adaptation for new groups and parts can be provided. The method can be linked in the context of Industry 4.0 to its other factors and applications.

The providing of nominal dimensions during the application of manufacturing processes can not be possible because of technological and financial restrictions. Hence, tolerancing is very important for a successful assembly. Determining tolerances for complex parts and assembly groups in the design stage is a hard job. Because assigning the foreseen tolerances and the ones which can be realized during manufacturing is based not only on the knowledge but also on the experience. Small dimension and form tolerances are accumulated cumulatively and cause that the last tolerances can not be adapted. The main aim of the thesis work is to predict the last stage during geometrical and welding process designs and to help to the designers. Although today some approximation models for specific surfaces appear, there is not a mathematical model yet which represents the tolerance during assembly directly.

Because sheet metal parts are considered for applications in the thesis work, the primary two factors affecting on deviations are the springback after forming and distortions after resistance spot welding. The form deviations after forming can be obtained with the method scanning and welding distortions obtained with analysis method can be added to this data. During that stage, the mathematical relation formula between distortions and welding parameters can be used and the parameter limits will have been found with specific tests.

The second arm of the thesis work is, without showing any correction effort, mating the singular parts with each other by accepting the deviations after manufacturing as they are and by meeting the optimum cumulative tolerances. So, a software has been created to optimize the cumulative tolerances by using the singular deviation datas which can be obtained from the measurements of parts. This software mates the singular parts according to Tolerance Analysis methods and so the groups for assembly before welding become ready.

At the end of the thesis work, the generated mechanization of the system has been designed and its prototype has been manufactured and made ready for functioning. The patent application for this system has been made.

In conclusion, the made thesis work will provide designing tolerances, geometrical dimension and form and welding process parameters according to the standards in an integrated manner. It will make possible the transition from singular tolerances to optimum cumulative tolerances. So, these proposed systems can be transformed to intelligent systems, after continuing works after the thesis and it is aimed to help to the way reaching of Industry 4.0 Revolution.

**Keywords:** Cumulative tolerance, Statistical Tolerance Stack-up Analysis methods, resistance spot welding and parameters, mating

#### 1.1 Literatür Özeti

Tolerans konusundaki araştırmalar; imalat, montaj, maliyet ve kalite konularına odaklanan metod, algoritma ve proses geliştirmelere yöneliktir. İş parçalarının öngörülen fonksiyonlarının spesifikasyonlara göre belirlenmesi ve imalatının arkasından doğrulanması GMÖ (Geometrik Mamul Özellikleri) temelinde gerçekleştirilmektedir (örneğin: ISO 1101 – ‘Geometrik toleranslandırma – Şekil, yönlendirme, konum ve dönme toleransları’) [1]. ISO 1101’de toleranslar tanımları ve tipleri belirtilmektedir. Buna yönelik olarak bu toleranslarda verilen tolerans tipleri bir çok Ölçme Tekniği kitabında da (örneğin Cogorno’nun [2]) sunulmaktadır.

Birleşik toleransa gidilirken tekil toleranstan başlanacaktır. Tekil toleransların içinde kalınıp kalınmayacağını belirleyen tekil sapmalardır. Bu tekil sapmaları belirleyen faktörler şekillendirme sonrası tekil parçaların kalıptan çıktıktan sonraki geri esnemeler ve kaynak sonrası distorsiyonlardır. Dikiş kaynağındaki kadar büyük olmasa da punta kaynağındaki toleranslar da kümülatif olarak etkiyebileceği için buradaki distorsiyonlar da etkin olarak kabul edilmektedir.

Sac şekillendirmesinde, yükleme ortadan kaldırılıp kalıp açılırken parçanın elastik olarak kendini geri çekmesine geri esneme denmektedir. Biçimlendirilmiş sac metal parçaları şekillendirirken kabul edilebilir tolerans sınırları içinde kalınıp kalınmadığını belirlemek için bu olayın dikkatle takibi gerekmektedir. Geri esneme; sac kalınlığı, takım geometrisi, yağlama koşulları, malzeme özellikleri ve şekillendirme hızı gibi proses parametrelerine bağlıdır.

Toleransların belirlenmesinde, geri esnemenin dışında, sac parçaların kaynaklı montajında oluşan distorsiyonları da hesaba katıp, bunların analizlerini de gerçekleştirmek gerekmektedir. Bu analizler hem alın hem de bindirme kaynak yöntemleri için geçerlidir. Buna ilaveten, kaynağı boşluklu veya boşluksuz; fikstürlü veya fikstürsüz yapma durumlarını da dikkate alan çalışmaların mevcut olduğu görülmektedir.

Tekil ölçümlerden elde edilen dataların çoğulu gösteren parça gruplarına aktarılmasında sorunlar yaşanmaktadır. İş parçalarının tek başlarına doğru olarak toleranslandırılması yeterli olmamakta, aynı zamanda biraraya getirilecekleri parçaların toleransları da dikkate alınarak kümülatif toleranslandırmaya dikkat edilmelidir. Yukarıda bahsedildiği gibi tekil parçaların montajındaki zincir toleransları etkileyen en önemli faktörler tekil parçaların imalatından sonra oluşacak geri esnemeler ve montaj sırasında (punta kaynağı, perçinli bağlantı vb.) oluşabilecek distorsiyonlardır.

Burada literatür araştırmasını kaynak ve geri esneme analizleri, ölçüm yöntemi, punta kaynak sırası, kaynak distorsiyonları ve tolerans çalışmaları olarak ayırabilmek mümkündür.

Geometrik ölçüler ve toleranslara (GD&T) göre proses toleranslarının belirlenmesine yönelik teorik araçlar henüz tam yeterli değildir. Yapılan çalışmalarda, Thimm [3] geometrik proses hatalarının (bükmedeki açısal hataların) etkisini belirlemek için, basit şekilde paralellik ve konum toleranslarını içeren iki tipik sac metal örneği ele almıştır. Bilgisayar Destekli Proses Planlama (CAPP) işlenen parçaların spesifikasyonlara uyması için CAD ve CAM arasında bir köprü görevi görmektedir. Burada, toleranslandırmayı proses planlama aşamasında muhtelif operasyonlar henüz planlanıyorken yapabilmek temel amaçtır [3]. Hatalar peşpeşe eklendiğinde, kritik ölçüler için gerekli toleransları sağlayacak kurulum ve işlemleri bulmak istenmektedir. İşte bu doktora çalışmasının temel felsefesi de buna dayanmaktadır.

Govik vd. [4] bir sac metal grubunun montajı sığ çekmeden yani şekillendirme ve geri yaylanma simülasyonundan başlanarak; konumlandırma, pensin sıkması, birleştirme (burada nokta kaynağı) ve en sonda amaç olan montajdaki geri esnemeyi bulmak için başvuru bir sonlu eleman analiz örneği yapmıştır.

Souza ve Rolfe [5] geri esnemenin; akma gerilmesinin değeri, sac kalınlığı, sürtünme ve Young modülünün değişmesiyle nasıl etkileneceğini yani hassasiyetini araştırmak için sonlu elemanlar yöntemi ile uygulamalar gerçekleştirmiştir.

Firat vd. [6] geri esnemenin sonlu elemanlar yöntemi ile belirlenmesinde; Bauschinger Etkisi göz önüne alan hızdan bağımsız bir anizotropi – elastisite modeli metodu sunmuştur. Böylece geri esnemenin daha iyi öngörülebileceği düşünülmüştür.

Manarvi ve Juster'in [7] amaçları başlangıçta bir tolerans belirleme algoritması yaratmaktır. Burada verilen sac parça örneğinde; herhangi bir kuvvet veya yükleme durumu göz önüne alınmadan, sadece yer değiştirme sınırlamaları dikkate alınarak tolerans uygulamasına gidilmiştir. Örnek bir Tolerans Sentez Prosesi verilmiştir.

Kazan ve arkadaşları [8] bükme prosesi seçeneklerini (örneğin; kalıp yarıçapı, sac kalınlığı ve n değeri) değiştirerek çeşitli Sonlu Eleman yöntemi simülasyonları yaparak elde edilmiş veriler ile Yapay Sinir Ağları işletilerek yeni durumlar için geri esneme tahminleri yapmaya çalışmışlardır.

Firat iki bölüm halinde çıkan yayınında [9], [10] şekillendirme metodunu daha iyi uygulayabilmek için sonlu elemanlar yönteminde çeşitli analiz yöntemi yolları denemiştir.

Dahlström vd. [11] belirli bir sac parça montaj örneğinde fikstüre bağlama, kelepçeleme ve parçaların birleştirme ve fikstürden çıkarma gibi adımlara sahip bir simülasyon tolerans analiz işlemi ile direnç punta kaynağıyla birleştirilen gerçek imalat yöntemi (örneğin kaynak tabancası kullanım değişkenliği) arasındaki karşılaştırmayı sunmuştur. Bu sunuş bu tez için önem teşkil etmektedir. Çünkü punta kaynağından sonra oluşacak distorsiyonlara etkiyen nedenler araştırılmıştır.

Shaoyun vd. [12] kaynakta değişkenlerin analitik simülasyonlarını irdeleyerek ve hem alın hem de bindirme kaynağı için bir sac parça montajı örneği sunarak, bu örnekte kaynak sıralarını değiştirip hataları incelemişlerdir; fakat geri esnemeyi hesaba katmamışlardır. Bu çalışmada punta kaynaklarının çeşitlerinin uygulanmasının yarattığı farkların belirlenmesi de değişik bir açı oluşturmuştur.

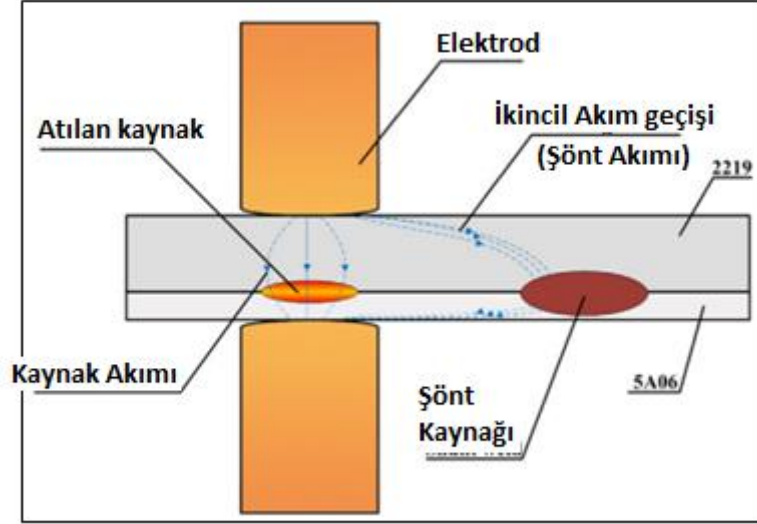
Ayrıca literatürde değişik ölçüm yöntemleri de araştırılmıştır. Bu araştırmanın amacı çeşitli ölçüm yöntemlerini inceleyerek özgün bir ölçme yöntemi bulmak için yeni metodları öğrenmek ve uygulamaktır.

Koutecky vd. [13] ölçme sistemi olarak robotun parçayı hareket ettirdiği ve kamera, kontrol bilgisayarı, endüstriyel robot ve robot kontrolörü bileşenleri arasındaki iletişim fonksiyonu ile görevini yerine getiren bir sistem geliştirmiştir.

Geleneksel ölçme yönteminde; SMR (Spherical mounted retro-reflector) hareketli; lazer ışını ise izleyici olmasıdır. Liu vd. [14] ise tam tersi bir yöntem sunmuşlardır. Onların önerisinde lazer ışını hareketli; SMR izleyicidir. Burada amaç, LMGR'yi (Laser-Guided Measuring Robot) endüstride daha kolay kullanılabilir hale getirmek ve LMGR'nin lazer doğruluğunu arttırmaktır. Avantajı ise manuele göre daha büyük etkinlik ve doğruluk sağlamasıdır.

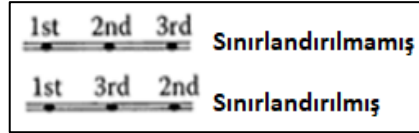
D'Acquisto ve Fratini [15] aksisimetrik derin çekilmiş bir parçanın bir veya daha fazla kontür üzerinden profilini belirleyecek bir ölçme tekniği önermiştir. Daha sonra bu geri yayanma ölçüm sonuçları CAD geometrisi ile çizilmiş kalıp ve parça ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. Burada çeşitli optik yöntemler önerilmiş ve bu ölçüm sonuçlarından elde edilen verilen karşılaştırılmıştır.

Kaynak sırası tüm kaynak yöntemlerinde olduğu gibi nokta direnç kaynağında da önemlidir. Bu özelliğin şönt etkisi (Senkara [16] ve Bi-Şekil 1.1 [17]) nedeniyle başka önemi de vardır. Şönt etkisinde akım bir başka punta kaynak noktasına akar.



Şekil 1.1 Şönt etkisi gösterimi

Bunun bir örneği Zhang ve Senkara,'nın kitabında da [16] görülebilir. Şekil 1.2'de de görüldüğü gibi sınırlandırılmış ikinci kaynak sırasında distorsiyonlar düşmüştür. Bunun nedeni ortadaki noktadan diğer iki komşuya akan kaynak akımıdır. Fakat tezde de kanıtlandığı şekilde, burada görüldüğü gibi bir noktaya gelen akımın düşmesi ile distorsiyonların düşeceği her zaman doğru değildir. Bu olay boyut, şekil gibi özelliklere bağlıdır.



Şekil 1.2 İki çeşit kaynak sırası gösterimi

Şönt etkisinden de görüleceği gibi, punta kaynak noktalarının arasındaki uzaklığın tayini önem taşımaktadır. Puntalar arası izin verilen uzaklık DIN EN ISO 14373'te [18] verilmiştir.

Kaynakta asıl irdelenecek kaynak parametrelerinin yanında distorsiyonları en çok etkileyen faktörler kaynak sırası ve fiktürleme konum ve boyutlarıdır. Punta kaynağındaki kaynak sırası konusuna literatürde pek yer verilmediği görülmektedir. Fakat benzetim yapabilmek için dikiş kaynağında distorsiyonlar üzerinde bir çok araştırma yapılmıştır. Bu noktada bazı örnekler verilebilir. Doyen vd. [19] bir çok kanal içeren çok gözlü bir kutu yapısı içeren TIG kaynağında kaynak sırasını soruşturmuşlardır. Bu çalışmaya göre, kaynak distorsiyonlarını minimize etmek için

çözümlerden biri bir kaynak oluşunun bir tarafından diğerine kaynak geçişini sağlamaktır. Ek olarak, Fu vd. [20] T-bağlantılarının kaynağında kaynak sıralarının artık gerilmeler ve distorsiyonlar üzerinde önemli etkilerinin olduğu sonucunu bulmuşlardır. Bu sırada hem sonlu eleman hem de deneysel yol kullanmışlardır. Bu etkiler hem büyüklük hem de dağılım yönünden geçerlidir. Ayrıca aşamalı (progresif) kaynak uygulamalarında tek taraflı kaynağa göre çift taraflı kaynakta daha az distorsiyon olduğu sonucuna varmışlardır. T-kaynaklı bağlantılarda tek taraflı kaynak sırası çift taraflı kaynak sırasına göre daha büyük distorsiyonlar vermektedir. Bunun yanında kalıntı gerilmeler distorsiyonlar ile birlikte düşünülmek zorundadır. Chen vd. [21] çalışmalarında denizcilik araçları imalatı için uzunlamasına ve enlemesine takviye elemanları ile güçlendirmiş bir plakaya yer vermiştir. Bunun için termal-plastik sonlu eleman metodu kullanmışlar ve 6 ayrı kaynak sırası simüle etmişlerdir. Onlar da kaynak sırasının artık gerilmeler ve distorsiyonlar üzerindeki etkisinin önemine ulaşmışlardır. Kaynak sıraları özellikle paneli bükme distorsiyonlarının büyüklüğünü etkilemektedir. Seçimli olarak belirlenen kaynak sırasının uygulanması ile bükme sonrası oluşan geri esnemeleri iyileştirilebileceğini de önermişlerdir. Böyle geliştirmeler punta kaynağında da uygulanabilir. Catana [22] kaynak sırasını değil ama çekme yükü altındaki kaynak sırasına benzer en uygun deseni sorgulamıştır. Hem simülasyon hem test sonuçlarını kullanmıştır. En uygun çözüm olarak kare desenini bulmuştur. Bu çalışma da bir nevi punta kaynak noktaları konumunun önemini göstermektedir.

Sulaiman vd. [23] Gaz Metal Ark kaynağındaki (MIG-MAG) kaynak distorsiyonlarını tahmin etmeye çalışmışlardır. Bunun için sonlu eleman yazılımı Weld Planner kullanmış ve alın ve T- bağlanstısında karşılaştırma yapmak için deneyler yürütmüşlerdir. Belli bir doğrulukta distorsiyon sonuçlarının uyduğunu bulmuşlardır. Yani kullanılan yazılımın dayandığı daralma analiz metodu (shrinkage analysis method) distorsiyon kaynaklarını tahmin etmek için iyi bir yöntemdir. Folchi [24] yüksek lisans tezinde bu yöntemle dayanan Weld Planner uygulamalarına yer vermiş ve bazı sonuçlara ulaşmıştır. Bu sırada bu yazılımı transient analiz yapan Sysweld (yine ESI Group'un) ile karşılaştırmıştır. Weld Planner'ın başlıca amacı hesaplama zamanını düşürmektir. Fakat fikstürleme durumunu verirken bazı dezavantajlara sahiptir. Fikstür zamanları verilememektedir ve sonuçlar fikstürler yüksek sıcaklıklarda devre dışı bırakıldıklarında

tahmin edilememektedir. Sonuç olarak Folchi [24] daralma metodunun kaynak distorsiyonlarını transient analize göre daha elverişli sunduğunu çünkü burada parameter girişinin daha az ve basit olduğunu belirtmiştir. Bunun yanında, (Jackson ve Darlington [25] Folchi ile aynı düşünceyi paylaşmışlardır. Bir havacılık motor montajında, ürün geliştirme prosesi sırasında daralma tekniğinin hızlı çözüm özelliğinin bir çok avantaj sunduğunu kanıtlamışlardır. Bununla birlikte sonuçlar yine Sysweld sonuçlarına çok yakındır.

Direnç kaynağı vasıtası ile metal sac montajı başka önemli bir konudur ve değişken analizi (variational analysis) ile direkt bağlantılıdır. Bu bağlamda, örneğin Shaoyun vd. [12] çalışmalarında bindirme ve alın kaynakları için geometrik modeller sunmaktadır. Bunun yanında, Dahlström vd. [11] parçaların fikstüre yerleştirilmelerini, sıkılmalarını ve parçaların birbirleri ile bağlanmalarını sac metal montaj değişkenlik analizine eklemişlerdir. Moos ve Vezzetti ise [26] kaynak sırasını değişkenlik analizine fikstürleme ve direnç nokta kaynağının etkileri ile birlikte sunmuşlardır (örneğin kaynak uçlarının kapanması).

Mrvar vd. [27] Sysweld ile hidroelektrik santralinden kullanılan bir boru üzerinde üç değişik kaynak sırası ve fikstürleme durumu için distorsiyon tahmini denemişlerdir. Weld Planner'a kıyasla Neumann vd.'nin [28] ve Shanmugam'ın vd.'nin [29] çalışmaları ile Francis'in [30] yüksek lisans tezinde de görüleceği gibi Sysweld ile yapılmış bir çok örnek mevcuttur.

Punta kaynağı için distorsiyonlarla kaynak parametreleri arasında ilişki kuran yayınlar mevcut değildir. Fakat bunun yanında kaynak dayanım gerilmeleri ile kaynak parametreleri arasında ilişki kuran yayınlar mevcuttur (örneğin: Eşme [31]). Bu aşamadan itibaren literatürdeki değişik dikiş kaynak yöntemlerinde çarpılmalar ve distorsiyonlarla bu yöntemlerin kaynak parametreleri arasındaki ilişkiyi inceleyen çalışmalar ele alınacaktır. Böyle bir matematiksel ilişki kurmak istemenin amacı her zaman belirli parametreler için sonlu eleman yazılımının dervreye alınıp simülasyon koşturulamayacağıdır. Böyle bir çalışma hem uzun zaman alıcıdır hem de belirli bir hesaplama gücüne sahip donanım gerektirmektedir. Bunun yanında deneysel çalışma da hem insan gücü hem de malzeme kaynağı gerektirmektedir. Bunun yerine, belirli



koşullar altında distorsiyonların kaynak öncesi tahmini gerekli ve önemlidir. Bu da kaynak distorsiyonlarını telafi edecek tasarım süreçlerine izin verecektir.

Tian vd. [32] bir plakanın TIG kaynağında enine ve açılal distorsiyonları Yapay Sinir Ağları kullanarak tahmin etmeye çalışmışlardır. Burada BPN ağ yöntemi kullanmışlardır. Hem deneysel hem de sonlu elemanlarla çalışma yapmışlardır ve deneysel sonuçları BPN modelinin test örnekleri olarak kullanmışlardır. Burada açılal distorsiyon ve enine büzölme çıkış parametreleri olarak verilirken, kaynak hızı, akım ve voltaj değerleri giriş parametreleri olarak verilmiştir. Sonlu eleman modeline hem ısısal hem de mekanik analiz uygulanmıştır. Malzeme S304L çeliği olarak seçilmiş ve malzeme izotropik sertleşen termo-elastik-plastik olarak modellenmiştir. Ayrıca plaka ve elektrodun yarısı modellenerek simetrik bir model oluşturulmuştur. Termal analiz için ısı girdisi Gauss dağılımı ile gösterilmiştir.

$$q(t) = \frac{3Q_A}{\pi r_a^2} \exp \left[ -\left( \frac{r(t)}{r_a} \right)^2 \right] \quad (1.1)$$

Burada ısı akışı  $q(t)$  için,  $r_a$  ark kaynağı dikişinin yarıçapını,  $r(t)$  dikiş merkezinden anlık radyal uzaklığı,  $Q_A$  ise kaynak arkından gelen ısı girişini temsil etmektedir.  $Q_A$  ise

$$Q_A = \eta IU \quad (1.2)$$

şeklinde hesaplanabilir. Burada  $\eta$  ark yeterlilik katsayısı olup, radyasyon ve arkta çevreye olan diğer kayıpları temsil etmektedir.  $I$  elektriksel akım,  $U$  ise voltajdır. Burada böyle bir Gauss ısı modeli ele alınsa da her değişik türdeki kaynak çeşidi için değişik bir matematiksel ısı girdi modeli verilebilir. Mekanik analiz için ise  $\epsilon^{\text{total}}$  toplam gerininin elastik gerinim  $\epsilon^e$ , plastik gerinim  $\epsilon^p$  ve termal gerinim  $\epsilon^{\text{th}}$  bileşenlerinden oluştuğu kabul edilmektedir. BP bir, çok katmanlı ileri beslemeli gözetimli (supervised) öğrenme algoritmasıdır ve lineer olmayan enterpolasyon yeteneği sayesinde bir çok mühendislik uygulamasında tahmin ve optimizasyon için kullanılmaktadır. BP ağı bir veya birçok gizli katman içerse de bu çalışma için bir gizli katmanlı kabul edilmiştir. Bu çalışmada, belirli bir eşik ısı girdi değerine kadar ısı artışı ile açılal distorsiyonun arttığı, belirli bir değerden sonra ısı artışı ile azaldığı görülmektedir. Enine büzölme ise ısı girdisinin artışı ile sürekli artmaktadır. Elde edilen BPN modelinin sunduğu matematiksel ilişkinin çıkış parametrelerini büyük bir doğrulukla tahmin ettiği görülmüştür. Bu da oluşturulan BP

ağ modelinden tahmin edilen sonuçlar ile deneysel sonuçların karşılaştırılması sonucunda doğrulanmıştır. Burada yaklaşık 0.99 değerinde bir korelasyon katsayısı hesaplanmıştır.

Deng ve Murakawa [31] ince levha panel yapılarda kaynağın neden olduğu burulma distorsiyonunu FEM yolu ile tahmin etmeye çalışmışlardır. Bu yapılar genellikle gemi yapımına aittir. Murakawa kaynakta distorsiyon alanında uzmanlaşmış olup bu konuda bir çok yayını vardır. Deng'e göre kaynak distorsiyonu, yüksek derecede linner olmayan özelliğe sahip olup, malzeme doğrusalsızlığı, geometrik doğrusalsızlık ve temas doğrusalsızlığı içermektedir. Hassas distorsiyon tahmini için bu doğrusalsızlık olayı iyi incelenmelidir. Bu sırada termo-elastik-plastik FEM metodu, içsel gerinim teorisi ve arayüzey eleman metodu gibi yöntemler kullanılmıştır. Çıkan simülasyon sonuçlarına göre, ısı girdisinin kaynak distorsiyonu üzerinde önemli bir etkisi vardır. Büyük ısı girdisi ince levha panel yapılarda burulma distorsiyonuna neden olmaktadır. Isı girdisini düşürmek burulma eğilimini azaltmak için etkili bir yöntemdir. Ayrıca kaynak sırası özellikle ince levha panel yapılar için önemli bir etkidir. Levhaların kalınlığını arttırmak burulma eğilimini azaltabilir; fakat bu yapının toplam ağırlığını arttıracaktır. Tasarım aşamasında, tasarımcılar burulma eğilimini ve yapı ağırlığını dengelemelidirler. Bu çalışmada önerilen yöntem bu amacı gerçekleştirmek için bir seçenek olabilir. Bunların yanında, enine dik takviyeler arasındaki uzaklıkların değiştirilmesi değişik burulma modlarına yol açacaktır. Bu çalışmada sunulan metod sadece montaj işlemi sırasındaki kaynak distorsiyonlarını tahmin etmek için değil, yapısal tasarımı optimize etmek için de kullanılabilir. Wang vd. (yine Murakawa dahil) [34] bu çalışmanın devamı niteliğinde yine aynı gerinim tipi araştırmalarının işin içine dahil edildiği, gemi panel yapısı üretiminde kaynak nedenli burulmayı tahmin etmek için etkin bir FE hesaplama yöntemi sunmaya çalışmışlardır.

Punta kaynağı analizleri bakımından değişken analiz konusuna sık sık değinilmiştir. Örneğin Moos ve Vezzetti [26] bu konuda en kapsamlı çalışmayı yürütmüşlerdir. Bu çalışmalarında uyumlu montajlarda değişken analizi için direnç nokta kaynağının simülasyonunu incelemişlerdir. Bu çalışma montaj deformasyonları ve geri esnemeyi değerlendirmek amacıyla malzeme plastisitesini göz önüne alacak şekilde düzenlenmiştir. Kaynak işleminde FEM simülasyonu tanımlamak için kullanılacak bir

metodoloji önermektedir. Simülasyon, boyutsal ve geometrik toleranslar verilmiş sac parçalara uygulanmış fikstürlerin ve nokta direnç kaynağının etkisini göz önüne almaktadır. Burada önerilen simülasyon şu anda literatürde veya İstatistiksel Tolerans Analizi için kullanılan elastik modeller için aşağıdaki şartları göz önünde bulundurarak bir gelişme sunmaktadır.

- Bu çalışmada punta kaynağı için baştaki fikstür kapanması, elektrodların kapanması, ısı uygulanması, soğuma, elektrodların açılması ve fikstür açılması gibi aşamalar bulunmaktadır.
- Boyutsal ve geometrik toleransların etkisi altındaki parçaların üzerine fikstür ve elektrod kapanmasından doğan plastik deformasyonların etkisi
- Punta kaynağında sıcaklık artışı nedeniyle oluşan plastik deformasyonlar ve bunların sacların şeklini sürekli değiştirmesi
- Elastik enerjiden kaynaklanan geri esneme
- Kaynak sırası

Bu çalışma [26] bu doktora tezinde ele alınan metoda literatürde var olan en benzer gidişatı sergilemektedir.

Moos vd. [35] yukarıdaki çalışmaya benzer bir çalışmayı 2011 yılında yürütmüş ve yayınlamışlardır. Burada amaç punta kaynağındaki plastik deformasyonların etkisini de tolerans analiz modeline katmaktır. Bu amaca yönelik bir FEM modeli oluşturulmuştur. Genel olarak aralıklı ve girişimli olarak nitelendirilebilecek iki durum incelenmiştir. Fikstürlerin bağlanması, elektrodların kapanması ve kaynak ısı çevriminin ölçüsel montaj kalitesini etkilediği görülmüştür. Bu gibi etkenlerin İTA için önemli olduğu belirlenmiştir. Yine bu çalışmanın prensibi de bu doktora tezinde ele alınan temel mantıkla örtüşmektedir. Çünkü burada da deformasyonlardan yani ölçüsel sapmalardan Tolerans Analizi'ne geçiş göz önünde bulundurulmaktadır.

Mali ve Inamdard [36] 2012 seneli çalışmalarında punta kaynak yerinin sonuç geometriye olan etkisini incelemişlerdir. Çalışmalarında bir İsveçli otomobil üreticisinin üretiminde, punta yerlerinin resimdeki nominal veri ile gerçek atılan punta yeri arasında 19 mm'ye varan farklar gözlemlenmiştir. Yürütülen Monte Carlo

simülasyonları sonucunda punta yerlerinin geometrik kaliteyi önemli ölçüde etkilediği görülmüştür.

Deng [37] faz dönüşümlerinin etkisini göz önünde bulundurarak kaynaktaki kalıntı gerilmeyi ve distorsiyonu tahmin eden FEM çalışması yayınlamıştır. Bu çalışmada Abaqous kodu kullanılarak TIG kaynağının termal, metalurjik ve mekanik 3B sonlu eleman modeli geliştirilmiştir. Burada giriş verisi olarak sürekli soğuma dönüşüm diyagramları kullanılmıştır. Düşük karbonlu çeliklerde düşük martenzitik dönüşümden dolayı sonuçların faz dönüşümünden az etkilendiği, yüksek karbonlu çeliklerde ise büyük ölçüde etkilendiği gözlemlenmiştir. Böylelikle düşük karbonlu çelikler için faz dönüşümü bu tip analizlerde kullanılabılır.

Chen vd. [38] 2014 yılında 3B ölçüsel tolerans analizi için geniş bir çalışma yayınlamışlardır. Burada 4 yöntem önerip bunları karşılaştırmışlardır. Bu yöntemler Tolerans Haritası (Tolerance-Map (T-Map)), Matris Model, Jakobiyen-Torsor modeli ve Direkt Çizgisellendirme Yöntemidir (Direct Linearization Method). Hepsinin kendine göre avantajı ve dezavantajı vardır. Ayrıca Yan vd. [39] Monte Carlo metodunun Tolerans Analizi'nde kullanımına yönelik bir uygulama örneği çalışması yürütmüşlerdir. Corrado vd. [40] ise sürtünme, yerçekimi gibi imalat prosesinin ve çalışma koşullarının ele alındığı 3B Tolerans Analizi için bir model gerçekleştirmeye çalışmışlardır.

Ayrıca Douflou vd. [41] sac bükme prosesi için bilgisayar destekli tolerans çalışmaları yapmışlardır. Bükme prosesi ilerledikçe tolerans sınırlarının daraldığını belirlemişlerdir.

## **1.2 Tezin Amacı**

Bir otomobilde yaklaşık 3000-6000 punta kaynağı bulunmaktadır [42]. Punta kaynağı özellikle otomotiv endüstrisi olmak üzere bir çok sanayi dalında kullanım alanı olan bir yöntemdir ve endüstride basit ve kullanımı kolay çalışma prensibine dayandığı için önemli bir yer kaplamaktadır.

Burada tez ile ulaşılması istenen hedef tasarımcıya daha tasarım aşamasında iken kaynak birleştirmeli sac parça montaj gruplarında yardımcı olmaktır. Tasarımcıya hem boyutsal hem de tekil ve birleşik toleransları verme ve tolerans tiplerini uygulamada destek olmak amaçlanmaktadır. Buna yönelik olarak bir metodoloji sunmak asıl amaçtır

ve sunulacak metodolojinin ihtiyaçları karşılayıp karşılamadığı görülecektir. Burada ulaşılması istenen nokta parçaları belirli bir bileşik toleransa (ilgili İstatistiksel Tolerans Analizi Yöntemi ile hesaplanan veya teknik resimde verilen) göre tekil parçaları eşlemek ve gruplamaktır. Bu amaca da yönelik olarak bir mekanizasyon gerçekleştirilecektir. Söz konusu mekanizasyon ilgili toplam sapmalara göre çalışacaktır. Bu sapmalar parçaların bükülmesinden veya kalıptan çıktıktan sonra oluşan geri esnemeler veya punta kaynağı sonrası distorsiyonlardır. Burada geri esnemeler şekillendirme analiz programı yardımı ile veya tarama ile elde edilebilir. Bu veriye vektörel olarak punta kaynağı sonrası distorsiyonlar eklenebilir. Punta kaynağı parametreleri ile kaynak sonrası oluşacak distorsiyonlar arasında bir matematiksel bağıntı kurmak bu tezin diğer asıl amaçlarından biridir. Bu bağıntı kaynak analiz programları vasıtasıyla bulunabilir. Söz konusu bağıntı sonrası elde edilecek distorsiyonlar direkt olarak toplam sapma bulunması işleminde kullanılabilir.

Yukarıda bahsedilen eşleme algoritması ile birçok hatalı parça bile birleşik toleransı tuturacak şekilde birleştirilebilir. Bu algoritmaya dayalı oluşturulacak mekanizasyonun bir çok ekonomik ve endüstriyel katkısı olacaktır.

Bu çalışmada kaynak analiz programları ile çalışılacağından çeşitli parçaların değişik kaynak parametreleri ve fikstürleme koşulları altında punta kaynak distorsiyonları incelenecektir. Bu konuda fikstür şartları ve kaynak parametreleri ile belirli kontrksiyonlar için distorsiyonlar arasındaki ilişki için belirli çıkarımlar yapmak diğer amaçlardandır.

### **1.3 Orijinal Katkı**

Gerek sanayide gerekse literatürde tez konusu araştırıldığında aşağıdaki konularda tezin orijinal katkısının olacağı saptanmıştır:

- Literatürde punta kaynak parametreleri ile punta kaynağı sonrası distorsiyonlar arasında matematiksel bağıntı kuran yayın yoktur. Buradaki yayınlar hep dikiş kaynağı (rneğin TIG kaynağında burulma) içindir. Punta kaynağı parametreleri ile punta bölgesinin dayanımı arasında ilişki kuran yayınlar mevcuttur ama distorsiyon için yoktur. Bu tezle punta kaynak parametreleri kaynak akımı,

kaynak zamanı ve elektrod kuvveti ile distorsiyonlar arasında bağıntı kurulacaktır. Punta kaynağı için ilk kez böylesine bir ilişki kurulacağı için ilk defa bir kaynak türü için içerisinde elektrod kuvvetinin yani birleştirme kuvvetinin etkisi olan distorsiyon için bir bağıntı kurulmuş olacaktır.

- Solidworks ve NX gibi çizim yazılımlarında Tolerans Analiz modülleri mevcuttur. Bu modüller, çizilmiş olan CAD parçaların tekil toleransları girildiğinde söz konusu toleransların montajlı haldeki toleransları nasıl ve hangi oranda etkilediğini ve birleşik toleransları gösterir. Fakat gerçekte CAD ortamında istenen tam ölçü sağlanamayacak ve tekil parçalar imalat sonrası farklı sapmalar içerecektir. Tezde sunulan yöntem her çeşit sapmaya ait çözüm üretecektir. CAD programlarında sunulan öneriler tek ideal ölçüler için geçerlidir.
- Yukarıda sunulan bir önceki öneriye paralel olarak imalat sonrası distorsiyonlar imalat parametreleri üzerinden ayarlanabilir. Örneğin punta kaynağında gerekli dayanım testleri yapılarak belli sınırlar içinde kalınması koşulu ile parametreler üzerinde ve dolayısıyla distorsiyonlar üzerinde istenen değişiklikler yapılabilir. Oysaki örneğin TOFAŞ'ta da görüldüğü gibi sanayide distorsiyon veya imalat sonrası sapma değiştirilmek istendiğinde direkt tasarıma gidilmektedir; halbuki imalat prosesinin kendisine de başvurulabilir. Burada punta kaynağı ele alınsa da bu imalat prosesi her türlü proses olabilir; örneğin bükmede geri esneme için bir parametre geri esneme büyüklüğü ilişkisi kurulabilir ve bu sefer bükme prosesi önceden yönetilebilir.
- Mesela SORPAS (punta kaynak yazılımı) gibi yazılımlar istenilen kaynak çekirdeği ile kıvılcım sınırı arasındaki kaynak parametre sınırlarını vermektedir. Bu tezde sunulan çözümlerden hareketle böyle yazılımlar ile yukarıda anılan CAD programlarının Tolerans Analiz modülleri birleştirilebilir. Dayanım göz önüne alınarak istenilen katkıda yapılması gereken boyut değişiklikleri direk kaynak parametreleri değişiklikleri ile gerçekleştirilebilir.
- Tezde kullanılan Weld Planner yazılımında punta kaynak seçeneği sanayide pek kullanılmamaktadır. Yazılımın BAP desteği ile alındığı Onatus Firması da dışarıya bir çok analiz yapmakla birlikte genelde dikiş kaynağı konusunda çalışmışlardır.

Bu yüzden karşılaşılan bazı problemlerin çözümünde de sorunlar yaşanmıştır. Bu tezde bu yazılımın Punta Kaynağı modülü kullanılmıştır.

- Bu çalışmada simülasyona CAD dataları sokulmuştur. Aslında diğer çalışmalarda uygulanmamış olarak daha sağlıklı sonuç almak için STL datası analize girdi olarak verilecekti. Bu bazı dezavantajlardan dolayı gerçekleşmemiştir. TOFAŞ bütün parçaların STL datasını vermemiştir. Polyworks ve daha başka program arayışları olmuştur fakat sonuca ulaşamamıştır. Tabi STL datasını analize sokmanın da dezavantajları vardır. Bunlar parçaların meshlerinin detaylı olacağı ve simülasyonun çok uzun süreceğidir. Ayrıca analize sokmadan önce bu dataların konumlandırma problemi çıkacaktı. Buna ek olarak ilk yapılan basit modellerde parmak izleri vs. de vardı; onları doldurmak ve ayrıca mesh üzerinden yeniden yaklaşık bir yüzey geçirmek vs. bunlar da ekstra iş yükü getirecek ve ayrıca tam sonuçtan uzaklaşmaya yol açacaktı. Yine de STL'lerle kaynak simülasyonları yapıp distorsiyon tahmini gerçekleştirmek başka sakıncalar da içerecekti. Çünkü onlar belirli STL'ler için söz konusu kombinasyonlar için geçerli distorsiyonlar olacaktı. Fakat bu çalışmada karışık eşleme yapılacaktır. O yüzden ortalama bir girdi çizim değeri almak gerekebilir; bu da en sağlıklı olarak CAD datası üzerinden gerçekleştirilebilir.
- Punta kaynağında ' $Q=RI^2t$ ' formülü uygulanıp genel ısı girdisi hesaplanmaktadır. Kaynak akımını geçerli olacağı bu formülde bu kaynak akımına ulaşınca kadar geçen yukarı rampa zamanı ve bu akımdan 0 değerine kadar ulaşınca kadar geçen aşağı rampa zamanı altında kalan alan da göz önünde bulundurulmalı ve asıl  $\int_0^{\tau} RI^2 dt$  formülü üzerinden bu kaynak akımı kaynak zamanı diyagramı altında kalan alan dikkate alınmalıdır. Hatta ön ısıtma ve son ısıtma için de aynı yol izlenebilir. Tez çalışmasında ısı girdisi için temel prensip olarak bu göz önünde bulundurulmuştur.

### DİSTORSİYON NEDENİ OLARAK PUNTA KAYNAĞI VE GERİ ESNEME

#### 2.1 PUNTA KAYNAĞI

Direnç kaynağı iki metali birleştirmede kullanılan en yaygın yöntemlerdendir. Ek bir dolgu maddesi veya erimiş metal havuzuna ihtiyaç yoktur. İş parçaları üzerinden iletilen yüksek akım sayesinde ihtiyaç olan erime sağlanır. Direnç nokta kaynağı (punta kaynağı); kabartılı nokta kaynağı ve dikiş kaynağı olmak üzere üç çeşidi vardır. Bu çalışmada ilgilenilen ve incelenen ana konu punta kaynağıdır.

##### 2.1.1 Yöntem Tanıtımı ve Esasları

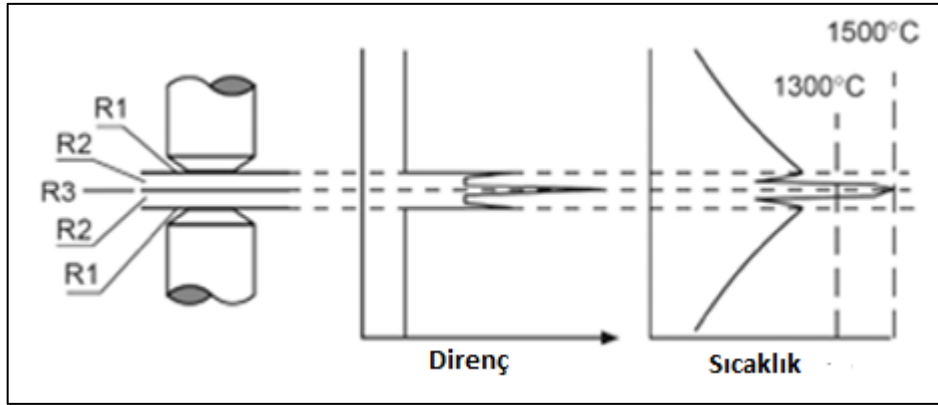
Direnç kaynağı ucuz ve etkin bir yöntem olup sac bağlantılarında alışlagelmiş çok popüler bir metoddur. Bu yöntem bütün dünya ekonomisi açısından özellikle otomotiv sektöründe kullanıldığı için büyük önem taşımaktadır. Bununla birlikte direnç kaynağı motor, elektroteknoloji, makine yapımı, kimya, inşaat endüstrisi, ev aletleri yapımı, gıda işleme endüstrisi, kontrol ve tıbbi teknoloji alanlarında da kullanılmaktadır [43]. Otomotiv sektöründe bir aracın yapımında özellikle otomobilin iskeletinde punta kaynağı önemli bir rol oynamaktadır. Çünkü bir arabanın iskeleti birçok parçadan oluşmaktadır ve bunlar da punta kaynağı ile birleştirilmektedirler. Bir araba yaklaşık 30000 parçadan oluşmakta ve bir arabaya 4500-4800 civarı direnç nokta kaynağı uygulanmaktadır. Genel olarak ise bir otomobilde 3000 ila 6000 arasında punta kaynağı bulunmaktadır [42]. Bugün punta kaynağı incelenip uygulama yöntemlerinde ilerlemeler kaydedilmeye çalışılmaktadır. Bununla birlikte punta kaynağının değişik





dirençler de kaynağı daha zor bir hale getirdiği ve kaynağın ısıl dengesini bozdukları için istenmezler [45].

En yüksek geçiş direnci iş parçaları arasında oluşurlar; çünkü yumuşak bakır elektrod uçları iş parçası yüzeyi ile daha iyi bir temas oluştururlar. En yüksek direnç burada oluşacağı için en yüksek ısı enerjisi de burada oluşacaktır. Bu yüksek geçiş direnci, kaynağın iş parçaları arasında oluşmasını sağlar (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 En yüksek direncin iş parçaları arasında oluşması

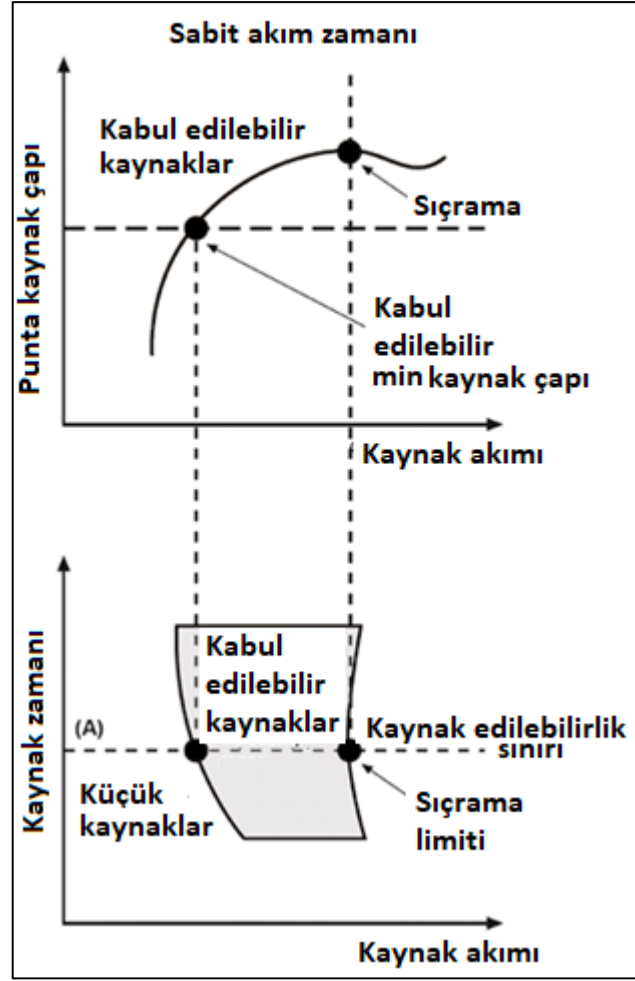
Temas yüzeyi geçiş direncinin büyüklüğünü direkt etkilemektedir. Elektrod ucu büyültüldüğünde veya elektrod kuvveti arttırıldığında iş parçası ve elektrod arasındaki geçiş direnci, yüzeylerin sahip olduğu pürüzlerin ve düzensizliklerin birbirlerine karşılıklı olarak bastırıldıkları için gerçek temas yüzeyini büyüdüğünden, düşmektedir. Kabartılı kaynakta da kaynağın tam olarak kabartılarda oluşmasının sebebi de yine temas yüzeyinin buralardaki küçüklüğünden kaynaklanmaktadır [45].

Tek bir kaynak yapımı 4-20 kA'lık kaynak akımı ile gerçekleştirilmektedir ki bu kaynak akımı da iş parçalarının malzemelerine ve kalınlıklarına bağlıdır. Seri akım olarak da adlandırılan yöntem ile punta kaynakları aynı anda gerçekleştirilebilirler. Bunun yanında punta kaynağı çeşitli metalik malzemelerin ve değişik kalınlıktaki iş parçalarının birleştirilmesinde büyük deformasyonlar oluşturmada gerçekleştirilebilir.

### 2.1.2 Nokta direnç kaynağının adımları

Nokta direnç kaynağının adımları şu şekildedir: elektrodlar kaynak edilecek iş parçalarını birbirlerine karşı bastırırlar; elektrod kuvveti elektrodlar arasındaki iş





Şekil 2.4 Kaynak yapılabirlik aralığı

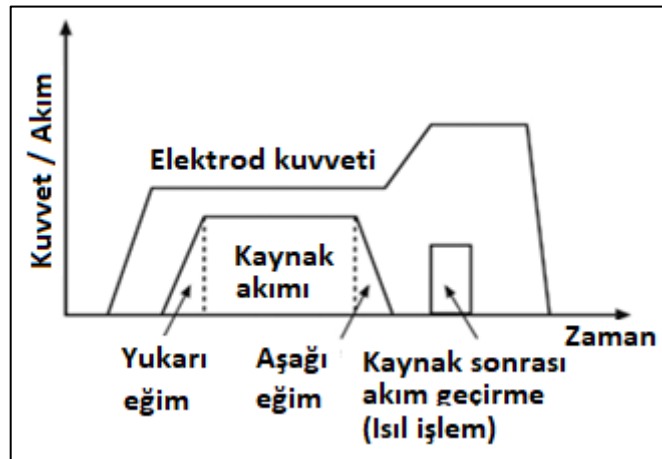
İyi bir punta kaynağı yeterli çapa ve çekirdek penetrasyonuna sahip olmalıdır. Kaynak çekirdeğinin minimum kabul edilebilir çapı  $3.5\sqrt{t}$  olmalıdır. Daha küçük çaplı kaynaklar yeterli penetrasyona sahip değildir ve kaynağın boyutu hesaplanan yükleri taşıyacak yeterlilikte değildir. Tavsiye edilen kaynak çapı  $5\sqrt{t}$ 'dir. Bu değere kıvılcım sınırının hemen altında erişilir. Bu noktada kaynak çekirdeği büyümesi sabitlenmiş ve kaynak akımı veya iş parçası yüzey kalitesindeki küçük bir değişim kaynak boyutunu büyük derecede değiştirmemektedir [45].

Kıvılcım sınırı aşırı ısı girdisi ile aşılmaktadır. Bağlantıdan erimiş metal sıçrarken kaynak içinde büyük boşluklar kalır. Bu da yüzeyin yüke karşı dayanımını düşürür. Erimiş metalin sıçraması elektrodların iş parçasına daha çok dalmasına sebep olur. Bu tür bir dalma kaynağın kenarlarında malzeme kalınlığının düşmesine neden olur. Bu da kaynak teknik özelliklerini bozabilir. Minimum kabul edilebilir kaynak çapı ve kıvılcım asını

arasındaki bölge kaynak edilebilirlik alanı olarak tanımlanır. Bu bölgede üretilen kaynaklar punta kaynakları için gerekli genel gereksinimleri sağlarlar. Dalmanın genelde parça kalınlığının %20'si olması beklenir [45].

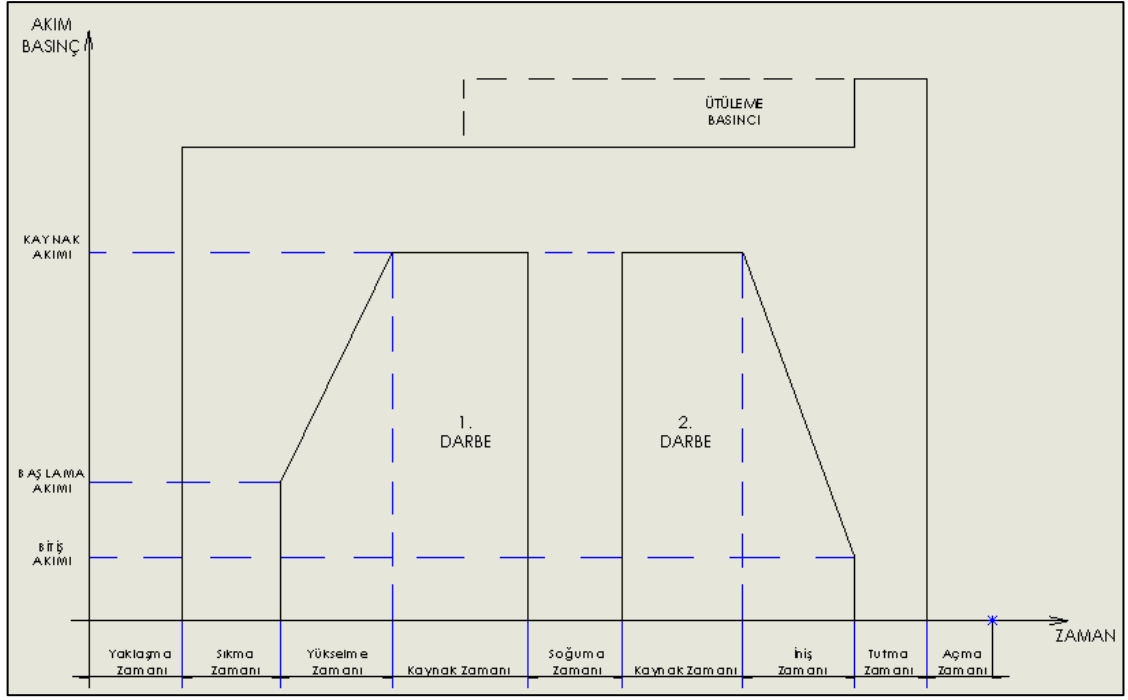
### 2.1.3 Punta Kaynağı Kalitesine Etki Eden Faktörler – Punta Kaynağı Parametreleri

Ayarlanabilir en önemli punta kaynağı parametreleri kaynak akımı, kaynak zamanı, elektrod bastırıcı kuvveti ve elektrod kuvveti ve elektrod geometrisi ve elektrod malzemelerinin seçimidir. Diğer parametreler sıkma ve turma zamanlarını, kaynaktan önce veya sonra olası ısıt işlemleri, kaynak akımının (eğim fonksiyonunun) aşağı ve yukarı (up- and downslope) eğimlerinin ayarlanmasını, elektrod kuvvet ve zamanlamasını ve kaynak akımının titreşimini-darbeyi (*pulsation*) içermektedir. Bununla birlikte, bütün bu seçeneklerin hepsi bütün kaynak ekipmanlarında erişilebilir değildir [45].



Şekil 2.5 Punta kaynağı işlem basamakları ve zamana dayalı gösterimi

Şekil 2.5'te punta kaynağının basamakları gösterilmiştir. Kaynak yukarı ve aşağı rampaları eğim fonksiyonu kullanılarak ayarlanmıştır. Kaynak akımından sonra bir de ısıt işlem uygulanmıştır. Ek olarak, kaynak prosesinin sonunda elektrod kuvveti arttırılmıştır. Şekil 2.6'da ise sanayiden punta kaynağı makine üreticisi Mistaş'tan alınan zamana bağlı elektrod kuvveti ve kaynak zamanı girdi diyagramı verilmektedir [47].



Şekil 2.6 Mistaş'tan alınan akım, kuvvet zaman diyagramı

### 2.1.3.1 Kaynak akımı

Kaynak bölgesinde oluşan ısı miktarı büyük oranda kaynak akımına bağlıdır. Kaynak akımındaki küçük bir artış bile kaynak bölgesinin çapını, kökünün derinliğini ve dolayısı ile kaynağın dayanımını arttırmaktadır. Birçok punta kaynağı makinasında kaynak akımı makinanın nominal kuvvetinin herhangi bir yüzde değeri ile veya kaynak transformatörünün transformatör oranı ile belirlenmektedir [45].

Kaynak boyutu; kaynak zamanının değiştirilmesi ve arttırılması ile, kaynak akımının değiştirilmesine göre, daha hızlı yükselmektedir. Kaynak zamanı çevrimlerle (cycle) tanımlanmaktadır. Bir çevrimin süresi ülkemiz ve Avrupa için 50 Hz'lik akım için 0.02 saniyedir (Amerika'da 60 Hz) [45].

Kaynakta giren enerji miktarı kullanılan kaynak akımına ve kaynak zamanına bağlıdır. Punta kaynağında kısa çevrim zamanları tercih edilmektedir ki bu da daha yüksek kaynak akımı ve olabildiğince kısa kaynak zamanları demektir. Bu durumda, daha az ısı çevreye iletilmektedir ve böylece ısı genleşme daha düşük düzeyde kalmakta ve kaynak daha hızlı katılaşmakta ve soğumaktadır [45].

Kaynak zamanı çok düşük tutulduğunda, iş parçası ve elektrod ısının çok büyük bölümünü iletcek ve kaynak bölgesi oluşmayacaktır. Alüminyum ve bakırın yüksek ısı iletkenliğinden ötürü çeliğe göre daha yüksek minimum kaynak akımı değerleri vardır.

Kaynak zamanındaki artış elektrodların aşınmasını ve iş parçasına dalmayı yükseltecektir. Ek olarak, ısı daha geniş bir alana iletilmek için daha fazla zamana sahip olacaktır. Bu da daha uzun soğuma zamanları demektir ve kırılma ile sertleşmeye eğimli kaynak malzemeleri için daha uygun olacaktır. Daha uzun soğuma zamanları yeterince uzun tutma zamanları ile sağlanabilir [45].

### **2.1.3.2 Elektrodlar ve Elektrod Kuvveti**

Elektrodlar, kuvveti ve kaynak akımını istenen bölgeye iletirler. Ayrıca kaynak bölgesini bütün kaynak prosesi sırasında soğutma fonksiyonuna sahiptirler.

Elektrod kuvveti elektrod uçları ile iş parçası arasındaki teması etkiler. Çok küçük kuvvet, iş parçaları ve elektrodlar ile iş parçaları arasındaki gerekli teması kurulumamasına neden olur. Bu durumda sıçrama, kıvılcım ve elektrodların hızlı aşınması oluşmaktadır.

Yeterli elektrod kuvveti bağlantı içindeki kaynak banyosunun dışarı çıkmasını veya sıçramayı engelleyecek şekilde banyoyu tutar. Uygun elektrod kuvveti kullanarak elektrod ve iş parçası arasındaki yüzeylerde temas direnci düşük bir seviyede kalır ki bu da bu temas yüzeylerinde erime olmamasını ve elektrodların kaynak bölgesini uygun bir şekilde soğutmasını sağlar. Bu durumda, kaynak iyi bir ısı dengesine sahiptir. Kaynak enerjisinden kaynaklanan ısının büyük kısmı, kaynağın istenen yerde olmasını da sağlayacak şekilde iş parçaları arasındaki temas yüzeylerinde oluşur [45].

Çok yüksek elektrod kuvvetleri elektrodları iş parçasının üzerine yüksek derecede bastırır ki bu da delmeye neden olur. Büyük dalma oranları kaynağın dayanımını düşürür. Bazı punta kaynak makineleri kaynak prosesi sırasında elektrod kuvvetinin ayarlanmasını sağlar. Bu da yüksek temas direnci veya iyi iletkenlikten kaynaklanan problemlerin daha iyi kontrol edilmesini temin eder.

Kaynak elektrodlarının geometrisinin ve çapının kaynak prosesi ve punta ile dikişi kaynağındaki kaynak özellikleri üzerinde büyük bir etkisi vardır. Elektrod çapı ile iş parçası kalınlığı arasındaki oran doğru tayin edilmelidir. Punta ve dikiş kaynağında

elektrod uç çapı  $5\sqrt{t}$ 'dir (t iş parçası kalınlığıdır). Elektrodların geometrisi ve çapı kuvvetin ve kaynak akımının kaynak arayüzünde odaklanmasına ve bir anlamda kaynak edilebilme bölgesinin konumuna etkir. İş parçasının konumlandırma ve elektrodların yönlendirme problemleri dış bükey elektrod kullanımı ile telafi edilebilir. Elektrodların malzemesinin bir noktaya kadar soğuma kabiliyeti ve kaynak arayüzünün ısı dengesine etkisi vardır [45].

#### **2.1.3.3 Sıkma ve tutma zamanı**

Kaynak öncesi sıkma zamanının kaynağın teknik özelliklerine etkisi yoktur. Kaynak akımı etkilmeden önce, uygulatılması gereken elektrod bastırma kuvvetinin ayarlanan seviyeye erişinceye kadar bu zaman değeri uzun olmalıdır. Sıkma zamanının çok kısa olması, kaynaktan erimiş metalin çıkmasına veya elektrod ile iş parçası yüzeyleri arasında kıvılcım oluşmasına neden olabilir [45].

Kaynak sonrası tutma zamanı, erimiş metalin katılaşması ve kaynağa direkt etkiyen yüklere karşı dayanmak için gereken dayanıma sahip olmasına yetecek kadar uzun olmalıdır. Bu yüzden, iş parçasının kalınlığının arttırılması ve daha uzun kaynak zamanları daha uzun tutma zamanı gerektirir. Punta kaynağında tutma zamanı için genel değer 10-50 çevrim arasındadır. Galvanize çeliklerin tutma zamanı elektrodların aşınmasını minimize edecek kadar kısa ayarlanmalıdır [45].

#### **2.1.3.4 Diğer ayarlanabilir parametreler**

Daha kalın sac lar veya kaynak edilmesi zor malzemeler için kaynak akımının darb eli halde veya ısıl işlemin kullanılması gerekebilir.

Kaynak akımının darb eli uygulanması enerji girişinin kaynağa daha iyi odaklanmasını sağlar. Bu da oldukça yüksek kaynak akımlarının kullanılmasına izin verir. Bu yöntem büyük malzeme kalınlıklarında veya farklı kalınlıktaki malzemelerde veya iyi ısıl iletkenlik özelliklerine sahip malzemelerin kaynağında kullanılabilir. Sertleşebilir malzemeler için ısıl işlem avantaj getirmektedir [45].

Aşağı ve yukarı bölgedeki (up-and downslope) kaynak akımı eğimli fonksiyon kullanımı ile ayarlanabilir. Galvanize çeliğin kaynağında, kaynak akımında yukarı eğimin



kullanılması, çinko kaplamanın kaynak bölgesinden çekilmesini sağlar. Ek olarak; alüminyumun kaynağında, eğim fonksiyonu, kaynak prosesinin başında yüksek temas direncinin zararlı etkisini önlemek için kullanılabilir. Kaynağı yapılan malzemenin kalınlığı eğimin uzunluğuna etkir. Tipik eğim uzunlukları 1-4 çevrim değerleri arasındadır [45].

#### **2.1.4 Isı Girişi**

Elektrik iletkenliğe sahip iş parçasında oluşan ısının miktarı üç faktöre bağlıdır: elektrik akımı, iş parçası direnci ve iş parçası içinden geçen akımın süresi. Isı miktarı üç faktörün kullanılması ile Joule Kanunu'na göre aşağıdaki eşitlikteki gibi hesaplanabilir:

$$Q=I^2Rt \quad (2.1)$$

Q=Oluşan ısı (joule)

I=Akım (amper)

R=İş parçasının toplam direnci (ohm)

t=Isı girişinin toplam süresi (kaynak zamanı) (saniye)

Yukarıdaki oluşan ısının bir kısmı metali eritmek ve kaynağı oluşturmak için kullanılır; bir kısmı da iş parçası ve elektrodla iletilir. Kaynak akımı ve kaynak zamanının ayarlanması ile direnç kaynağındaki ısı girişi kontrol edilebilir. İş parçasının malzemesine bağlı kendisine ait özgül direnç ve ısı iletkenlik katsayıları vardır ve bunlar değiştirilip ayarlanamaz. Fakat, kullanılan elektrod kuvveti ve iş parçalarının yüzey özellikleri (örneğin oksit tabakasının kalınlığı, temizlik ve kaplama) iş parçasının toplam direnci üzerine etkisi vardır.

#### **2.1.5 Soğuk haddelenmiş kaplanmış ve kaplanmamış çelik sacların kaynak edilebilirliği**

##### **2.1.5.1 Sacların kaynak edilebilirliği**

Düşük karbonlu soğuk haddelenmiş sacların en iyi kaynak edilebilirliğe sahip olduğu varsayılır. Bu yüzden diğer malzemelerin kaynak edilebilirliği düşük karbonlu soğuk haddelenmiş sacların kaynak edilebilirliği ile kıyaslanıp verilmektedir. En yaygın punta

kaynağı uygulanan malzemeler soğuk haddelenmiş saclardır. Sıcak haddelenmiş ve soyulmuş saclara da direnç kaynağı uygulanır fakat az miktardadır [45].

Düşük karbonlu çeliklerin ( $C \leq 0.15 \%$ ) kaynak edilebilirlik aralığı geniştir ve parametreler esnek olarak ayarlanabilir. Punta kaynağında en iyi sonuç yüksek kaynak akımı, düşük kaynak zamanı ve yüksek elektrod kuvveti ile elde edilir.

Karbon oranı, belirgin bir biçimde, farklı derecedeki sacların mekanik özelliklerini ve kaynak edilebilirliklerini etkilemektedir. Karbon oranının artması kaynak edilebilirliği düşürmektedir. Karbon oranı arttıkça kaynak zamanı arttırılmalı ve kaynak zakımı düşürülmelidir. Bu da ısı girişinin uzatıldığı anlamına gelmektedir ve kaynağın soğuması çevreleyen iş parçasının yüksek sıcaklıkları nedeniyle daha uzun sürmektedir. Yavaş soğuma kaynağın sertleşmesini düşürmektedir. Sertleşme kaynakta kırılmalara neden olabilecek gevrekliğe sebep olabilir [45].

Direnç kaynağı orta ve yüksek oranda karbon içeren çeliklere de uygulanabilir; fakat çoğunlukla ısıl işlem gereklidir. Isıl işlem kaynak prosesinde ayrı akım darbeleri veya kaynak sonrası bir ısıl işlem yöntemi ile gerçekleştirilebilir.

Karbonun yanında başka alaşım elemanları da kaynağın özelliklerine etkilemektedir. Çeliğin alaşımlandırılması hızlı soğuma ile birlikte sert ve gevrek mikroyapılara ve sıcak kırılmalar neden olabilir. Fosfor ve sülfür çeliğin direnç kaynağı özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Fosforun etkisi mangan katılımı ve mangan sülfid oluşumu ile düşürülebilir. Sülfür oranının % 0.035 oranının altında olması tavsiye edilir. % 0.05'in üzerindeki sülfür içeriği sıcak kırılmaya neden olabilir. Karbon oranı ve başka alaşım elementlerinin kaynağın sertleşebilmesi üzerine ortak etkisi Karbon Eşdeğeri'nin hesaplanması ile belirlenebilir [45].

Yüksek dayanımlı düşük alaşımlı yapı çelikleri (HSLA) alışlagelmiş olarak alaşım elemanları bakımından Titanyum, Niyobiyum ve Vanadyum içerirler. HSLA çeliklerinin kaynak edilebilirliği iyidir. Sertleşebilme yanında bir metal sacın alaşımlandırılması malzemenin özgül direncini de etkiler. Alaşımlandırma elemanları malzemenin elektrik direncini yükseltir. Bu da kaynak edilebilirlik alanında daha düşük kaynak akımı gösterimleri ile gözlemlenebilir. Yüksek dayanımlı çeliklerin kaynak edilebilirlik bölgesi

genel alaşımlandırılmamış çeliklere göre daha geniş olabilir. Yüksek dayanımlı çeliklerin kaynağında daha yüksek elektrod kuvvetleri kullanılmalıdır [45].

#### **2.1.5.2 Galvanize çelik sacların direnç kaynağı**

Çinko kaplamanın özgül ve geçiş dirençleri çeliğinkinden düşüktür. Çinko kaplama kaçak akımları yükseltir. Kaplanmamış saclara kıyasla galvanize sacların kaynağında , daha yüksek kaynak zamanları (% 20-50), daha yüksek kuvvet (%10-25) ve daha yüksek kaynak akımları kullanılmalıdır.

Kaplamasız saclarla karşılaştırıldığında, galvanize çeliklerin kaynağı kaynak parametrelerinin daha dikkatli ve doğru kontrolünü gerektirir ve kaynak edilebilirlik alanları daha dardır. Kaplama kalınlığı arttıkça kaynak edilebilirlik düşmektedir. Kaplanmış malzemelerin direnç kaynağında kaplama komşu malzemelerin birlikte bağ kurmasına ve aynı zamanda elektrod ve iş parçası arasındaki kaplamanın bozulmamış kalmasına dikkat edilmelidir. Erimiş metalde çinko kalıntılarını önlemek için birleştirilecek saclar arasındaki çinko kaplama tamamen erimelidir. Aşırı ısı girişi malzemenin elektrod temas yüzeyindeki çinko kaplamasının da erimesine neden olabilir. Bu durumda, ürünün çinko kaplaması bozulmuş ve erimiş metal elektrod uçlarında kalmış olur. Bu da elektrodların kullanım ömürlerini kısaltacaktır [45].

Galvanize saclar düz veya dışbükey elektrod uçları kullanılarak kaynak edilebilirler. Dışbükey elektrodlara daha az çinko yapışır ve uç geometrisi çinkonun temas yüzeylerinden geri çekilmesini kolaylaştırır. Bunun yanında, düz uçlu elektrodlar daha kolay temizlenebilirler. Elektrod uçlarına çinkonun yapışması sebebiyle daha kısa kaynak akımları kullanılabilir. Çinkonun elektrod uçlarına yapışma miktarı elektrod uçları ile sıcak çinko arasındaki temas süresi ile doğru orantılıdır [45].

Galvanize çeliklerin kaynağı için geçerli şartlar başka metalik kaplamalar için de geçerlidir. Kaplama malzemenin erime noktası komşu ana metalinkinden düşük olmalıdır.

### **2.1.5.3 Yapıştırılmış ve boya ile kaplanmış çeliklerin kaynağı**

Yapıştırma ve punta kaynağı belirli uygulamalarda aynı anda kullanılırlar. Genel bir punta kaynağına göre böyle bir uygulamanın avantajları yükselmiş yorulma direnci ve titreşim sönümleridir. Yapıştırılmış ve boya ile kaplanmış çelikler için iki direnç kaynağı yöntemi kullanılabilir. Boya veya yapışkan iletkenler ki bu direnç kaynağını mümkün kılar veya kaynak akımı ayrı iletkenler üzerinden dolaşırlar ve yapışkan bağlantı noktasında erir. Böylece kaynak edilecek komşu metaller arasında iletken bir temas oluşmuş olur. Yapışkan kurumadan da önce yapışkan (adezif) bağlantılar kaynağın uygulanması ile yapılabilir. Bu durumda bağlantılara gerek yoktur. Yapışkanlarla kaynaktaki elektrod kuvveti ve kaynak akımı genelde yükseltilmelidir [45].

### **2.1.6 Punta Kaynağında Kullanılan Elektrodlar**

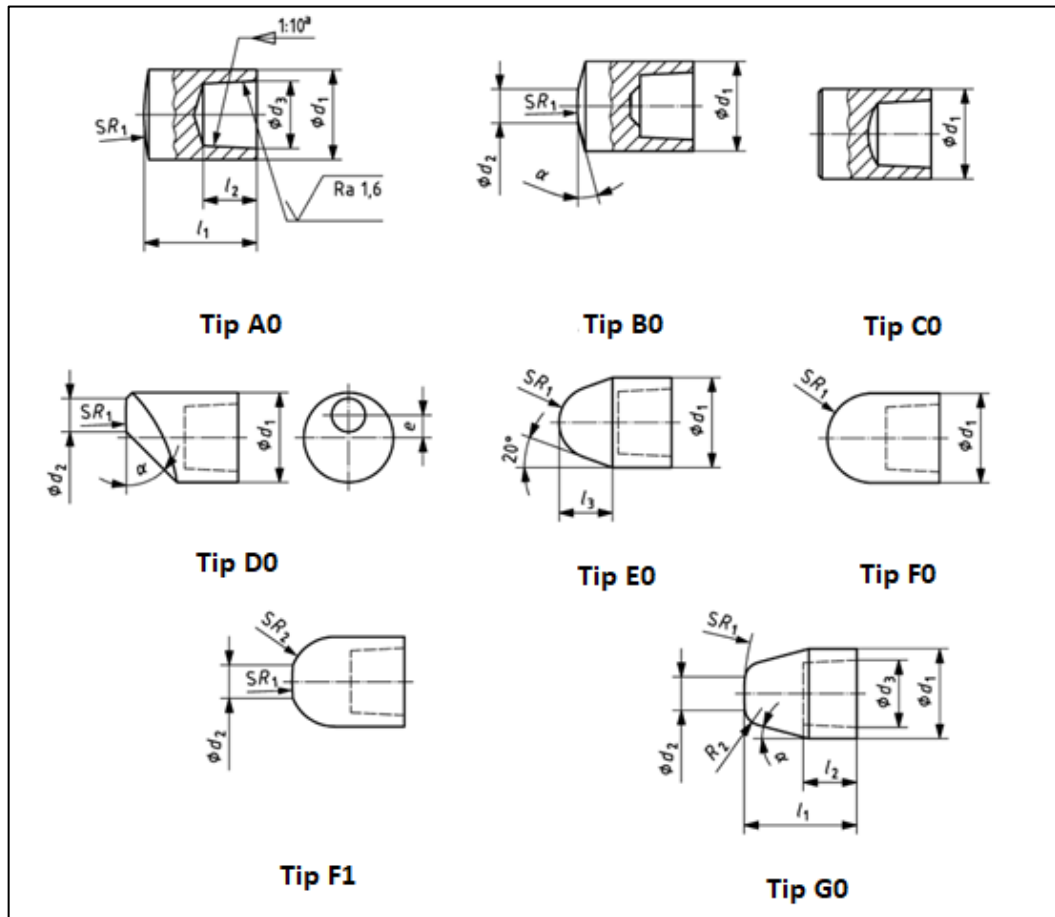
Punta kaynağında elektrodların uçları değiştirilebilir. Sahip olmaları gereken özellikler yüksek sıcaklıkta sertlik, malzeme ile düşük alaşımlaşma eğilimi, iyi elektrik ve ısı iletim kabiliyeti, yüksek dayanım, elektrod uçlarının emniyetli soğutulmasıdır [48].

Punta Kaynağında kullanılan elektrodların şekilleri en genel halde aşağıda gösterilmektedir. Her ne kadar DIN normlarında elektrodların tipleri ve bunlara ait her türlü boyut gösterilmiş olsa da üretici (örneğin Türkiye’de Albaksan) yine kendine ait standartlar ve boyutlar türetmiştir [49]. Elektrod şekil ve ölçüleri ısı iletimi ve temas direncini ve dolayısı ile punta kaynağının bütün öğelerini etkilemektedir. Elektrod malzemeleri genelde bakır ve alaşımları olup, çoğunlukla ve doktorada uygulanan elektrod malzemesi CuCrZr’dur. DIN EN ISO 5182 Standartına [50] göre bu malzeme için Cr oranı % 0,4’ten 1’e; Zr oranı ise % 0,02’den % 0,15’e kadardır. Saf bakır elektrod malzemesi olarak nadir olarak kullanılıp genelde böyle alaşımlandırılarak dayanımları arttırılmaktadır [48].

Elektrodun kaynak yapılacak saca temas bölgesi temas direncini belirleyecektir. Bu yüzden elektrod uçlarının formu ve ölçüleri büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda elektrod ölçü tabloları ve gösterimleri aşağıdaki gibidir ve DIN EN ISO 5821 Standardından [51] alınmıştır.

Çizelge 2.1. Elektrod uç ölçüleri

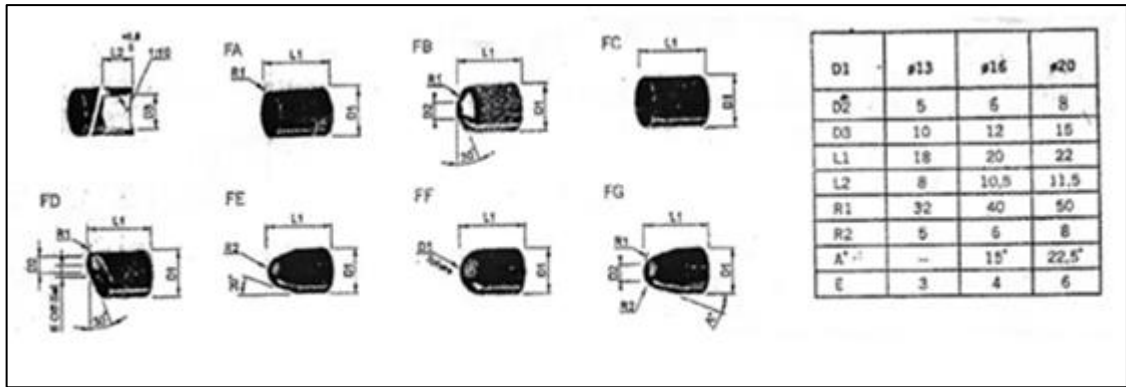
| Tip | $d_1$ | $d_2$ |     |      | $d_3$ | $l_1$ |      |      | $l_2$ | $l_3$ | $e$ | $R_1$ |     |     | $R_2$ | $\sigma$ |        |    |
|-----|-------|-------|-----|------|-------|-------|------|------|-------|-------|-----|-------|-----|-----|-------|----------|--------|----|
| A0  | 13    | —     | —   | —    | 10,0  | 18,0  | 21,0 | 24,0 | 8,5   | —     | —   | 30    | 65  | 100 | —     | —        | —      | —  |
|     | 16    | —     | —   | —    | 12,0  | 20,0  | 23,0 | 25,0 | 10,5  | —     | —   | 40    | 70  | 100 | —     | —        | —      | —  |
|     | 20    | —     | —   | —    | 15,0  | 22,0  | 25,0 | 28,0 | 12,0  | —     | —   | 50    | 75  | 100 | —     | —        | —      | —  |
| B0  | 13    | 5,0   | 6,0 | 7,0  | 10,0  | 18,0  | 21,0 | 24,0 | 8,5   | —     | —   | 30    | Düz | —   | —     | 30       | 45     | —  |
|     | 16    | 6,0   | 7,0 | 8,0  | 12,0  | 20,0  | 23,0 | 25,0 | 10,5  | —     | —   | 40    | Düz | 50  | —     | 30       | 45     | —  |
|     | 20    | 8,0   | 9,0 | 10,0 | 15,0  | 22,0  | 25,0 | 28,0 | 12,0  | —     | —   | 50    | Düz | 75  | —     | 30       | 45     | —  |
| C0  | 13    | —     | —   | —    | 10,0  | 18,0  | 21,0 | 24,0 | 8,5   | —     | —   | —     | —   | —   | —     | —        | —      | —  |
|     | 16    | —     | —   | —    | 12,0  | 20,0  | 23,0 | 25,0 | 10,5  | —     | —   | —     | —   | —   | —     | —        | —      | —  |
|     | 20    | —     | —   | —    | 15,0  | 22,0  | 25,0 | 28,0 | 12,0  | —     | —   | —     | —   | —   | —     | —        | —      | —  |
| D0  | 13    | 5,0   | —   | —    | 10,0  | 18,0  | 21,0 | 24,0 | 8,5   | —     | 3,0 | 32    | Düz | —   | —     | 30       | 45     | 60 |
|     | 16    | 6,0   | —   | —    | 12,0  | 20,0  | 23,0 | 25,0 | 10,5  | —     | 4,0 | 40    | Düz | —   | —     | 30       | 45     | 60 |
|     | 20    | 8,0   | —   | —    | 15,0  | 22,0  | 25,0 | 28,0 | 12,0  | —     | 5,0 | 50    | Düz | —   | —     | 30       | 45     | 60 |
| E0  | 13    | —     | —   | —    | 10,0  | 18,0  | 21,0 | 24,0 | 8,5   | 8,0   | —   | 5     | —   | —   | —     | 20       | —      | —  |
|     | 16    | —     | —   | —    | 12,0  | 20,0  | 23,0 | 25,0 | 10,5  | 10,5  | —   | 6     | —   | —   | —     | 20       | —      | —  |
|     | 20    | —     | —   | —    | 15,0  | 22,0  | 25,0 | 28,0 | 12,0  | 12,0  | —   | 8     | —   | —   | —     | 20       | —      | —  |
| F0  | 13    | —     | —   | —    | 10,0  | 18,0  | 21,0 | 24,0 | 8,5   | —     | —   | 6,5   | —   | —   | —     | —        | —      | —  |
|     | 16    | —     | —   | —    | 12,0  | 20,0  | 23,0 | 25,0 | 10,5  | —     | —   | 8     | —   | —   | —     | —        | —      | —  |
|     | 20    | —     | —   | —    | 15,0  | 22,0  | 25,0 | 28,0 | 12,0  | —     | —   | 10    | —   | —   | —     | —        | —      | —  |
| F1  | 13    | 5,0   | 5,5 | 6,0  | 10,0  | 18,0  | 21,0 | 24,0 | 8,5   | 6,0   | —   | 50    | 63  | Düz | 6,5   | —        | —      | —  |
|     | 16    | 5,5   | 6,5 | 8,0  | 12,0  | 20,0  | 23,0 | 25,0 | 10,5  | 7,5   | —   | 50    | 80  | Düz | 8,0   | —        | —      | —  |
|     | 20    | 6,0   | 7,0 | 8,0  | 15,0  | 22,0  | 25,0 | 28,0 | 12,0  | 9,5   | —   | 50    | 100 | Düz | 10,0  | —        | —      | —  |
| G0  | 13    | 5,0   | —   | —    | 10,0  | 18,0  | 21,0 | 24,0 | 8,5   | 10,5  | —   | 32    | —   | Düz | 5,0   | —        | 15°20' | —  |
|     | 16    | 6,0   | —   | —    | 12,0  | 20,0  | 23,0 | 25,0 | 10,5  | 12,0  | —   | 40    | —   | Düz | 6,0   | 15       | 17     | —  |
|     | 20    | 8,0   | —   | —    | 15,0  | 22,0  | 25,0 | 28,0 | 12,0  | 10,0  | —   | 50    | —   | Düz | 8,0   | 22,5     | 20     | —  |



Şekil 2.7 Elektrod Tipleri ve Boyut Gösterimleri

Örneğin doktora çalışmasında da kullanılan elektrod DIN EN ISO 5821'e [51] göre 'G0-20-22-50-8-8-22c5' tip elektroddur. Kaynak yazılımlarında ve genelde böyle gösterimler mevcuttur. Buna göre  $d_1=20$  mm;  $l_1=22$  mm;  $R_1=50$  mm;  $d_2=8$  mm;  $R_2=8$  mm ve  $\alpha=22,5^\circ$ 'dir.

Aşağıda görülmekte olan ve yurtiçinde üretim yapan Albaksan firmasının elektrodları [49] ile DIN normundakiler arasında bazı küçük farklılıklar mevcuttur. Sac parça üretimi yapan firmaların kendilerine ait normlarına göre de elektrodlar üretilmekte ve kullanılmaktadır.



Şekil 2.8 Albaksan'a göre Elektrod Tipleri ve Boyutları

### 2.1.7 Punta Kaynağında Temas Direnci, Belirlenmesi ve Önemi

Yukarıda da değinildiği gibi oluşacak enerji girdisini belirleyecek olan öge temas direncidir. Temas direncinin hesaplanması için direkt bir formül mevcut olmayıp belirlenmesi için çeşitli modeller mevcuttur. Bunlardan bazıları aşağıda verilmektedir [52], [53].

Elektrod iş parçası arayüzündeki bir punta bölgesi için bölgesel boyutsuz elektriksel temas direnci şu şekilde tanımlanabilir:

$$R_c = \frac{R_1}{\sigma} \sqrt{nH_v} + R_2 \frac{snH_v}{\sigma_f} \quad (2.2)$$

Bu eşitlikte sıkışmayı ve film dirençlerini belirleyen boyutsuz parametreler ise aşağıdaki eşitliklerle tanımlanabilir.

$$R_1 \equiv \frac{1}{2\tilde{R}_0\tilde{\sigma}_{liq}} \sqrt{\frac{\pi\tilde{H}_{v0}}{W}}, \quad R_2 \equiv \frac{\tilde{r}_0\tilde{H}_{v0}}{W\tilde{R}_0\tilde{\sigma}_{liq}} \quad (2.3)$$

$\sigma$ : Elektriksel iletkenlik

$n$ : Temas puntalarının sayısı

$H_v$ : Sertlik

$s$ : Film kalınlığı

$\sigma_f$ : Filmin elektriksel iletkenliği

$\tilde{R}_0$ :  $T_0$  sıcaklığında arayüzeyde elektriksel temas direnci

$\tilde{\sigma}_{liq}$ : Likidüsün ölçüsel elektriksel iletkenliği

$\tilde{H}_{v0}$ : Ölçüsel sertlik

$W$ : Elektrod kuvveti

$\tilde{r}_0$ : Ölçüsel elektrod yarıçapı

Temas direnci temas yüzeyleri arasındaki pürüzlülüğün veya ek bir tabakadan dolayı oluşmaktadır. Sıkışma direnci bir elektrik akımı geçtiğinde ve pürüzlülüğün temas noktalarında bir saktan diğerine geçerken ortaya çıkar. Film direnci ise temas yüzeyleri arasındaki oksit veya kir tabakasının direnci, pürüzlülüğü ve kalınlığı sebebiyle meydana gelmektedir. Temas direnci, büyüyen elektrod kuvveti, sıcaklık, galvanik erozyon ve eritici aşınmanın temas alanı ve temas noktalarını arttıracığından düşer. Elektriksel özellikler ve sertlik sıcaklık ile bağıntılı olduğu için yukarıdaki eşitliklerdeki [52], [53] elektriksel temas direnci ısı, mekanik ve elektriksel faktörler arasındaki etkileşimleri içerir.  $n_i$  temas noktası için en yukarıdaki denklem,

$$R_{ci} = \frac{R_1}{n_i \sigma} \sqrt{n H_v} + R_2 \frac{s n H_v}{n_i \sigma_f} \quad (2.4) \text{ haline gelmektedir.}$$

Tsai [54] elektriksel temas direnci için uygulanabilir bir model ortaya koymuştur:

$$R_c(T) = \rho(T) \frac{l}{A_c} = R_c(20^\circ\text{C}) \sqrt{\frac{\sigma_Y(T)}{\sigma_Y(20^\circ\text{C})}} \quad (2.5)$$

Burada  $R_c(T)$   $T$ 'deki temas direncini ve  $\sigma_Y(T)$  ise  $T$ 'deki akma gerilmesini göstermektedir.

Moshayedi [55] punta kaynağı için uygulanan fiziksel durumu iki boyutlu koordinat sisteminde en basit şekilde aşağıdaki gibi nitelendirmiştir. Oluşan hacımsal ısının hesaplanması için Joule Kanunu'na dayanan eşitlik şöyledir:

$$q = \frac{1}{R} [\nabla \phi]^2 \quad (2.6)$$

Burada q oluşan hacımsal ısı, R elektrik direnci ve  $\phi$  ise elektriksel potansiyeldir. Asıl etkin ve içsel ısı kaynağı ile geçici ısı transferini yöneten eşitlik ise şu şekildedir:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( rK \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z} \left( rK \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.7)$$

$\rho$ , c ve K sırası ile yoğunluk, özgül ısı ve ısı iletkenliktir. Bunlar ısıya bağlı büyüklüklerdir ve q değeri ise elektrik direncinin iş parçası içinde ve temas yüzeylerinde olması sebebi ile bir önceki eşitlikten alınabilir. Malzemenin termal-elastik-plastik davranışı lineer olmadığından, gerilme gerinim ilişkisi Timoshenko tarafından arttırımsal olarak şu şekilde verilmiştir:

$$\{\Delta \sigma\} = [D]\{\Delta \varepsilon\} + \{C\}\Delta T \quad (2.8)$$

Burada,  $\Delta \sigma$  ve  $\Delta \varepsilon$  sırası ile gerilme ve gerinim artımları;  $\Delta T$  ise sıcaklık artımıdır. D elastike ve plastik katılık matrisi ve C ise malzeme sabitleri olan termal katılık vektörüdür.

Punta kaynağında direnci incelerken en basit olarak bir iletken tel üzerinden geçen elektrik akımının yarattığı direnç incelenmelidir.

$$R = (\rho l) / A \quad (2.9)$$

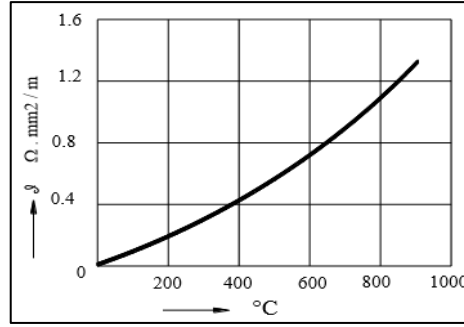
$\rho$ =malzemenin özgül direnci ( $\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$ )

l =ileticinin uzunluğu (m)

A=ileticinin kesiti ( $\text{mm}^2$ )

Sıcaklığın büyümesi ile metalsel malzemelerin özgül dirençleri büyümektedir (Şekil 2.9) [48].





Şekil 2.9 Saf demirin özgül direncinin değişim gösterimi

$$\rho_t = \rho_o [ 1 + \alpha ( t-20 ) ] \quad (2.10)$$

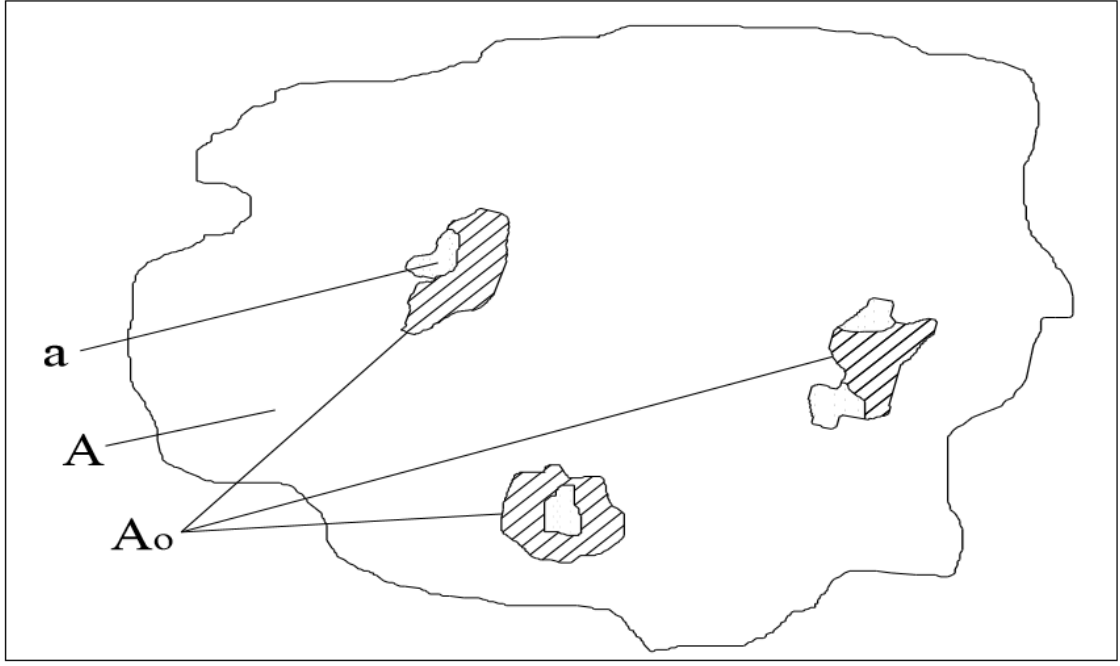
$\rho_t = t C'$  de özgül direnç (  $\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$  )

$\rho_o$  = oda sıcaklığında özgül direnç (  $\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$  )

$\alpha$  = sıcaklık katsayısı (  $1 / ^\circ\text{C}$  )

Örneğin bakırın özgül direnci  $0.0178 (\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m})$  sıcaklık katsayısı ise  $3.9 \cdot 10^{-5} (1 / ^\circ\text{C})$ 'dir.

İki malzeme kaynak edilirken elektrod kuvveti temas noktaları ve temas alanı boyutu değişmektedir. Çünkü bu sırada da pürüzlerin plastik veya elastik değişimleri meydana gelmektedir. Burada temas yüzeyi  $A_0$ , temas yüzeyi olarak bilinen  $A'$ 'dan küçüktür. Bu temas yüzeyleri değişik şekillerde dağılmışlardır.  $A_0$ 'da da her noktadan akım geçmediği (örneğin bir kısmı bir tabaka ile kaplı olabilir) için akım geçen her bir yüzey  $a$  ile tanımlanabilir. Aşağıdaki şekil bu modeli göstermektedir [48].



Şekil 2.10 Nokta direnç kaynağında temas yüzeyleri

A: görülen temas yüzeyi; Ao: gerçek temas yüzeyi; a: başlangıç akım geçiş yüzeyleri

Temas direncinin incelenmesinde, dış zarf direnci ( $R_h$ ) ve akım geçen boğaz direnci ( $R_e$ ) var oluşu dikkate alınarak, toplam temas direnci;  $R_k = R_h + R_e$  olarak yazılabilmektedir.

Dış zarf direnci temas yüzeyi üzerindeki oksit yağ gibi yabancı tabakaların neden olduğu dirençtir ve gerçek temas noktalarının büyüklükleri tarafından belirlenirler. A yüzeyi içinden ve bu sırada belli noktalardan ve akım yolunun büzülmesi ile geçebilen akımdan kaynaklanan direnç boğaz direnci olarak adlandırılabilir.

Temas direnci p Bay ve Wanheim'ın modeli ile de hesaplanabilir [16]. Bu modelde kaba yüzeyler arasındaki gerçek temas alanını belirlemek için yüzey pürüzlülüklerinin plastik deformasyonu hesaba katılmaktadır.

$$\rho_{contact} = 3 \left( \frac{\sigma_{soft}}{\sigma_n} \right) \left( \frac{\rho_1}{\rho_2} \right) + \rho_{contaminant} \quad (2.11)$$

Bu denklemde,  $\sigma_{soft}$  daha yumuşak metalin akma dayanımı,  $\sigma_n$  arayüzeydeki temas basıncı (dik basınç),  $\rho_1$  ve  $\rho_2$  metallerin kendi malzeme dirençleri ve  $\rho_{contaminant}$  (atık) ise yüzeyde bulunan oksit, su buharı ve yağ gibi öğelerin direncidir. Bütün yüzeylerde olduğu ve belirli malzemeler için belirli zaman periyodlarında toplam temas direncine önemli katkı sağladığı için bu yüzey kirliliği için bir terim bulundurmak gereklidir.

Benzer olarak, ara yüzeylerdeki temas ısı iletkenliği  $k_{contact}$  (temas) de şu şekilde belirlenebilir:

$$k_{contact} = \frac{1}{3} \left( \frac{\sigma_n}{\sigma_{soft}} \right) \left( \frac{k_1 + k_2}{2} \right) \quad (2.12)$$

Vogler ve Sheppard başka bir modelde elektrik temasını sağlayan yüzey pürüzlölüklerini göz önüne almışlardır. Bu model temas direncini temasta olan sacların hem yüzey hem de malzemesel özelliklerine bağlamaktadır [16].

$$R_{CA} = (\rho_1 + \rho_2) \left( \frac{1}{4\eta a} + \frac{3\pi}{32\eta l} \right) \quad (2.13)$$

Bu modelde,  $\rho_1$  ve  $\rho_2$  temastaki metallerin malzemesel dirençleri,  $\eta$  temastaki pürüzlölüklerin yoğunluk numarası,  $a$  temas halindeki pürüzlölüklerin ortalama yarıçapı ve  $2l$  ise pürüzlerin arasındaki düzlem içindeki ortalama mesafedir. Bu modeli nokta direnç kaynağında kullanmak için yüzey pürüzlölüğüne bağlı büyüklükler zaman ve basıncın fonksiyonu olarak karakterize edilmelidir [16]. Doktora çalışmasında kullanılan Simufact.Welding yazılımında da Bay ve Wanheim'ın temas direnci modeli hesaplamalarda esas alınmıştır.

Direnç nokta kaynağında temas direnci için daha başka çeşitli sunulan ilişkiler ve çalışmalar mevcuttur (örneğin: Eryürek [56]).

## **2.1.8 Punta Kaynağında Muayene Yöntemleri**

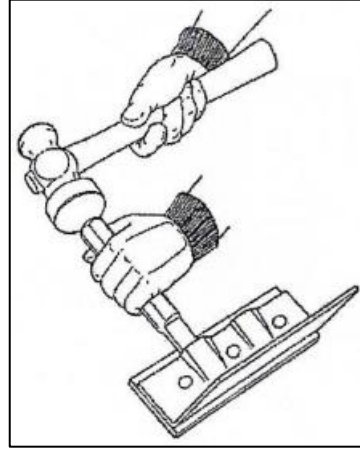
### **2.1.8.1 Tahrifatlı Muayene**

Tez çalışmasında amaçlanan distorsiyonlar sağlanırken, bir taraftan da mukavemetten ödün vermemek gerekmektedir. Bunu için de, gerekli mukavemet değerlerini ortaya koyabilen kaynak parametreleri dikkate alınmaktadır. Söz konusu denetimi sağlayabilmek için aşağıdaki testler yapılmıştır.

Kalite ve kaynak edilebilirlik testlerinin büyük bir bölümünün kalite takibi için montaj hatlarında yapıldığı görölmektedir [16]. Görsel olarak punta noktalarının büyüklüğünü ve mekanik özelliklerini muayene etmek zordur. Büyüklüğü tespit etmek için en kolay yöntem bağlantıyı koparmak ve kaynak çapını ölçmektir [45].

### Keski (Chisel) Testi

Keski testi, kaynaklı yapılarda punta noktalarının sünekliğini ölçmek için kullanılır. Amaç kaynak içermeyen kırılğan (soğuk) kaynakları belirlemektir. Kaynak çekirdek çapı bağlantı açıldığında belirlenebilir. Keski kenarı kaynağın arasına vurduğunda, operatör kaynağın kırılğan olup olmadığını hissedebilir veya duyabilir. Test ve sonuçları yorumlama özellikle tecrübe ve yeteneğe bağlı olduğu için böyle testleri yürütmek için genelde bu işte özel personele ihtiyaç vardır. Keski testinde tekrarlanabilirlik çok düşüktür. Eğer daha ağır kaynaklı sac parçalar için test uygulanacak ise otomatize keski testi kullanılır [16].

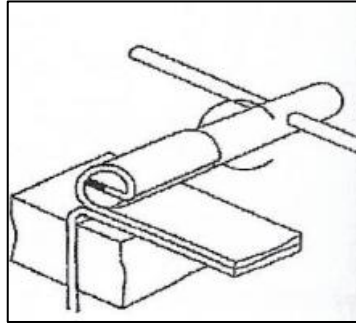


Şekil 2.11 Keski testi

### Soyma Testi

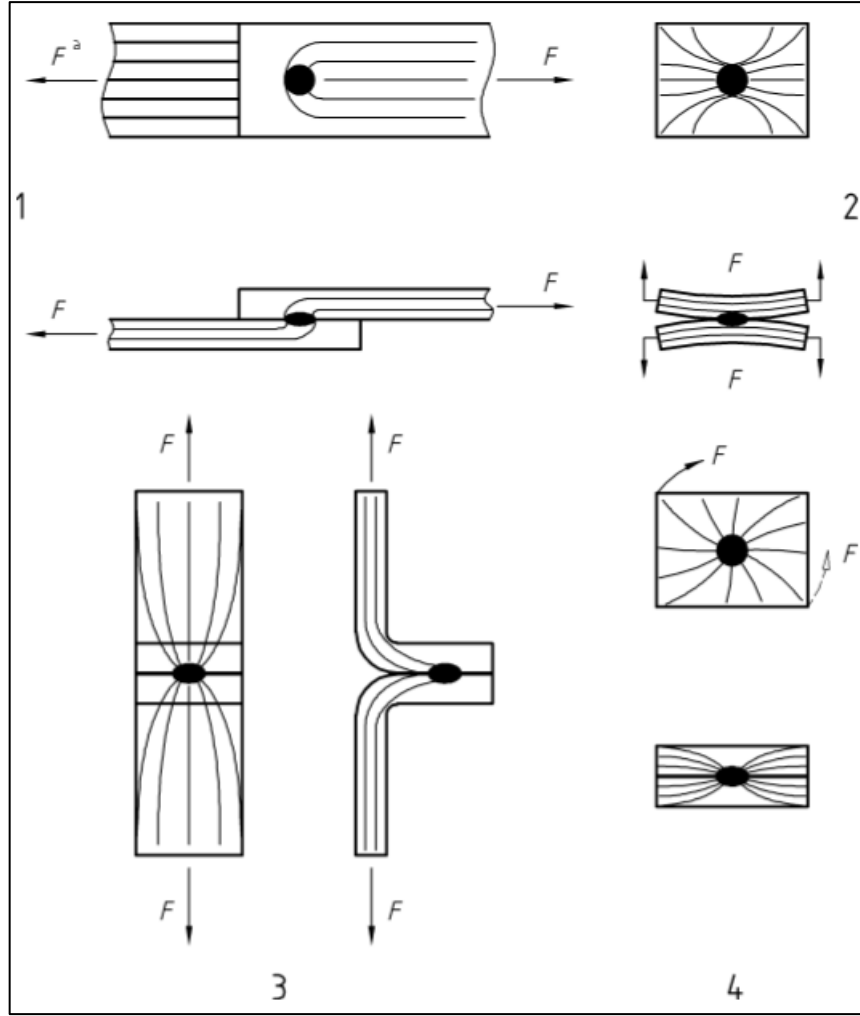
Soyma testi bir el aleti ile yapılabilecek basit bir atelye testidir. Büyük miktarda saclara uygulanabilir. Testte, saclar önce bir bindirme kaynağının bir ucundan ayrılırlar; daha sonra bir sac diğeri genelde bir mengene ile sabitlenmişken bir silindir üzerinden sarılır. Silindir kaynağın üzerinden sarılırken; eğer kaynak sünek ise, bir iş parçası kaynaktan kopar ve kaynak düğmesi bir saca kalır; eğer kaynak kırılğan ise fazla efor harcamadan saclar kolayca ayrılır. Kaynak aralıkları veya Şönt Efektı gibi konuları ele alan çalışmalarda birden çok kaynaklı numunelerde numune genellikle tek kaynak içerecek şekilde parçalara kesilir ve böyle test edilir. Tabii bu işe uyarlanmış makinalar ile kaynaklar kesmeden de sırayla soyulabilir. Düzensiz şekilli kaynak düğmelerinin ölçümünde ve özellikle asıl metalin bir kısmı düğmede kaldı ise dikkat edilmelidir [16].

Soyma testi, keski testindeki gibi yapılar üzerinde değil de kuponlar üzerinden yürütülür. Keski testine benzer, soyma testi de tecrübeye dayalıdır. Genel olarak, test işlemi, soyulan düğmenin biçimini ve dolayısı ile ölçümü direkt etkilemektedir. Fakat soyma testi; bazen asıl metalin dayanımı numunenin soyulması için çok yüksekse, örneğin plastik olarak şekil değiştirmek veya bir silindir etrafında sarılmak için çok yüksek akma dayanımına sahip geliştirilmiş yüksek dayanımlı çelik sacların kaynağında kuponlar üzerinde bile kullanılamaz [16].



Şekil 2.12 Soyma testi

ISO 14329'a göre tahribatlı muayenede değişik yüklenme durumlarının sebep olduğu gerilme dağılımı aşağıdaki şekilde gösterilmektedir [56].



- 1: Sıyırma testi
- 2: Çekme testi
- 3: Soyma testi
- 4: Burulma testi

Şekil 2.13 Tahribatlı muayenede gerilme dağılımları

### Sıyırma Testi

Sıyırma testinin amacı, numunenin taşıyabileceği sıyırma (kesme) kuvvetini belirlemektir. Normal çekme testi ve şekilde gözüktüğü gibi iki sacın uçları çenelerle tutturulup çekilirler. Numunelerin şekilleri ve boyutları aşağıdaki gibidir [58].

| Kalınlık<br>$t$<br>mm | Binme<br>$a$<br>mm | Numune<br>Eni<br>$b$<br>mm | Numune<br>boyu<br>$l_s$<br>mm | Kelepçe mesafesi<br>$l_f$<br>mm | Numune tekil<br>uzunluğu<br>$l_t$<br>mm |
|-----------------------|--------------------|----------------------------|-------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------|
| $0,5 \leq t \leq 1,5$ | 35                 | 45 (30)                    | 175                           | 95                              | 105                                     |
| $1,5 < t \leq 3$      | 45                 | 60 (30)                    | 230                           | 105                             | 138                                     |
| $3 < t \leq 5$        | 60                 | 90 (55)                    | 260                           | 120                             | 160                                     |
| $5 < t \leq 7,5$      | 80                 | 120 (80)                   | 300                           | 140                             | 190                                     |
| $7,5 < t \leq 10$     | 100                | 150 (100)                  | 320                           | 160                             | 210                                     |

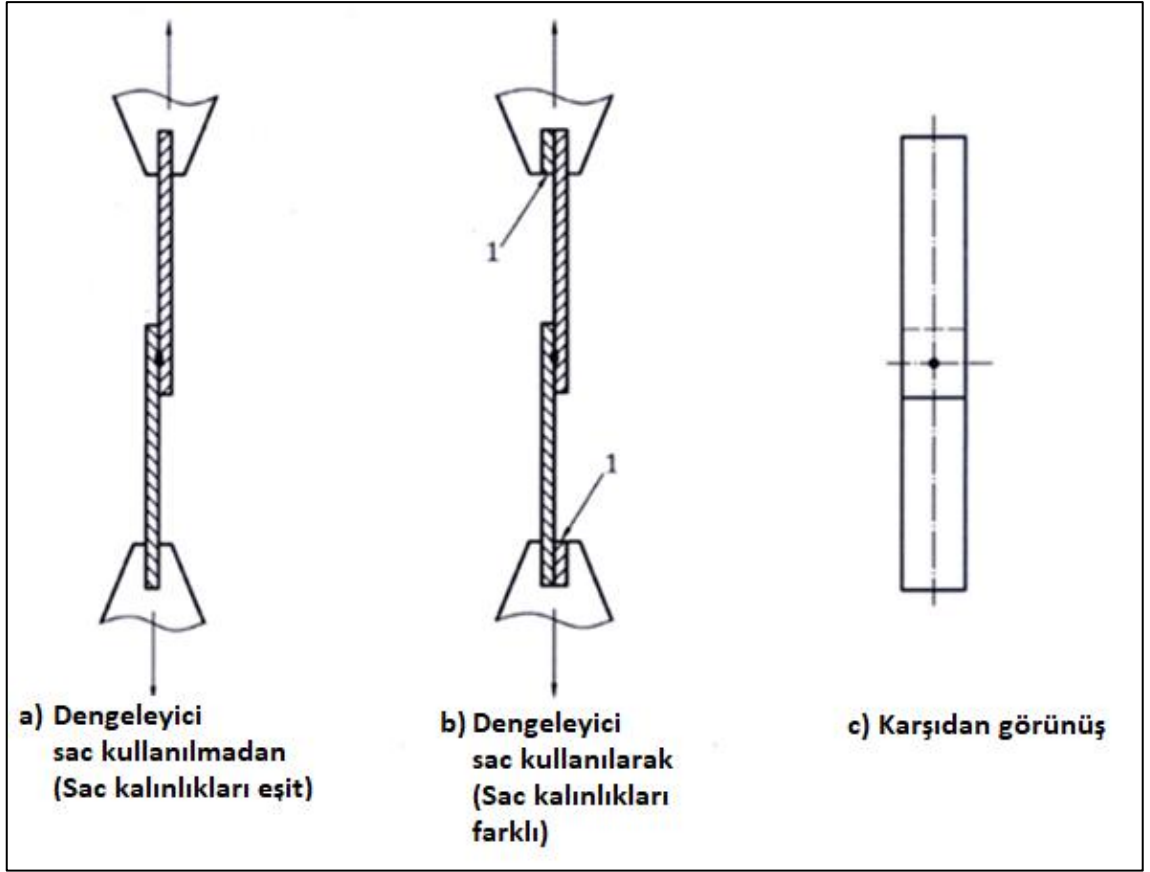
1: Çekme Yönü

2: Kaynak bağlantısı

3: Çenelerin bağlandığı çekme bölgesi

Şekil 2.14 Sıyırma testi numune ve boyutları

Sac kalınlığı 3 mm'yi geçerse veya iki sac kalınlığının oranı 1,4'ten büyük olursa çenelere tutturma bölgesinde dengeleyici sac parçalar kullanılır. Şekil 2.15'te görüldüğü gibi dengeleyici sacın kalınlığı numunenin kalınlığı ile aynı olmalıdır.



1: Dengeleyici Sac

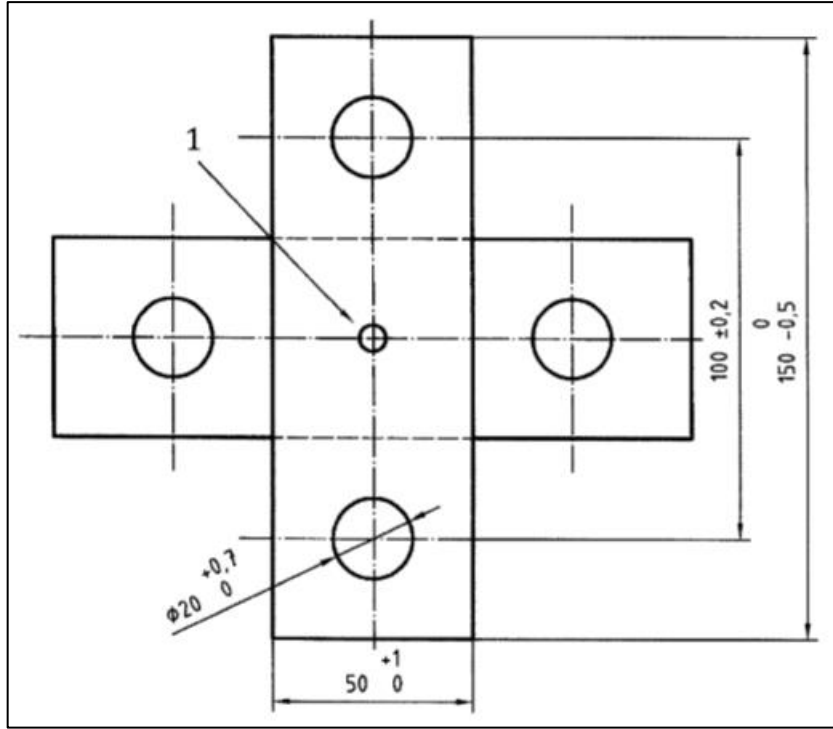
Şekil 2.15 Sıyırma testinde dengeleyici sac kullanımı

### Çekme Testi

Çekme testinin amacı, numunenin taşıyabileceği çekme kuvvetini belirlemektir. Normal çekme testi ve şekilde gözüktüğü gibi iki sacın uçları çenelerle tutturulup çekilirler. Numuneler için boyut örneği ve şekilleri aşağıdaki gibidir. Burada saclar birbirine dik halde tutulup kaynak edilirler. Saclar çekilmeden önce bükülerek çeneler tarafından çekmeye uygun hale getirilmelidirler. Aşağıdaki şekildeki delikler sacları kaynak sırasında bağlamak içindir; uygulanmaları şart değildir [59].

Yukarıdaki testlere paralel, bükme ve burulma testleri de punta kaynağı bağlantısı içeren parça gruplarına uygulanabilir.



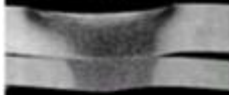
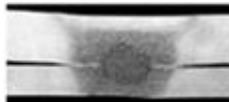
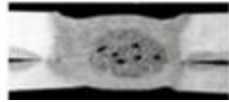


1: Kaynak Bağlantısı

Şekil 2.16 Çekme Testi numune ve boyutları

#### 2.1.8.2 Tahribatsız Muayene

Tahribatsız muayeneyi açıklamaya geçmeden önce bu yöntemle elde edilebilecek olası sonuçları göstermek gerekecektir [60].

| Kaynağın Durumu                                                | Görünümü                                                                            |                                                                                                                 |
|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Uygun Kaynak                                                   |    |                                                                                                                 |
| Yanmış Kaynak<br>(Yüzeye taşma)                                |    | Yüksek ve çok uzun süreli kaynak akımı uygulaması, ilk direncin büyük olması                                    |
| Yapışma kaynağı<br>(Çok küçük ergime bölgesi)                  |    | Yetersiz ve zayıf akım kontrolü, kaplamaya bağlı olarak çok düşük yüzey direnci, aşırı baskı kuvveti            |
| Kaynak kaybedilmiş<br>(Hiçbir bağlantı noktası yok)            |   | Yukarıdaki sebepler ile                                                                                         |
| Kaynak yetersiz boyutta<br>(Ergiyik yeterli ölçüde yayılmamış) |  | Yetersiz enerji, yetersiz süreli darbe, aşınmış elektrod, içerikte yabancı madde                                |
| Kaynak hataları<br>(Porozite, inklüzyon, çatlak vb.)           |  | Çok yüksek akım, yetersiz süreli akım darbesi, aşınmış elektrod, içerikte yabancı madde, yetersiz baskı kuvveti |

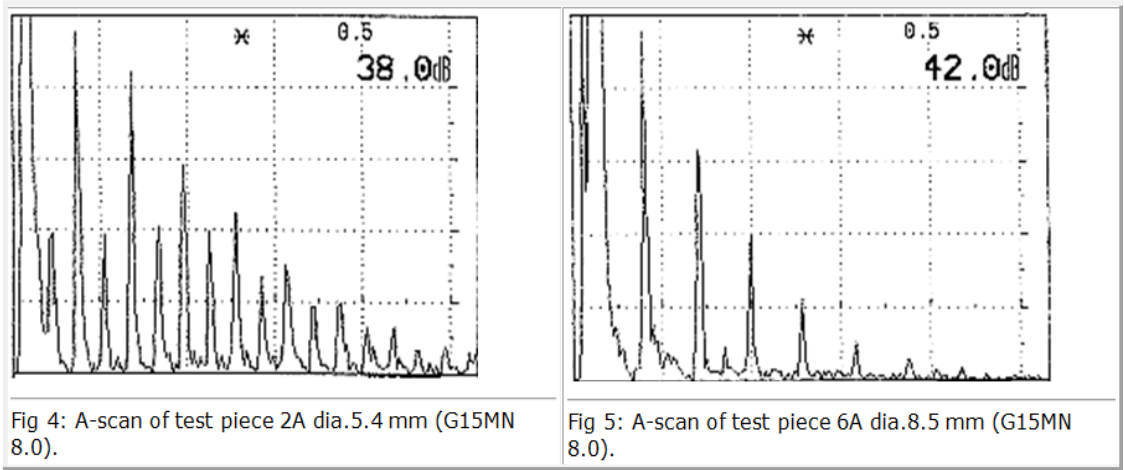
Şekil 2.17 Olası Tahribatsız Muayene Sonuçları

Tahribatlı testte kaynak yapılan birleştirilmiş parçalar kaynak çekirdeğinin varlığını belirlemek için birbirlerinden ayrıldıkları ve işlemin yeniden üretilebilir olamamasından dolayı araştırmacılar punta kaynağı için 1967'den beri tahribatsız muayene yöntemleri araştırmalarına gitmişlerdir. Tahribatsız muayene yöntemleri içinden görsel muayene, radyografik test, dinamik direnç testi, akustik emisyon testleri ve değişik ultrasonik teknikleri sayılabilir [61].

## Ultrasonik Muayene ve Sonuç Yorumları

Yöntem ultrasonik ses dalgalarının punta bölgesine iletilmesi ile uygulanmaktadır. Örneğin nokta kaynağı küçük ise ultrasonik test ekranında ikincil ekolar görülmektedir. Zaten bu yöntem çoklu eko tekniği (multiple pulse echo technique) olarak da adlandırılmaktadır. Kaynak çekirdeğinin yaklaşık üç boyutlu büyüklüğü dalgaları geçirme zamanı ve ekoların zayıflamasıyla belirlenebilmektedir.

Kaynak çekirdeği belirlenmesi: Kaynak bölgesinin büyüklüğü, punta kaynağı kalitesi ve dayanımını belirlemek için en önemli parametrelerdendir. Çekirdek çapını direkt ölçmek çok zor olsa da, büyüklüğü dikkatli seçilmiş referans örnekleri yardımıyla tek sac üzerinden dönen ikincil ekoların yüksekliklerinin karşılaştırılması ile bulunabilir. Şekil 2.18 sırası ile küçük ve büyük çekirdek çapları için ekolar arasındaki farkı göstermektedir [61].



Şekil 2.18 Küçük ve büyük çekirdek çapları için UT sonuçları

Penetrasyon: Punta kaynak kalitesinin belirlenmesinde ikinci önemli faktör penetrasyonun derecesidir. Çekirdek kalınlığı test parçalarının ve referans örneklerinin zayıflama karakteristikleri tahmin edilebilir. Çekirdek kalınlaştıkça zayıflama artacaktır. Zayıflama farkları çift sac kalınlığına karşılık gelen eko yüksekliklerinin zayıflama oranından görülebilir. Şekil 2.19 değişik çekirdek kalınlıklarına sahip üç punta kaynağının sonuçlarını göstermektedir [61].

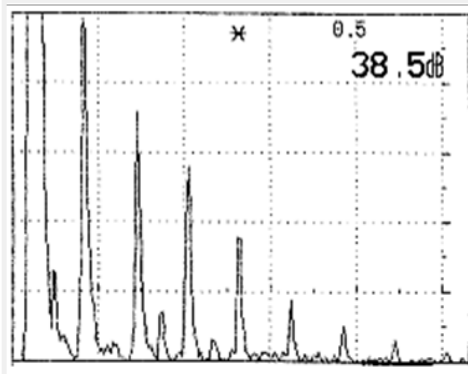


Fig 6: A-scan of test piece 4A(G15MN 8.0).

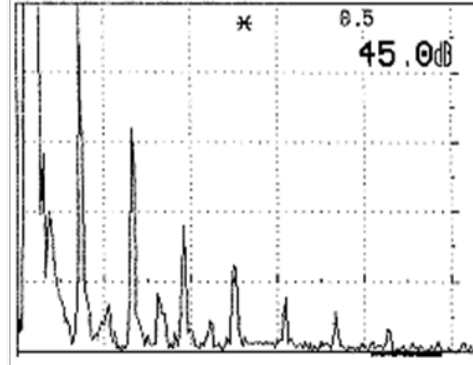


Fig 7: A-scan of test piece 9B(G15MN 8.0).

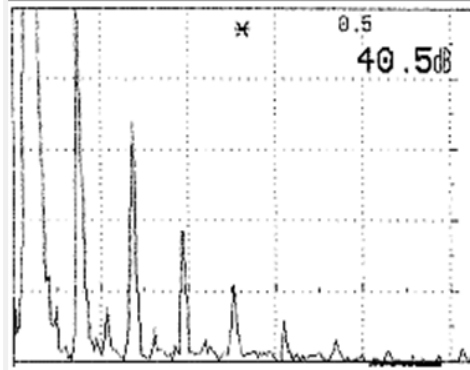


Fig 8: A-scan of test piece 10E(G15MN 8.0).

Şekil 2.19 Değişik çekirdek kalınlıkları için UT sonuçları

İç Düzensizlikler: Boşluk, porozite , iç çatlaklar ve katışıklar gibi iç düzensizlikleri belirlemek için en çok kullanılan tahribatsız muayene yöntemi radyografik muayenedir. Ultrasonik çoklu eko tekniği de çatlaklar dışındaki iç düzensizliklerin belirlenmesinde çok tatmin edici sonuçlar vermektedir. Şekil 2.20'de gözeneklilik içeren küçük kaynak çekirdeklerinin ultrasonik test sonuçları görülmektedir [61].

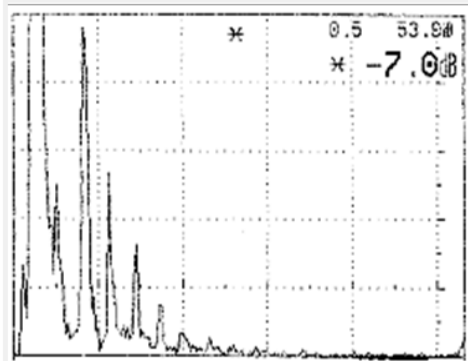


Fig 9: A-scan of test piece D42 (G15MN 8.0).

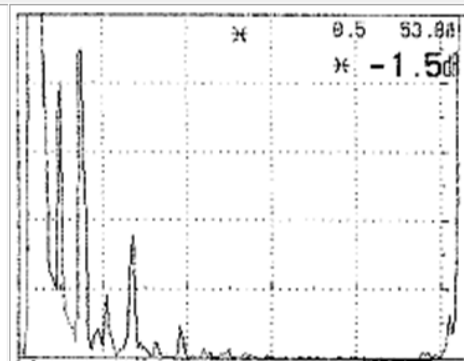


Fig 10: A-scan of test piece D42 (G15MN 3.6).

Şekil 2.20 Gözeneklilik içeren küçük kaynak çekirdekleri için UT sonuçları

Dışarı Taşma (çıkma): Dışarı taşma ultrasonik çoklu eko tekniği ile belirlenebilen başka bir hata türüdür. Belirleme işlemi iç düzensizlikleri belirlemek için kullanılan işleme benzerdir. Fakat, büyük miktarda metal kaynak işlemi esnasında erimiş kaynak havuzundan çıktığı için boşluk çok daha büyük ve boşluğun iç yüzeyi çok daha düzensiz bir yapıya sahiptir. Bu büyüklük farkı ve düzensizlik, operatöre dışarı taşmayı iç bozuluktan ayırma konusunda yardımcı olur. Boşluğun büyüklüğü ve düzensizliği ultrasonik dalgaları dağıtmakta ve uzun eko serilerinin oluşmasını engellemektedir. Şekil 2.21’de görüldüğü gibi, dışarı taşma içeren bir punta kaynağı sadece bir veya iki eko sonucu vermektedir [61].

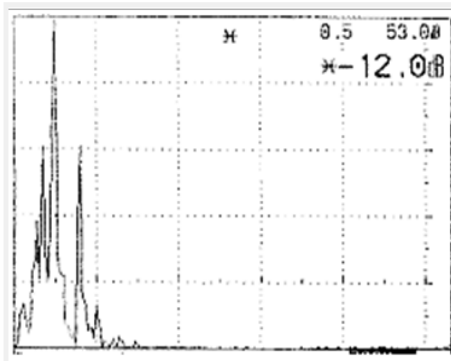


Fig 11: A-scan of test piece D37 (G15MN 8.0).

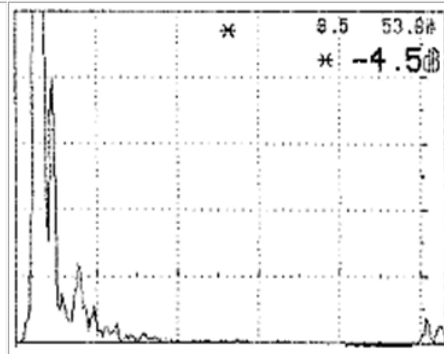
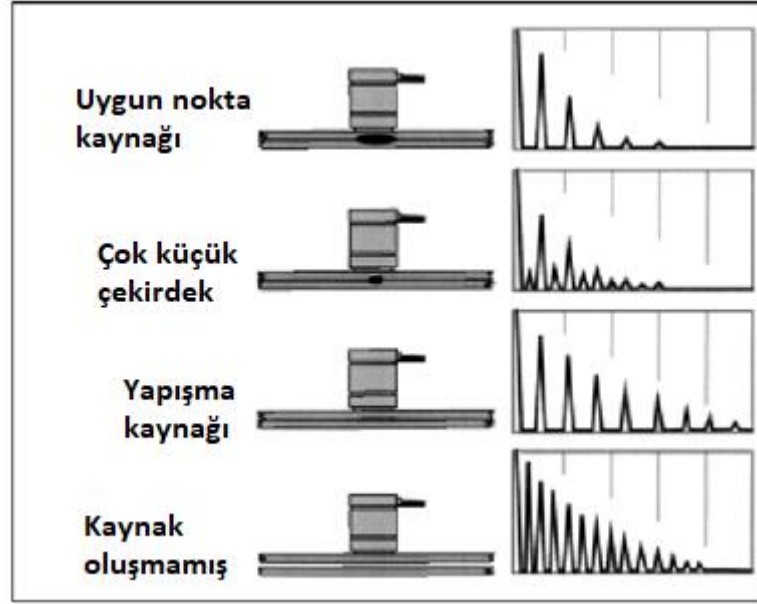


Fig 12: A-scan of test piece D37 (G15MN 3.6).

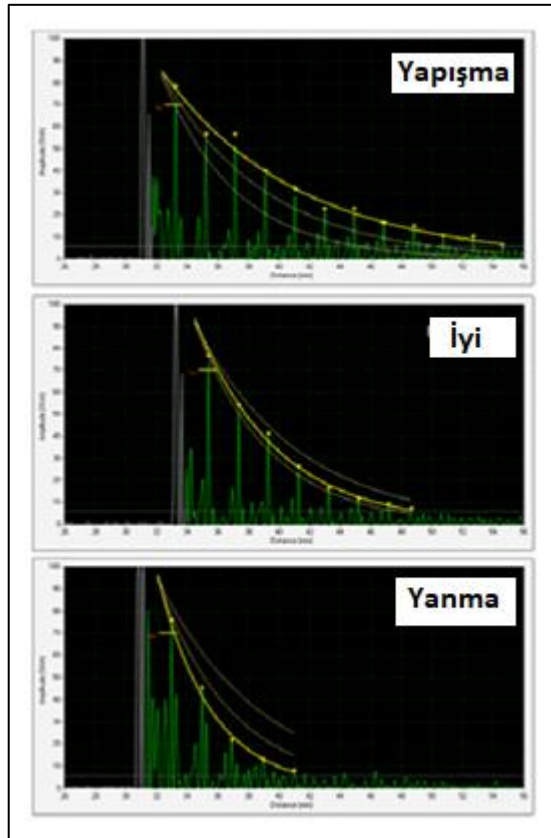
#### Şekil 2.21 Dışarı taşma içeren punta kaynağı için UT sonuçları

Aşağıda yukarıda gösterilen ve açıklanan ultrason sonuçlarının genel özet şeması verilmektedir [62].



Şekil 2.22 Kaynak tipleri için UT sonuçları

Yukarıda şematik gösterimi yapılan ultrasonik test sonuçları aşağıda bütün ekolarla birlikte daha gerçekçi gösterilmektedir [60].

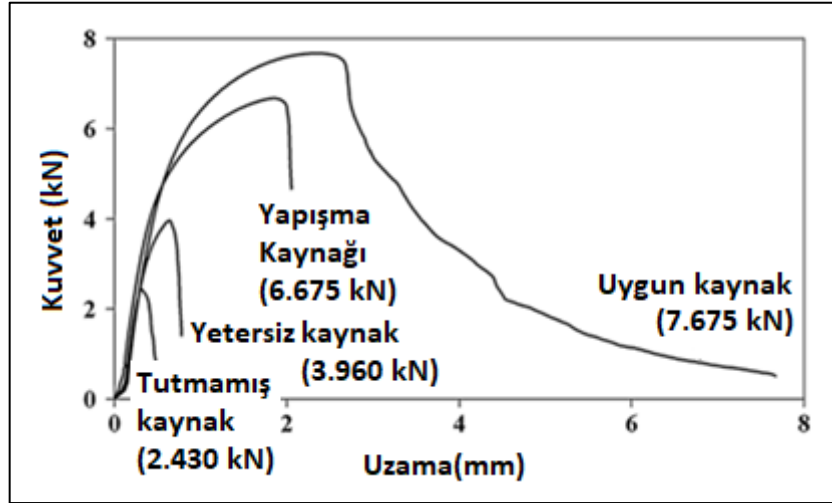


Şekil 2.23 Çeşitli eko dağılımları

Yukarıda tipik gösterimi verilen eko dağılımları şu öğelerden oluşmaktadır [55]:

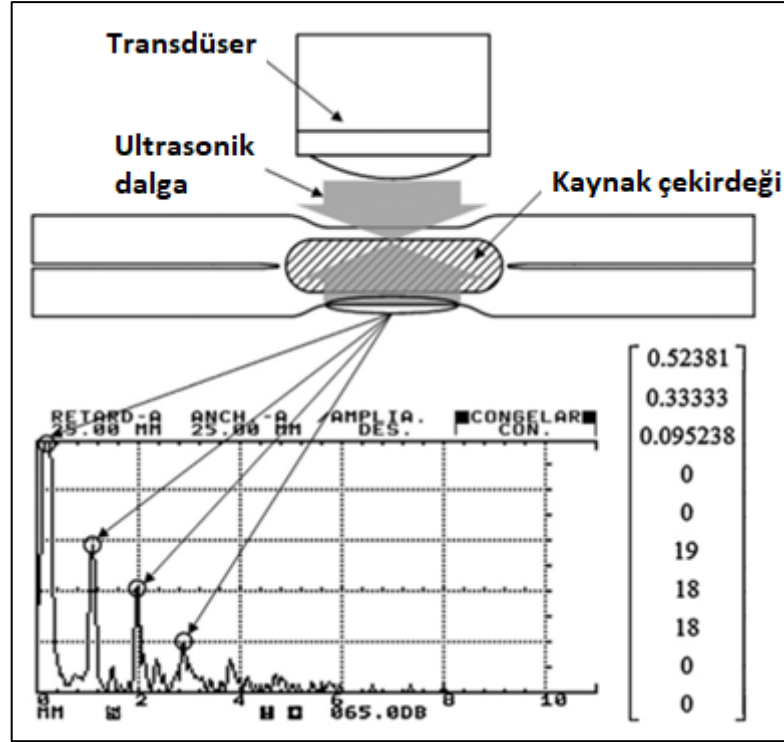
1. Kaynak kalınlığı içinden geçen küçülen çoklu birincil ekolar
2. Kaynak çekirdeğinin ses alanından küçük olması sebebiyle oluşmuş ‘Napolyon Şapkası’ olarak adlandırılan ekolar
3. Eğer kaynak çekirdeği içinde bir hata varsa küçülen arada meydana gelen ekolar

Punta kaynağı tip sonuçlarının mekanik dayanımları aşağıda gösterilmektedir. Yüke karşı uzama ile birlikte çekme testinden elde edilen yük taşıma kapasiteleri verilmektedir [58].



Şekil 2.24 Çeşitli kaynak sonuçlarının yük taşıma kapasiteleri

Şekil 2.25'te iyi bir kaynak için ultrasonik dalga yansıması verilmektedir.



Şekil 2.25 İyi bir kaynak için ultrasonik dalga yansıması

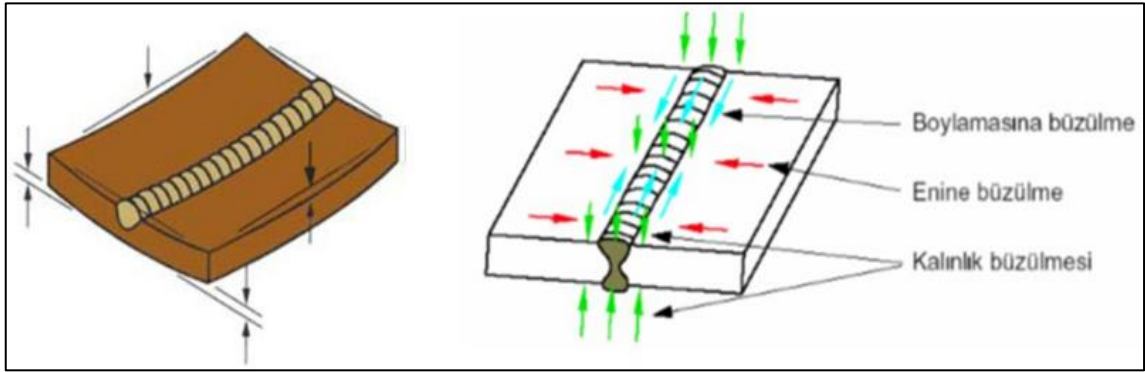
Ultrasonik muayene yöntemleri dışında başka tahribatsız muayene yöntemleri de araştırılmaya devam edilmektedir. Örneğin kaynak yapılmış parçalar kaynaktan sonra mıknatıslandırılarak kalan artık mıknatıslanma ile kaynak bölgeleri belirlenebilmektedir [64].

#### 2.1.9 Kaynakta Distorsiyon

Kaynakta en fazla ısının olduğu ergitme kaynağında kalıntı gerilmeler belirgin şekilde oluşmaktadır. Dolayısıyla kaynak sonrası distorsiyonlar da en çok bu tip kaynak çeşitlerinde meydana gelir. Kalıntı kaynak gerilmeleri kaynak yapılan parçalardaki ısı kamasında meydana gelen hızlı ısınma ve soğumalar sonucu ortaya çıkan ısıl genleşme ve büzülme ile oluşmaktadır. Aynı zamanda kaynak banyosu sürekli yer değiştirmektedir. İşlem bir uçtan diğer uca doğru ilerlerken bir yerde katılma başlamakta, bunun hemen yanındaki bölgede de aşırı ısınma ve genleşmeler olmaktadır. Henüz kaynak yapılmamış diğer bölgeler ise oldukça soğuk kalmaktadır. Dolayısıyla, ısınma ve soğuma farklı zamanlarda gerçekleşmektedir. Bu olayın sonucu kalıntı çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Bunlar da distorsiyonlara neden olmaktadır



[65]. Tabii ki punta kaynağındaki distorsiyonlar dikiş kaynağındaki kadar büyük değildir.



Şekil 2.26 Kaynak sonrası distorsiyon tipleri

Kaynak sırasında oluşan boyutsal değişimler üstteki şekilde gösterilmektedir. Bu değişimlerin üç temel unsuru düz kaynaklı bir plaka için aşağıda verilmektedir [66]:

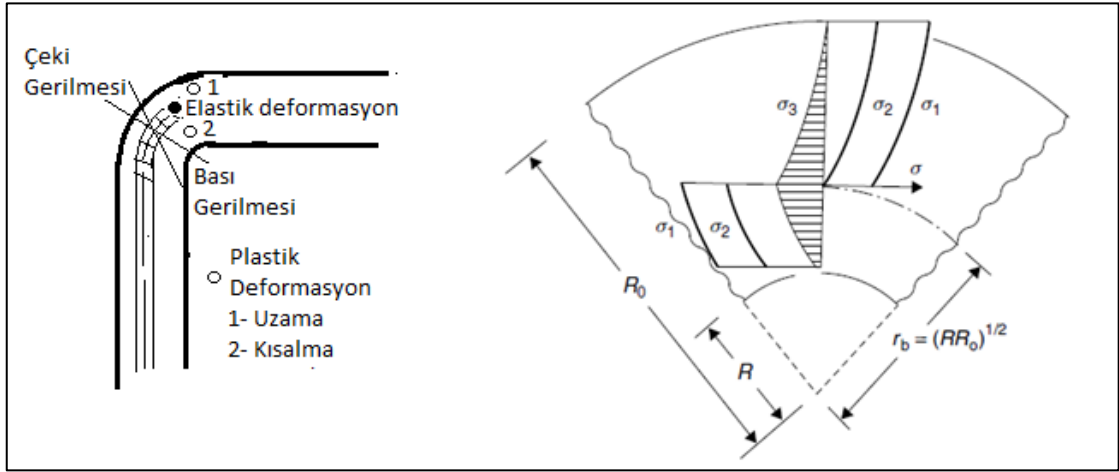
- Enine büzülme
- Boyuna büzülme
- Açısal distorsiyon (kaynak çizgisi etrafında dönme)

Daha detaylı bir bakış açısı ile bu kaynak deformasyonları şu şekilde de sınıflandırılabilirler [66]:

- Enine büzülme - kaynak merkez çizgisine dik büzülme
- Boyuna büzülme – kaynak çizgisi yönünde büzülme
- Açısal distorsiyon – Kalınlık boyunca üniform olmayan ısı dağılımı nedeni ile oluşan distorsiyon
- Rotasyonel (dönel) distorsiyon – ısı genleşme veya daralma nedeni ile plaka düzlemindeki açısal distorsiyon
- Eğilme distorsiyonu – kaynak dikişi boyunca ve plakaya dik düzlemdeki distorsiyon
- Burulma distorsiyonu – Özellikle plakalar ince olduğunda karasızlığa yol açan bası gerilmeler nedeni ile ortaya çıkan distorsiyon

## 2.2 Geri Esneme

Kalıcı(Plastik) deformasyonların öncesinde elastik alandan geçilmesi gerekmekte ve şekil değiştirmeye uğrayan malzeme bir miktar da elastik şekil değiştirme enerjisini(Rezilyans) depolamış olmaktadır. Şekillendirmenin sonunda, deformasyonun kısmi geri dönüşü ile söz konusu elastik enerji payı da sıfırlanmış olmaktadır. Fakat bu geri dönüşler sac parçalarda ölçü ve biçim sapmalarına yol açmaktadır. Özellikle hafifletme projelerinin gerektirdiği yüksek mukavemetli sacların kullanımında geri esneme sorunu daha da büyümektedir. Şekillendirme işleminin sonunda, sac parça üzerindeki kuvvet etkisi kalktıktan sonra elastik gerilmelerin geri dönüşü ile eğrilik yarıçapı genişleyerek geri esneme olayını meydana getirmektedir.



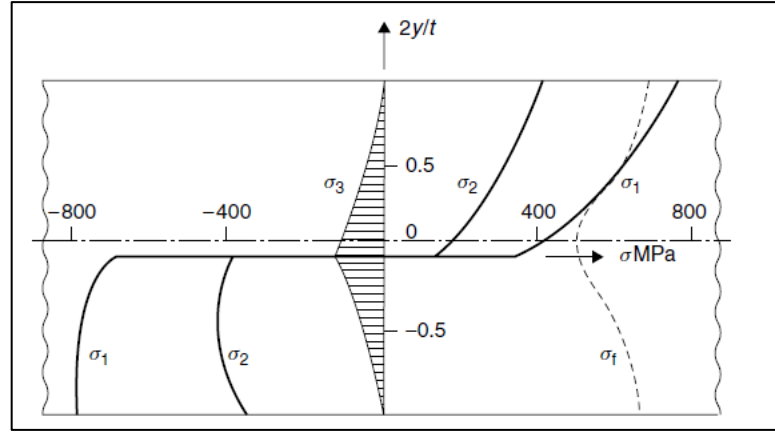
Şekil 2.27 (a)

Şekil 2.27 (b)

Şekil a) Büküm bölgesinde ortaya çıkan gerilme bölgeleri ve gerilme yetersizliğinden plastik deformasyona ulaşamamış; geri esnemelere yol açan elastik deformasyon bölgesi [67]

Şekil b) Rijit, tam plastik bir levhaya uygulanan küçük yarıçaplı bir büküm işleminin sonunda ortaya çıkan gerilmeler [68]

Şekil 2.27 Bükme sonrası gerilme dağılımları



Şekil 2.28 Gerinim Pekleşmesi Belirlenmesi: Gerinim pekleşmeli bir sac için gerilme dağılımının belirlenmesinde, büküm işlemine uğrayacak bölgenin herbir elemanı için ortaya çıkan gerinim oranlarının vereceği efektif gerinimin değerlendirilmesinden yola çıkmak gerekmektedir. Büküm oranı 2,5 olan ( $\rho = 2,5$  t) bir sacın gerinim pekleşmesi, gerilme-gerinim eğrisi üzerinden Şekil B de gösterilen tarzda belirlenmektedir [68].

#### Gerilme Esnemeleri Etkileyen Karakteristikler

Sactaki kalınlık değişimleri, akma gerilmesi değeri ile haddeleme yönünün bükme işlemleri üzerinde büyük etkisi vardır. Gerilme esneme olayına etki eden başlıca karakteristikleri etkileri ile birlikte şu şekilde derlemek mümkündür.

1) Akma Gerilmesi: Akma gerilmesinin yüksek oluşu daha büyük bükme kuvvetlerinin uygulamasını gerektirmekte; şekillendirme güçlüğü ve kırılabilirlik gibi sakıncalar yaratmaktadır. Ayrıca, gerilme esneme payının artışına da neden olmaktadır. Örneğin paslanmaz çelikten parçaların bükülmesinde, düşük karbonlu çeliğin bükülmesine göre daha büyük kuvvetler (%50 ÷ 60 fazla) gerekmektedir. Gerilme esneme, yumuşak metaller (örneğin 1100 Alüminyum alaşımı) için genellikle ihmal edilebilir düzeyde olmasına karşılık diğer Alüminyum alaşımlarında (örneğin 2024) dikkate değer sınırlara çıkabilmektedir. Düşük karbonlu çeliklerde, genellikle alüminyum ve bakır alaşımlarından daha fazla gerilme esneme değerleri göstermektedir. Paslanmaz çeliklerde de bunlardan daha etkin gerilme esneme görülmektedir [69], [70].

2) Haddeleme Yönü: Çoğu sac parça için haddeleme yönü en büyük sorunu oluşturmaktadır. Çünkü en az tercih edilen bükme yönü olmasına rağmen, parçanın konstrüksiyonu icabı bu yönde de bükme uygulaması gerekebilmektedir. Bu takdirde,

parça konumu yönlenme ile diyagonal bir şekilde düzenlenmekte ve çeşitli yönlerdeki bükümlerin mümkün olan en iyi şekilde gerçekleştirilmesine çalışılmaktadır. Kalın parçalar ile akma gerilmesi yüksek olan malzemelerde, bükme kenarı ile haddeleme yönü arasındaki açı daha da önce kazanmaktadır. Örneğin yüksek mukavemetli çeliklerde, haddeleme yönüne paralel bükümlerde ( $45^\circ$  yi geçmeyen) bükme yarıçapı kalınlığının iki (tercihen üç) katı tutulabilmektedir. Haddeleme yönüne paralel bükümlerde dar ve uzun sac parçaları bükükten sonra kaynak edip birleştirmek, dinlendirilmiş veya tavllanmış çelikler kullanmak vb. önlemler ile çatlamaların önüne geçilmeye çalışılmaktadır [69], [70].

3) Büküm Yarıçapı: Şekillendirilen metalin özelliklerine ve takım dizaynına bağlıdır. Çoğu metal için  $r_{min} / s$  oranı yaklaşık olarak sabit kalmaktadır. Çünkü plastiklik özelliği  $r_{min}$  değerini sınırlayan başlıca etkidir. Diğer bir faktör de işlem esnasındaki pekleşme olup, malzeme türü ve ısıl işlem durumuna bağlı olarak değişmektedir.

4) Geri Esneme Payı: Nispeten sünek metaller için (örneğin 1100 Alüminyum alaşımı) genellikle ihmal edilebilir düzeyde olmasına karşılık diğer Alüminyum alaşımlarında (örneğin 2024) dikkate değer sınırlara çıkabilmektedir. Düşük karbonlu çeliklerde, genellikle alüminyum ve bakır alaşımlarından daha fazla geri esneme değerleri göstermektedir. Paslanmaz çeliklerde de bunlardan daha etkin geri esneme görülmektedir. Geri esneme payını tespit edebilmek için, takım üzerinde düzenlemelere gidilmekte ve sonuca ulaşıncaya kadar seri deneyler yapılmaktadır. Konuya ilişkin olarak literatürde çeşitli malzeme grupları için cetveller yer almaktadır. Bunu önlemek amacıyla bir başka teknik, tabanı çıkıntılı stampa hazırlamaktır. Böylelikle stampa saca hızla vururken, uç kavisi bölgesindeki gerilme malzemenin akma gerilmesini aşarak geri esnemeyi bertaraf etmektedir. Ancak, bu tip bir şekillendirme özellikle mekanik preste gayet kontrollü bir şekilde uygulanmalıdır. Çünkü makinenin aşırı yüklenme tehlikesi söz konusudur. Geri esnemeyi düşük düzeylere indirebilir diğer bir yöntemle parçaya aynı kalıpta bir kez daha vurmaktır. Böylelikle ilave takım gereksinimi olmadan sadece ikinci bir operasyon uygulayarak amaca ulaşılmaktadır [69], [70].

5) Sac Parça Tasarımı: Bükümlerin parça kenarları ile deliklere yakın oluşu, düzgün bir bükme kenarı elde edilşini güçleştirmektedir. Bükme kenarı üzerindeki çentik veya boşluklar, bükümün düzgünlük ve sürekliliğini etkilemektedir. Ofset bükümde, büküm kenarları arasında en azından kalınlığın altı katı bir mesafe bulunmadıkça biçim sapmaları görölmektedir.

6) Makine ve Takımların Durumu: Makine ile takımlar sağlayabileceğı en yüksek hassasiyet derecesinde çalıştırılmalıdır. Aşınmalar ve kayıt ayarları kontrol altında tutulmalıdır.

### **Sacların Şekillendirilmesinde Biçimlendirme Hassasiyetini Arttıran Diğerk Faktörler**

Yukarıda değinilen faktörlere ilaveten, sac şekillendirmede biçimlendirme hassasiyetini arttıran başka faktörler de vardır.

a) Özel Stampalar: Geri esnemeyi azaltmak amacıyla uygulanan tekniklerden birisi de, tabanı çıkıntılı bükme stampası hazırlamaktır. Böylelikle stampa saca hızla vururken, uç kavisi bölgesindeki gerilme malzemenin akma gerilmesini aşarak elastik deformasyon bölgesini ezip yok etmekte ve dolayısıyla geri esnemeyi bertaraf etmektedir. Bu tarz şekillendirmelerin özellikle mekanik preslerde gayet kontrollü bir şekilde uygulanması gerekmektedir. Çünkü makinenin aşırı yüklenme tehlikesi söz konusu olur [67], [69].

b) Ütüleme İşlemi: Geri esnemeyi düşük düzeylere indirebilen bir diğerk yöntem de, sac parçaya aynı kalıpta bir kez daha vurmaktır. Böylelikle ilave takım gereksinimi olmadan sadece ikinci bir operasyon uygulayarak amaca ulaşılmış olmaktadır. İkinci operasyon için geçmişte ütüleme amaçlı kalıplar kullanılmış olsa da, maliyet ve zaman kayıpları yaratması dolayısıyla günümüzde tercih edilmemektedir. Burada ütüleme için stampanın kavis yarıçapları küütölerek köşelerin ezilmesi sağlanmaktadır [67], [69].

c) Boyutsal Doğruluk: oğru sac parça için haddeleme yönü en büyük sorunu oluşturmaktadır. Çünkü en az tercih edilen bükme yönü olmasına rağmen, parçanın konstrüksiyonu icabı bu yönde de bükme uygulaması gerekebilmektedir. Bu takdirde, parça konumu yönlenme ile diyagonal bir şekilde düzenlenmekte ve çeşitli yönlerdeki bükümlerin mümkün olan en iyi şekilde gerçekleştirilmesine çalışılmaktadır. Kalın parçalar ile akma gerilmesi yüksek olan malzemelerde, bükme kenarı ile haddeleme yönü arasındaki açı daha da önce kazanmaktadır. Örneğın yüksek mukavemetli

eliklerde, haddeleme yönüne paralel bükümlerde (45°' yi geçmeyen) bükme yarıçapı kalınlığının iki (tercihen üç) katı tutulabilmektedir. Haddeleme yönüne paralel bükümlerde dar ve uzun sac parçaları büktükten sonra kaynak edip birleştirmek, dinlendirilmiş veya tavlanmış çelikler kullanmak vb. nlemler ile çatlamaların önüne geçilmeye çalışılmaktadır [67], [69].

İlkel pul toleransları da bükülen parçanın boyutsal doğruluğunu etkileyecektir. Çünkü bu da imal edilen parça toleransının bir bölümüdür. Ticari toleransların (zellikle kalınlık toleransı) iyi araştırılmış olması gerekmektedir. Örneğin kaplanmış veya kaplanmamış saclardaki kalınlık farkı önemsiz olmasına rağmen, soğuk ve sıcak haddelenmiş tabaka veya rulo saclar arasında dikkate değer kalınlık ve maliyet farkları söz konusu olabilmektedir. Soğuk haddelenmiş saclar daha hassas toleranslar ile imal edilmiş olmakla birlikte maliyetleri daha yüksektir. Sac bandın toleransları da (soğuk ya da sıcak haddelenmiş) tabaka saca göre daha hassas olmaktadır. Sac parça daralıp incelдикe istenen toleranslar da daha hassaslaşmaktadır. elik levhaların toleransları, sıcak haddelenen tabaka ve rulo saclardan daha geniştir (min ~0,25 mm).

Bükme işlemleri için kabul edilen boyutsal toleranslar, 3 mm.lik kalınlıklara kadar genellikle 0,4 mm civarındadır. Daha kalın saclar için bu değer daha da artabilmektedir. Ancak bunu parçanın dizayn şekli, ilkel pulun hazırlanmış tarzı, takım ve makine hassasiyeti vb. işlem dışı faktörler de etkilemektedir. Boyutsal hassasiyeti sağlamak için başvurulan önlemler bazı hallerde ek maliyet getirmeyebilir. Ancak, maliyeti arttırdığı durumlar da olabilmektedir.

Mevcut ticari malzemelere ait tolerans sınırları ile yetinmeyip özel toleransların tercih edilmesi maliyetin aşırı yükselmesine neden olmaktadır

### **Geri Esnemelerin nerilen Grupsal Tahmin Yönteminin zerindeki Etkisi**

Sac parça konstrüksiyonlarının ölçü ve biçim tamlığında belirleyici olan başlıca karakteristikler, bu tez çalışmasının ana temasının dayandığı kaynak distorsiyonları ile montaj öncesi şekillendirmelerin ortaya çıkardığı geri esnemelerdir. Parça imalatı sırasında, sac malzemenin doğasından gelen geri esneme tepkimesi ile az veya çok karşılaşılması olağandır. Sac parça montaja giderken söz konusu ölçü ve biçim sapmalarını zorunlu olarak üzerinde taşımaktadır. Dolayısıyla kaynaklı montaja girecek

parçaların oluşturacağı toplam distorsiyonun tahminine gidilirken, sac şekillendirme simülasyonlarında olduğu gibi mutlak ölçü ve biçimden değil de; deformasyona uğramış geometriden hareket etmek gerekmektedir. Bu durum, sac konstrüksiyonlar için toplam distorsiyon tahminlerinde bulunulurken kesin bir geometrinin ortada olmayacağı gerçeğini ortaya koymaktadır. Bu tez çalışmasında, sac şekillendirmeden farklı olarak sabit matematik modellerden değil de; her an değişebilecek deformasyona uğramış geometrilerden yola çıkılarak tahminler yürütölmeye çalışılmıştır. Sonuçta bu amaca yönelik; gelişime açık bir metod ortaya konmuş bulunmaktadır. Baz alınan değişken geometri, ortaya konan sisteme sac şekillendirme simülasyonlarından gelebileceğı gibi, ölçümlerden alınacak kesin geometrilerden de intikal edebilir. Tez çalışmasında, söz konusu ikinci hal için de seçimli eşlemeye dayalı bir metodun yazılımı ile birlikte; çalışır durumdaki donanım prototipi de imal edilmiştir.

Tezin konusu ile direkt ilgili olmayan geri esneme hakkında gözönünde bulundurulması gereken hususlar yukarıdaki yönleri ile dikkate alınmıştır. Bunların gözönünde tutulması sayesinde, montaja giden parçaların beklendiğı şekilde ve daha hassas toleranslar ile şekillendirilmesi mümkün olabilmektedir. Bunu gerçekleştirmenin, neticede montajlı grubun toleranslarını olumlu yönde etkileyeceğı şüphesizdir.

### KULLANILAN ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

Oluşturulacak metodoloji ve buna dayanan otomatik gruplandırma mekanizmasının algoritması birleşik toleranslara dayalı çalışacaktır. Bunun için tolerans tipleri ve bu tolerans çeşitlerinden birleşik toleranslara geçiş irdelenmelidir.

#### 3.1 Toleranslar

Herhangi bir makine parçasını veya mamülü teknik resimlerinde öngörülen tam ölçü ile imal etmek mümkün değildir. Bu sebeple bu ürünün boyutlarına belli sınırlara rasında kalma izni verilir. Bu da tolerans olarak nitelendirilmiştir. Nominal boyut referans boyutudur. Hesaplama ile elde edilen ölçüler genellikle referans olarak belirlenir. Tolerans en büyük ve en küçük boyut arasındaki fark olarak da tanımlanabilir. Toleranslar +/- olarak doğrusal biçimde gösterilebilseler de toleranslandırma GD&T'nin prensiplerine dayanmaktadır. GD&T parça geometrisini hassas bir biçimde belirtmek için kullanılan yegane metoddur. Bu kapsamda 'EN ISO 1101 Geometrik mamul özellikleri-Geometrik toleranslandırma- Şekil, yönlendirme konum ve dönme toleransları' standardı [1] bu husustaki detayları belirler.

##### 3.1.1 Tolerans Tipleri

EN ISO 1101'e göre geometrik toleranslar biçim, yönlendirme, konum, profil ve salgı toleransları olarak ayrılabilir (Şekil 3.1).



| Eleman Cinsi                   | Özelliği  | Adı                           | Sembol |
|--------------------------------|-----------|-------------------------------|--------|
| TEK ELEMENLAR                  | ŞEKİL     | Doğrusallık                   | —      |
|                                |           | Düzlemsellik                  |        |
|                                |           | Dairesellik                   |        |
|                                |           | Silindiriklik                 |        |
|                                |           | Bir çizginin şekli            |        |
|                                |           | Bir yüzeyin şekli             |        |
| BİRBİRLERİYLE İLGİLİ ELEMENLAR | YÖN       | Paralellik                    | //     |
|                                |           | Diklik                        |        |
|                                |           | Eğiklik (Açısalılık)          |        |
|                                | KONUM     | Bir elemanın konumu           |        |
|                                |           | Ortak merkezlilik, eksenlilik |        |
|                                |           | Simetriklik                   |        |
|                                | YALPALAMA | Yalpalama                     |        |
|                                |           | Toplam yalpalama              |        |

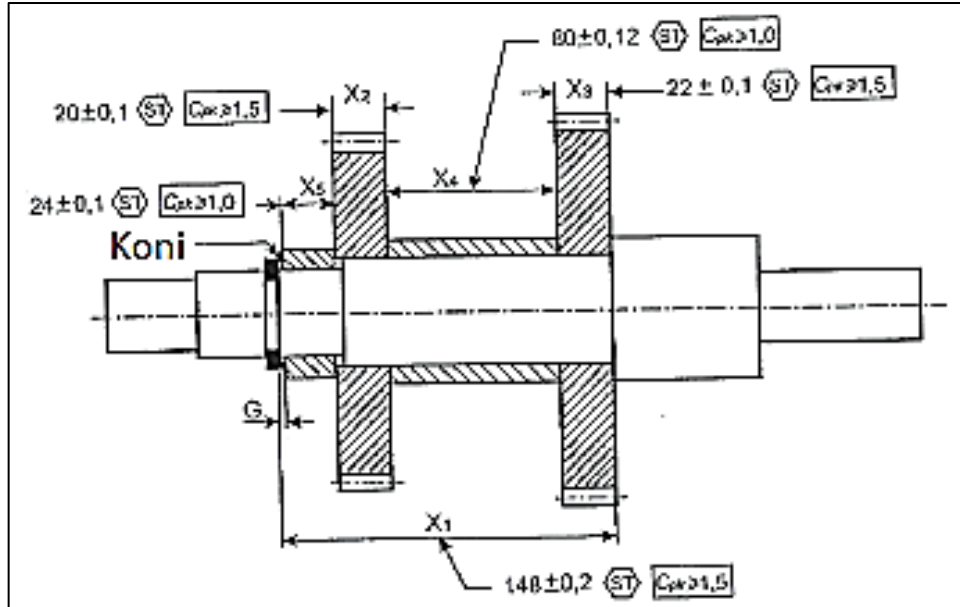
Şekil 3.1 Tolerans tipleri [71]

Geometrik mamul özelliklerinin dayandığı geometrik toleranslar doğrusal toleranslara çevirilerek istatistiksel tolerans analiz hesaplamalarında kullanılabilir. Ayrıca Fischer'e göre eşit olmayan iki taraflı doğrusal toleranslar da her iki taraftan da eşit tolerans biçimine dönüştürülüp İstatistiksel Tolerans Analiz hesaplarına katılırlar [72]. Bu adımlarda gerek GD&T gerekse doğrusal toleranslarda değişik yollar izlenebilir.

### 3.1.2 Tolerans Analizi ve Yöntemleri

Tolerans Analizi iki alt kategoriye içeren global bir terimdir. İlki tekil toleranslandırma şartlarını belirtmek için kullanılan metodları belirler. İkincisi de iki veya daha fazla özellik arasındaki mümkün kümülatif değişimi belirleyen procestir. Bu ikinci kısım İngilizce Tolerance Stackup olarak belirtilmişse de Türkçe Birleşik Toleranslandırma,

Kümülatif Toleranslandırma veya Tolerans Zinciri olarak adlandırılabilir. Aşağıda Tolerans Analizi Yönteminin bir mil dişli montajı için bir hesap örneği ortalama ve standart sapma değerleri üzerinden gösterilmektedir [73].



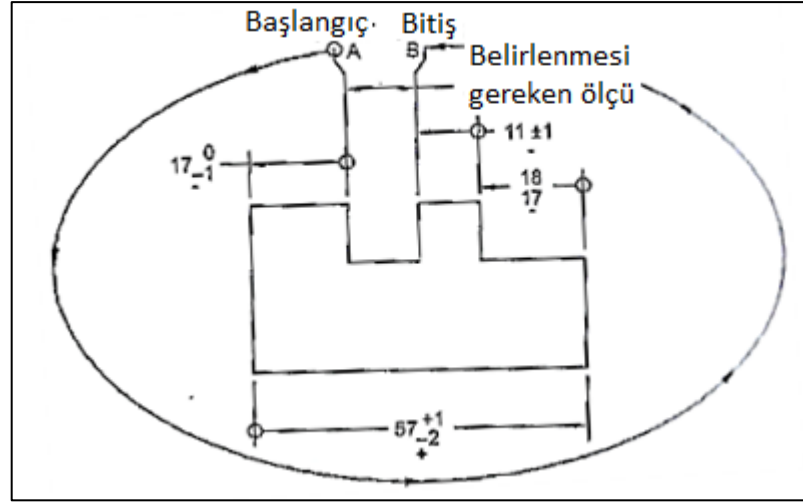
Şekil 3.2 Bir mil dişli montajı için Tolerans Analiz hesabı örneği

$$\mu_G = \mu_{X1} - \mu_{X2} - \mu_{X3} - \mu_{X4} - \mu_{X5} \quad (3.1)$$

$$\sigma_{G2} = \sigma_{X1}^2 + \sigma_{X2}^2 + \sigma_{X3}^2 + \sigma_{X4}^2 + \sigma_{X5}^2 \quad (3.2)$$

İstatistiksel Tolerans Analizi Yöntemleri için değişik hesaplama yöntemleri literatürdeki yayınlarda sunulmuştur. Bunlar toparlanıp genelde 4 ana başlık halinde verilebilir.

1. Worst-case Tolerans Analiz Yöntemi: Bu yöntem seçilmiş bir uzaklık veya aralık için olabilecek mutlak en büyük değişimi sunar. Bu yöntemde tolerans zincirindeki bütün ölçüler ya minimum ya da maksimum boyutlarındadır. Burada sapmalar direk toplanırlar.

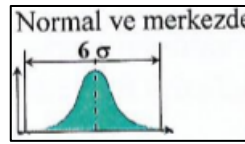


Şekil 3.3 Ölçüler ve toleranslar için Worst-Case zinciri

2. Kuadratik Tolerans Analiz Yöntemi: Bu yöntemde hesaba katılan tekil toleransların kareleri alınır.

$$\text{RSS Tolerance} = (T_1^2 + T_2^2 + T_3^2 \dots + T_n^2)^{0.5} \quad (3.3)$$

Bu yöntemde ilgili dağılımın  $\pm 3\sigma$  olduğu varsayılmaktadır [74].

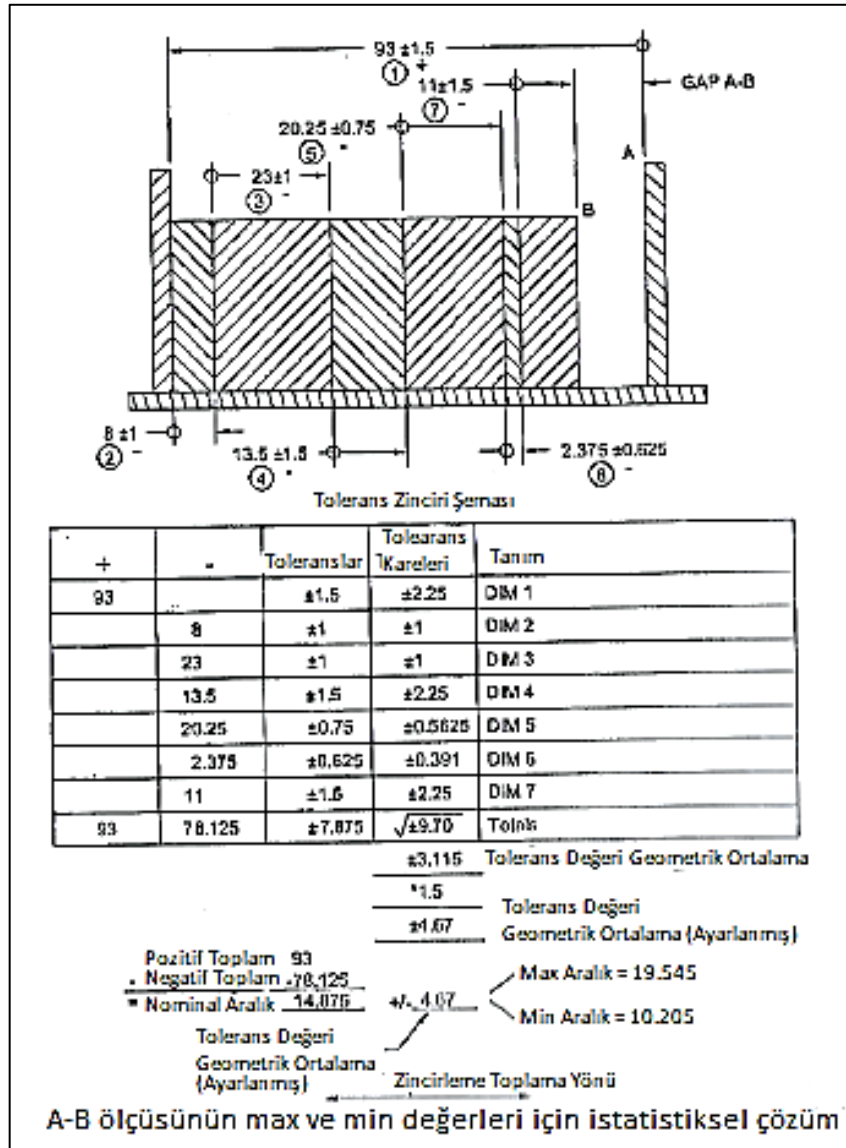


Şekil 3.4 Kuadratik Yöntemde Dağılım

3. Ayarlanmış (Adjusted) Tolerans Analiz Yöntemi: Bu yöntemde kuadratik yöntemden çıkan değer bir katsayı ile çarpılır. Bu katsayı 1'den büyük olarak seçileceği gibi genelde 1.5 seçilir [72].
4. Probabilistik Tolerans Analiz Yöntemi: Bu yöntemde kuadratik yöntemden çıkan değer  $\sqrt{3}$  ile çarpılır. Nominalin merkezde olmadığı durumlarda kullanılır [74].

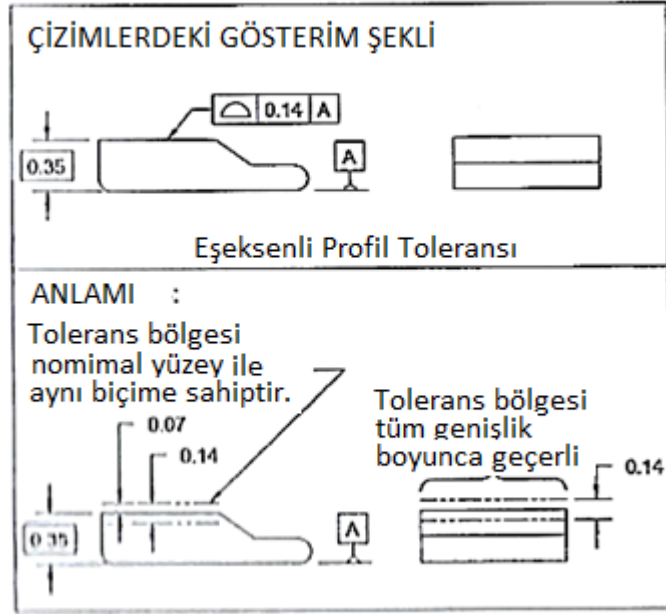
Yukarıdaki yöntemlerin hepsi 2 Boyutlu hesaplamalar içindir. Bu yöntemlerin yanında Monte Carlo Simülasyon yöntemi de mevcuttur. Bu yöntem bilgisayar tabanlı Tolerans Analizi Simülasyon Analiz yazılımlarında kullanılırlar. 3 boyutlu hesaplamalar için bilhassa kullanılabilecek bu yöntem istatistiksel bir yaklaşım olup binlerce iterasyon içeren hesaplara dayanır [72], [74].

İstatistiksel Tolerans Analiz Yöntemi için ele alınan bir örnek sunulmaktadır [72].



Şekil 3.5 Bir Tolerans Analiz Örneği

Yukarıdaki örnekte görüldüğü üzere toleranslar Geometrik mamul özellikleri esaslarına göre verilirken geometrik toleranslar ele alınır. Hesaplamalar için bu toleranslar doğrusal toleranslara çevirilirler (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 Geometrik toleransların doğrusal toleranslara çevirilmesi

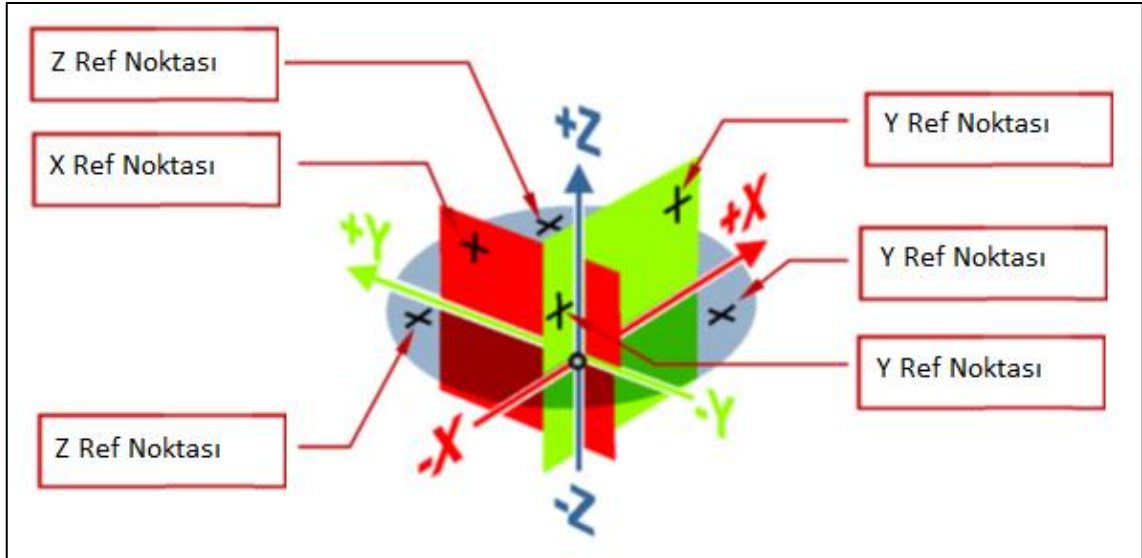
Bu sırada maksimum ve minimum malzeme şartları da göz önüne alınabilir. Çıkan sonuçlar da geometrik toleranslara yaklaşık olarak çevirilebilirler.

### 3.1.3 Üç Boyutlu Tarama Yönteminde Kullanılan Hizalama Yöntemleri

3 Boyutlu tarama sonuçları ilgili yazılıma aktarılarak sapmalara ulaşılır. Bu sırada tarama verisi ile CAD datasının hizalanması bir bakıma bir yüzeyden öpüştürülmesi gerekmektedir. Bu aşamada Best-Fit ve RPS olarak iki yöntem mevcuttur.

Best-Fit yönteminde Gaussian ve Tschebyscheff metodları kullanılabilir. RPS Yöntemine göre; yazılım, ölçü verisini nominal verinin koordinat sistemine göre hizalar. Yazılım RPS nominal koordinatları ve karşılık gelen mesh koordinatları arasında bağlantı kurar. RPS hizalamasında, her bir bağlantı kurulan RPS noktası için X,Y,Z yönlerinin belirtilmesi gerekir. Yapılmış olan örneklerde ilk üç nokta Z yönünü, sonraki iki nokta Y yönünü ve tek nokta ise X yönünü belirtir. Şekil 3.7 de bu hizalamayı temsil etmektedir. Bu fonksiyon bütün RPS noktalarını kullanarak sapmaları minimize eder. Yazılım RPS noktalarını, sapmalar sıfır veya sıfıra mümkün olduğu kadar yakın olacak şekilde, hizalamaya çalışır. Burada 3-2-1 nokta prensibi mevcuttur. Örneğin burada 3 noktadan Z'de bir kısıtlama yapılmıştır. Y de ise iki noktadan kısıtlama ile parçanın ötelenmesi X'te tek noktadan kısıtlama ile ise parçanın dönmesi engellenmiştir. Parçanın

fikstürlere bağlanması sırasında ise yine aynı yöntemle başvurulmaktadır. Bu sırada örneğin X yönünde de iki noktadan (veya yönden) kısıtlama yapılabilir fakat parça fikstürden çıkmayabilir ve fazladan, gereksiz bir işlem olabilir.



Şekil 3.7 RPS Yöntemi

RPS yöntemine göre, Best-Fit yöntemi daha kaba bir hizalama sağlar ve daha çok öncelikli bilgi sağlamak için kullanılır. En küçük kareler yöntemine göre bir yaklaşım sağlar [73]. RPS, GD&T çizimlerinde toleranslardan sapmaları tespit için daha hassas sonuçlar sunar.

### 3.2 İstatistiksel Yöntemler

#### 3.2.1 Proses Yeterlilik Analizleri ve Katsayıları

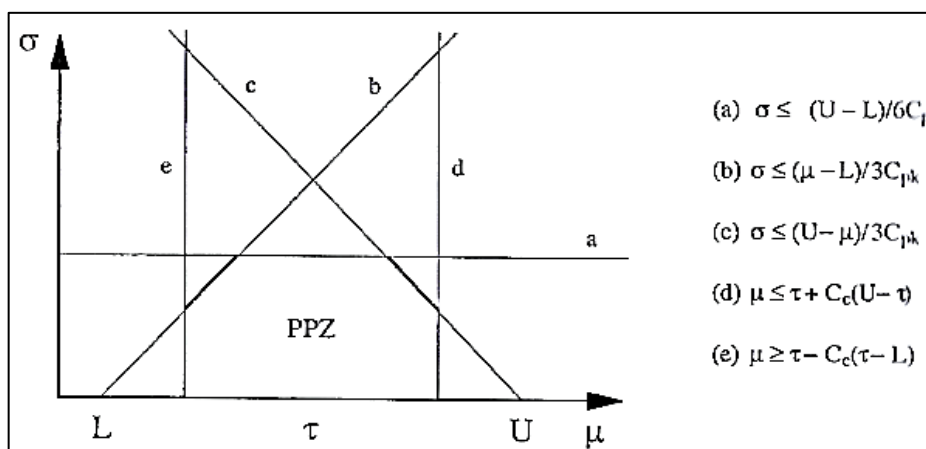
Proses Yeterlilik Katsayıları (PCI) bir istatistiksel toleransta olası iş parçası dağılımlarını göstermek için  $\mu$ - $\sigma$  düzleminde bir sonlu bölge belirlemek için kullanılır. Bu bölge Popülasyon Parametre bölgesidir (PPZ) ve sadece  $(\mu$ - $\sigma)$  parametre değerleri bu bölge içinde yer alan iş parçası popülasyonları belirli istatistiksel toleransı sağlamış olur [73]. PPZ  $\mu$  eksenini ve başka katsayıların betimlediği bir veya birkaç çizgi ile sınırlandırılmıştır. Bu PCI değerleri Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 Proses Yeterlilik Katsayıları

|                                                                                                                                                  |       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| $C_p = \frac{U - L}{6\sigma}$                                                                                                                    | (3.4) |
| $C_{pk} = \min\{C_{pl}, C_{pu}\}, \text{ burada}$ $C_{pl} = \frac{\mu - L}{3\sigma} \quad \text{ve} \quad C_{pu} = \frac{U - \mu}{3\sigma}$      | (3.5) |
| $C_c = \max\{C_{cl}, C_{cu}\}, \text{ burada}$ $C_{cl} = \frac{\tau - \mu}{\tau - L} \quad \text{ve} \quad C_{cu} = \frac{\mu - \tau}{U - \tau}$ | (3.6) |
| $C_{pm} = \frac{U - L}{6\sqrt{\sigma^2 + (\mu - \tau)^2}}$                                                                                       | (3.7) |

U ve L değerleri WC toleranslandırma aşagı ve yukarı sınırları,  $\tau$  ise hedef değeri göstermektedir. Genelde U ve L,  $\tau$  etrafında simetriktir ve bu durumda  $\tau=(U+L)/2$  eşitliği sağlanmaktadır. Cp ve Cc katsayıları genelde bir parametrenin,  $\sigma$  veya  $\mu$ 'nın fonksiyonlarıdır. Bu katsayılar sonlu bir Popölasyon Parametre Bölgesi tanımlamak için tek başlarına yeterli değildirler ve bir başka PCI ile birlikte verilmelidirler. Sadece Cpk ve Cpm tek başlarına kullanılabilir.

Şekil 3.8  $C_p$ ,  $C_c$  ve  $C_{pk}$  katsayıları ile belirlenmiş bir PPZ'yi göstermektedir.  $C_{pm}$  ile belirlenmiş alan ise yarı daireseldir ve resimde gösterilmemiştir.



Şekil 3.8 Popülasyon Parametre Bölgesi (PPZ)

### 3.2.2 Regresyon Analizleri-Central Composite Design (Merkezi Kompozit Tasarım)

Genelde, bir tek bağımlı değişken veya cevap  $y$  ve bunun bağılı olduğu  $k$  tane bağımsız değişken, örneğin  $x_1, x_2, \dots, x_k$ , olabilir. Bu değişkenler arasındaki ilişkiyi temsil eden matematiksel model regresyon modeli olarak tanımlanır. Bir çoğu durumda doğru fonksiyonel ilişkiyi bilinemez ve deney yapan kişi  $y = \phi(x_1, x_2, \dots, x_k)$  ilişkisinde  $\phi$ 'ya yaklaşmak için uygun bir fonksiyon seçer. Genelde düşük üstel dereceden polinom modelleri yaklaşım fonksiyonları olarak kullanılır [75].

Bulunacak regresyon fonksiyonları lineer, lineer olmayan, çok sayıda bağımsız değişken için regresyon ve polinomial olabilir. Lineer regresyonda en küçük kareler yöntemi kullanılırsa katsayılar aşağıdaki şekilde bulunabilir [76].

$Y(X_i) = a + bX_i$  lineer ilişkisi için;

$$\sum_{i=1}^n Y_i = na + b \sum_{i=1}^n X_i \quad (3.8)$$

$$\sum_{i=1}^n X_i Y_i = a \sum_{i=1}^n X_i + b \sum_{i=1}^n X_i^2 \quad (3.9)$$

$$b = \frac{n \sum XY - \sum X \sum Y}{n \sum X^2 - (\sum X)^2} \quad (3.10)$$

$$a = \frac{1}{n} (\sum Y - b \sum X) \quad (3.11)$$

Bu sırada  $x$  ve  $y$  arasında lineer ilişkinin derecesini belirleyen bir korelasyon katsayısı ( $r$ ) belirtmek gerekir. -1 ile 1 arasında değişen bu değer 1'e yaklaştıkça lineer ilişkinin kuvvetli olduğunu gösterir.

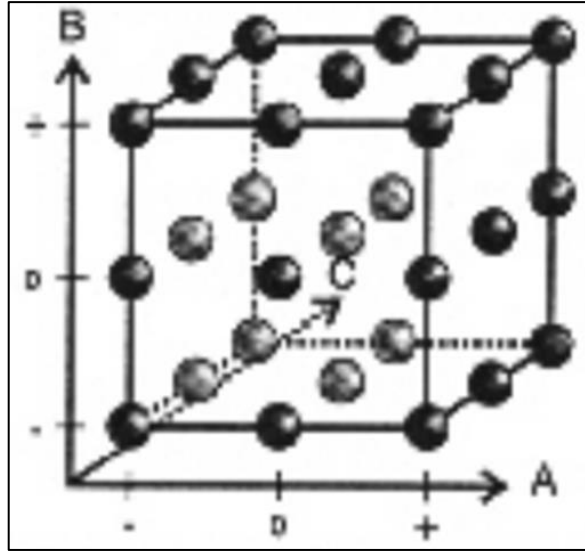
$$r = \frac{\sum XY - n\bar{X}\bar{Y}}{(n-1)s_X s_Y}, \quad s_X = \sqrt{\frac{\sum (X - \bar{X})^2}{n-1}}, \quad s_Y = \sqrt{\frac{\sum (Y - \bar{Y})^2}{n-1}} \quad (3.12)$$

Lineer olmayan ilişki için ( $Y = ab^x$ ) modeli, çoklu regresyon için ( $Y = a + b_1x_1 + b_2x_2 \dots$ ) modeli, ikinci dereceden tekli regresyon bir polinomial fonksiyon için ise ( $y = a + b_1x + b_2x^2$ ) modeli tanımlanabilir [76].

### 3.2.3 Full Factorial, Merkezi Kompozit, Yanıt Yüzey Analizleri

Her parametrenin her seviyesinin temsil edildiği deney yöntemi tam faktöriyel deneylerdir. Aşağıda üç faktörlü üç seviyeli bir tam faktöriyel deney planı gösterilmektedir.



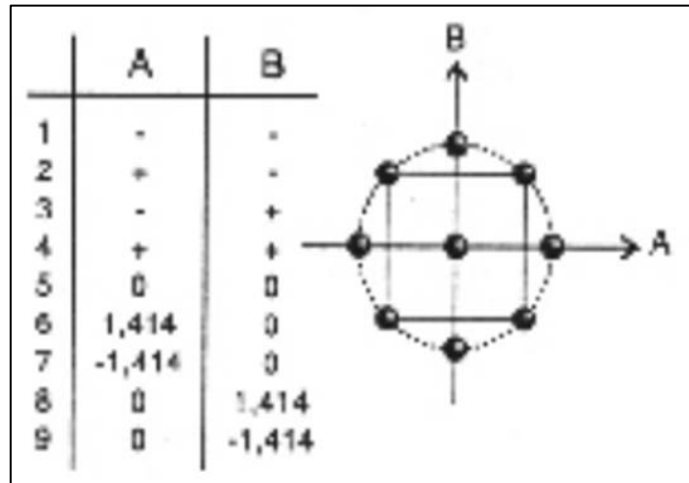


Şekil 3.9 Üç faktörlü üç seviyeli bir tam faktöriyel deney planı

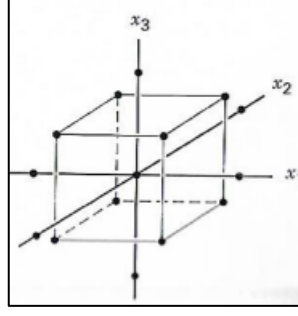
Yanıt Yüzey Analizi ikinci dereceden girdilerle çıktı arasında bir ilişki kurmak için kullanılır. Temsil ettiği fonksiyon:

$$y = b_0 + b_1x_1 + \dots + b_kx_k + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + \dots + b_{k-1,k}x_{k-1}x_k + b_{11}x_1^2 + \dots + b_{kk}x_k^2 \quad (3.13)$$

Aşağıda iki faktörlü [76] ve üç faktörlü [75] merkezi kompozit dizayn deneysel yöntemler verilmiştir (Şekil 3.10-3.11)



Şekil 3.10 İki faktörlü merkezi kompozit dizayn



Şekil 3.11 Üç faktörlü merkezi kompozit dizayn

### 3.2.4 Taguchi ve Etki Analizi

Japon bilim adamı Taguchi tarafından sunulan sistem imalat aşamasında yapılan kontrol ve deney tasarımı faaliyetlerini çevrim içi kalite kontrol olarak sınıflandırmıştır. Taguchi Kalite Yaklaşımında sistem, parametre ve tolerans tasarımları rol oynamaktadır. Bu yöntem kayıp fonksiyonuna dayanmaktadır. Bu fonksiyonda üretilen yarı mamül ve mamüllerde ölçülen karakteristikler hedef değer  $\pm$  tolerans limiti içerirler. Taguchi kaliteyi müşteriye verilen kayıp ile ölçmektedir. Kalite kayıpları Sinyal/Gürültü (Signal/Noise) oranı ile ölçülür. S/N oranları üç değişik türde; küçük değer, büyük değer ve nominal değer için belirlenir [76].

- ‘Küçük değer iyidir’ (*‘Larger is better’*) için:

$$L=k\sigma^2 \quad \sigma^2=1/n(y_1^2+y_2^2+y_3^2+y_4^2 \dots y_n^2) \quad \eta=10\log 1/\sigma^2 \quad \eta=-10\log \sigma^2 \quad (3.14)$$

$(1/\sigma^2)=S/N$  oranına karşılık gelmektedir.

- ‘Büyük değer iyidir’ (*‘Smaller is better’*) için:

$$L=k\sigma^2 \quad \sigma^2=1/n(1/y_1^2+1/y_2^2+1/y_3^2+1/y_4^2 \dots 1/y_n^2) \quad \eta=10\log 1/\sigma^2 \quad \eta=-10\log \sigma^2 \quad (3.15)$$

- ‘Nominal değer en iyidir’ (*‘Nominal is best’*) için:

$$L=k\sigma^2/y_{ort}^2 \quad \sigma^2=1/n(1/y_1^2+1/y_2^2+1/y_3^2+1/y_4^2 \dots 1/y_n^2) \quad \eta=10\log 1/\sigma^2 \quad \eta=10\log y_{ort}^2/\sigma^2 \quad (3.16)$$

Taguchi deney tasarımları  $L_N(A^k)$  olarak gösterilip N deney sayısını, A faktörlerin seviyelerini, k da faktör seviyesini temsil etmektedir.

## BÖLÜM 4

### DENEYSEL ÇALIŞMA

Çizelge 4.1 Deneysel Çalışmaların Gösterimi

| Çalışma Adı                                | Uygulama | Simülasyon | Neden                                               | Nerede                                   | Tarih                  |
|--------------------------------------------|----------|------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------|
| Temrinlik Çalışma                          | X        | X          | Temrinlik; ilk distorsiyon sonuçları almak amacıyla | Öztiryakiler<br>OR-SA<br>Weld<br>Planner | Haziran<br>2015        |
| Punta Makinası Kullanım Tanıma Çalışmaları | X        |            | Kaynak punta makinasını tanıma amacıyla             | Mistaş                                   | Ocak-<br>Şubat<br>2016 |
| Küçük Parçalar için Regresyon Denemesi     |          | X          | TOFAŞ parametrelerini belirlerken bir ön çalışma    | Simufact                                 | Ekim-<br>Kasım<br>2016 |
| TOFAŞ Endüstriyel Uygulama Örneği          |          |            |                                                     |                                          |                        |
| Kaynak Uygulaması                          | X        |            |                                                     | TOFAŞ                                    | Aralık<br>2016         |

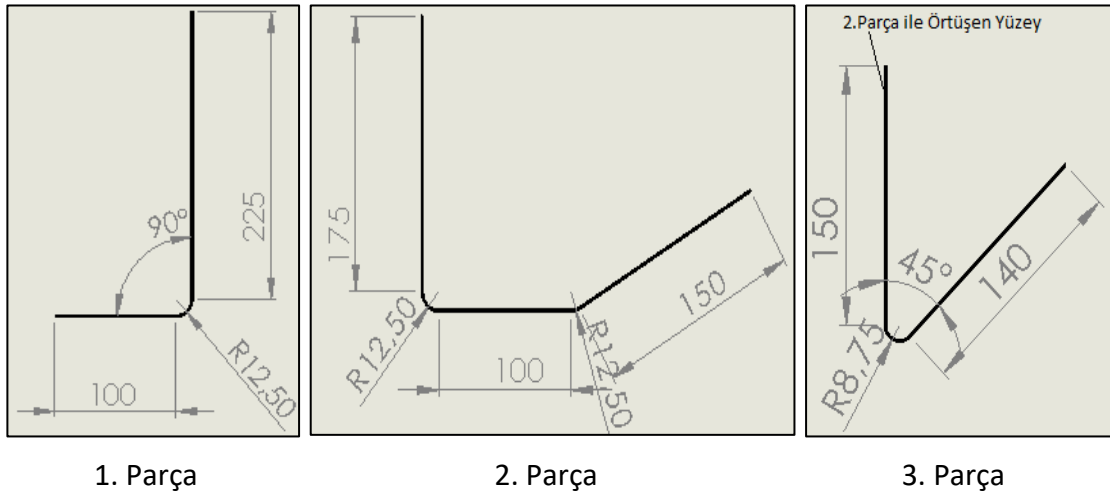
Çizelge 4.1 Deneysel Çalışmaların Gösterimi (Devamı)

|                                 |   |   |                                                                                                                                       |              |                         |
|---------------------------------|---|---|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|-------------------------|
| 3B Tarama                       | X | X | Kaynak distorsiyonlarını belirlemek üzere hem tekil parçalara hem montaj gruplarına uygulanması                                       | TOFAŞ        | Haziran 2016- Ocak 2017 |
| Analiz Çalışması 1              |   | X | Kaynak sıralarının etkisini görmek amacıyla                                                                                           | Weld Planner | Şubat 2017              |
| Analiz Çalışması 2              |   | X | TOFAŞ'ta ele alınan aynısını modelleyip bu distorsiyonları göz önüne almak                                                            | Simufact     | Mart- Haziran 2017      |
| Ultrasonik Testler              | X |   | TOFAŞ'ta uygulanan deneysel parametrelerin sağlıklı punta sağladığını göstermek için                                                  | TOFAŞ        | Ocak 2017               |
| Punta Sıyırma ve Çekme Testleri | X |   | TOFAŞ'ta uygulanan deneysel parametrelerin sağlıklı punta sağladığını göstermek için ve deneysel parametre aralığını belirlemek için. | Ermetal      | Mayıs 2017              |

## 4.1 Temrinlik Ön Çalışma

### 4.1.1 Tarama Çalışmaları

Çalışmanın pratik olarak başlangıcında hem çalışma prosesine örnek teşkil etmesi için hem de başlangıçta distorsiyonların nasıl gerçekleştiğini görmek için Öztiryakiler A.Ş.'de Şekil 1'de görülen parçaların açınımları kesilip Abkant'ta bükülerek numuneler hazırlanmıştır. Parçalar 1 mm kalınlığında olup malzemeleri ASTM 304 kalite paslanmaz çeliktir.



Şekil 4.1 Tasarlanmış parçaların teknik resimleri

Yapılan çeşitli girişimler ve deneme ölçümleri sonucunda GOM firmasının Atos 3D Scanner cihazı ve GOM Inspect V8 yazılımının kullanılmasına karar verilmiştir. Bununla birlikte, kullanılmış olan bu yazılımın, araştırılıp denenmiş olan diğer ölçüm işleme yazılımlarına (SolidWorks-Scanto3D, MeshLab) göre daha hızlı ve kolay kullanılabilir olduğu saptanmıştır. 'Orsa Proje' Şirketi'nden üç boyutlu tarama için destek alınmış ve Atos 3D optik ölçüm cihazı kullanılmıştır. Öncelikle bükülmüş olan parçalar; daha sonra da bunların kaynaklı kompleleri aşağıdaki donanım üzerinde taramalara tabi tutulmuştur (Şekil 4.2).



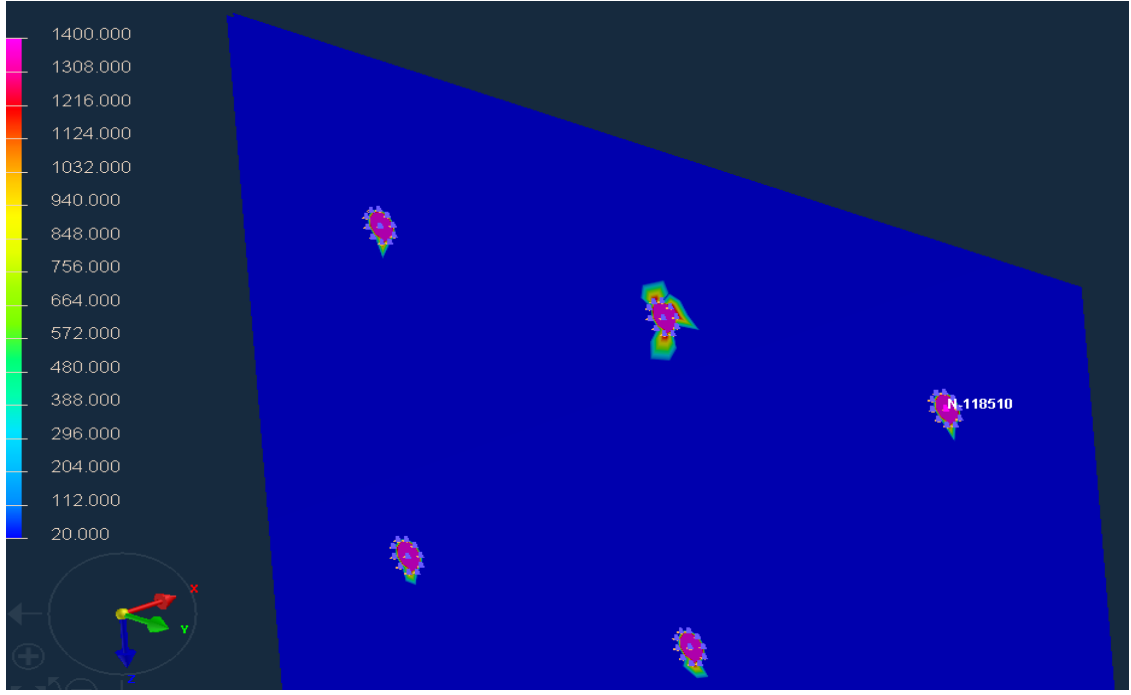
Şekil 4.2 Orsa Proje firmasında Parça 1 için 3B tarama çalışması

Tarama sonrası parçaların boyutsal ölçü analizleri GOM Inspect V8 yazılımı ile yapılmıştır. Tarama işlemlerinin tamamı gerekli bilgi alındıktan sonra gerçekleştirilmiştir. Bütün parçalar ve montaj grupları, tarama sırasında parlamayı önlemek amacıyla, tarama öncesi spreyci boya ile kaplanmış ve üzerlerine ve yerleştirildikleri tablaya marker'lar yerleştirilmiştir. Tarama işlemi sırasında, kamera tabla çevresinde çeşitli adımlar ile hareket ettirilmiş ve konulan markerlar yardımı ile ölçümler alınmıştır. Daha sonra da her adımda alınmış olan veriler bir poligonizasyon işlemi ile birleştirilip tam tarama sonucu elde edilmiştir. Örneğin, herhangi bir tekil parça için 10-15 adım, montajlı gruplar için de 25-30 adımlı ölçüm uygulanmıştır. Tekil parçalar taranıp oluşturulan gruplara göre sırayla özel numara verilmiş, daha sonra bu numaralara göre kaynak yapılmış ve yeniden bu montaj gruplarına da tarama yapıp yine özel numara verilmiştir. Kaynak öncesi tekil parçalar ve punta kaynağı sonrası montaj gruplarının karşılaştırmaları bu numaralara göre söz konusu yazılım ile gerçekleştirilmiş ve oluşan sapmalar elde edilmiştir. Bu unsurlar ileride karşılaştırma ve ölçü analizi sırasında sonuçlar bakımından sorun teşkil edeceğinden, hem tekil hem de montajlı gruplarda asıl parça dışındaki unsurlar yine GOM Inspect yazılımı aracılığı ile silinmiş alt ve üst kenarlardan 2 mm'lik kısımlar çıkarılmıştır.

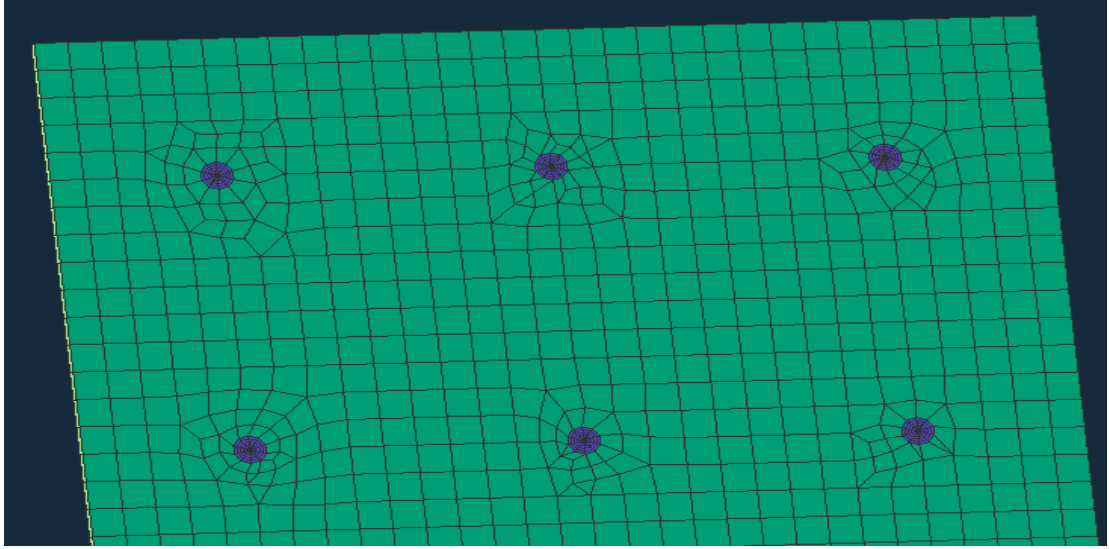
#### 4.1.2 Weld Planner Analiz Çalışmaları

Kaynak analizleri için ilk kullanılan yazılım Fransız ESI Group'a ait Weld Planner yazılımıdır. Bu yazılım kaynak parametrelerini dikkate almadan 'Local Shrinkage' (Bölgesel Daralma) prensibine dayalı çalışmaktadır. Daha çok fikstür yerleri ve kaynak sırasını belirlemek için kullanılan bu yazılımın en büyük avantajı kısa hesaplama süreleridir. Bu yazılımdan önce Şekil 4.1'de gösterilen katı CAD modeli SOLIDWORKS'te yüzey (mid-surface) haline getirilmiştir. Bunu takiben VISUAL-MESH ara programında uygun mesh oluşturulmuş; punta kaynak noktaları ise VISUAL-WELD ara programı ile parçaların üzerine atanmıştır. Daha sonra bu örnek WELDPLANNER programının içine atanmış ve gerçekleştirilen analiz sonucu punta kaynağı sonrası oluşan distorsiyonlar elde edilmiştir.

Analizlerde punta kaynağı atılan bölgelerde bir ısılatma problemi görülmüştür. Bu da node'lardaki sıcaklık dağılımının gözlenmesi ile fark edilmiştir (Şekil 4.3). Isılatma probleminden kasıt punta bölgesi etrafında sıcaklık dağılımının çevresel olarak simetrik olmamasıdır. Ayrıca Şekil 4.3'te de görüldüğü üzere her puntada da dağılım farklı şekildedir. Bunun sebebi meshin yapısının sağlıklı ve her bölge için standart atılmamış olmasıdır (Şekil 4.4). WeldPlanner programı fikstür ve kaynak sırasına göre, faz değişimlerini dikkate almadan, her bölgedeki sıcaklığa ve kendini çekme miktarına göre (Local Shrinkage Method), oluşacak distorsiyonları belirler. Bu yüzden sıcaklık dağılımını belirleyecek mesh yapısının sağlıklı oluşturulması önemlidir.



Şekil 4.3 Sıcaklık Dağılımı (Islatma) Problemi

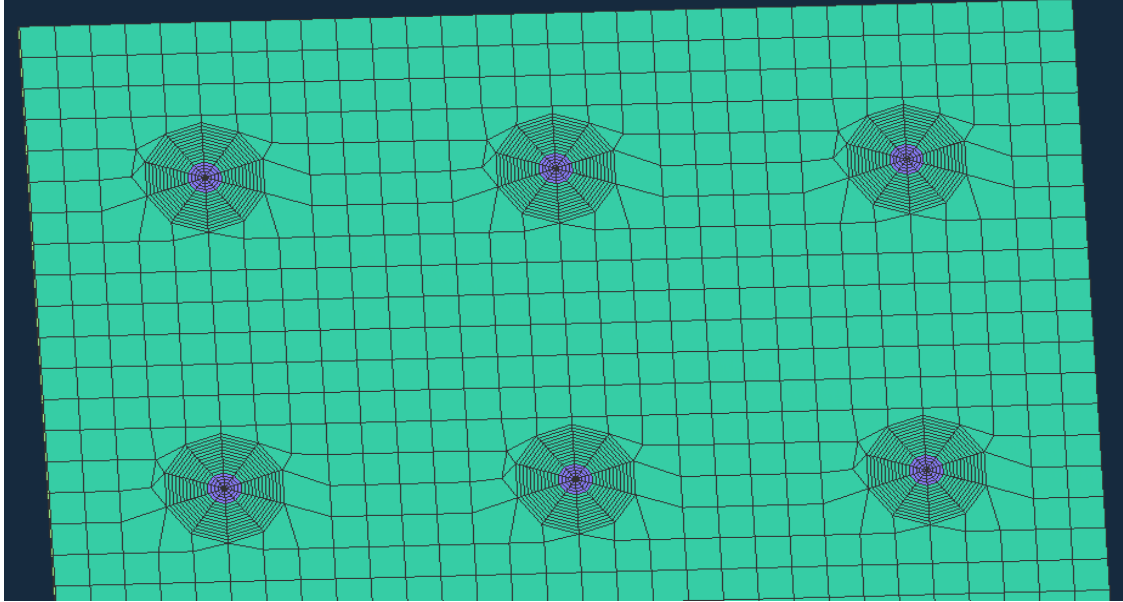


Şekil 4.4 Punta etrafındaki asimetrik Mesh

ESI Group'un temsilcisi Onatus firmasının kendisi de bünyesinde bir çok punta noktası barındıran kaynak analizleri yapmaktadır. Fakat punta noktalarının sayısının çokluğundan punta çevresine hassas bir mesh atmamaktadırlar. Bu ıslatma problemini çözmek için noktalar etrafında daha hassas mesh atma gereksinimi doğmuştur (Şekil



4.5). Şekil 4.4 ve 4.5'te görülen mor bölgeler VisualWeld'te Spot Weld Manager sekmesinde yarıçapı verilerek oluşturulmuş ve meshi program tarafından otomatik olarak atılan punta bölgeleridir.



Şekil 4.5 Punta Etrafına Simetrik Mesh Atma

Meshin yapısının distorsiyonu çok etkilediği gözlemlenmiştir.

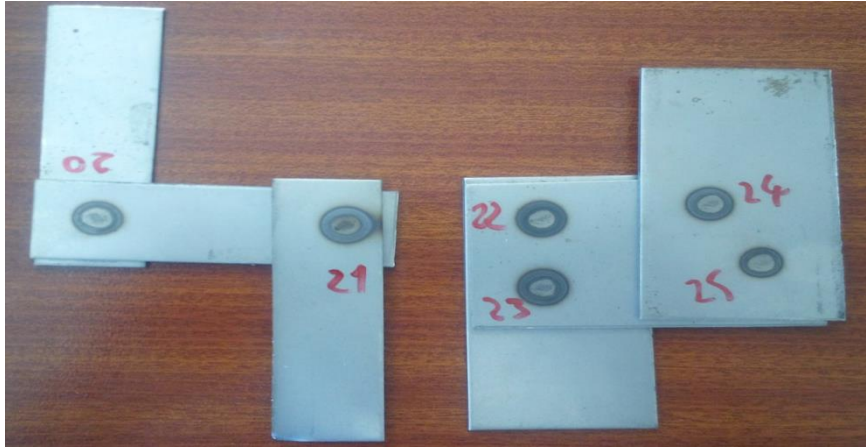
#### 4.2 Punta Makinası Kullanım Tanımaya Yönelik Ön Çalışmalar

Hem punta makinasını tanımak hem de parametrelerin kontrol panelinden nasıl değiştirildiğini öğrenmek ve kaynak parametrelerini değiştirip etkilerini görmek için Mistaş Firması'nda 'MPR3-120kVA' (Şekil 4.6) punta kaynak makinasında uygulamalar yapılmıştır.



Şekil 4.6 Mistaş Firması 'MPR3-120kVA' Model Punta Kaynak Makinası

Uygulama yapılan parçalar (Şekil 4.7) çeşitli boyutlarda kesilmiş ve punta kaynak işlemi için hazırlanmıştır. Kaynak parametrelerini değiştirerek yaklaşık 25 adet deneme yapılmıştır.



Şekil 4.7 Örnek Parça Uygulamaları

Numunelere çeşitli parametreler uygulanmış ve bu parametre değişikliklerinin etkileri gözlenmeye çalışılmıştır. Söz konusu parametreler Mistaş'ın [44] ve Ruukki'nin [42] el kitaplarından yola çıkılarak tayin edilmiştir. Bu parametrelerden özellikle kaynak akımı ve kaynak zamanı parametre değerlerinde değişikliğe gidilmiştir. Değişiklikler distorsiyonu etkileyecek ısı girdiye göre belirlenmiştir ( $Q=RI^2t$ ).

Kaynak parametrelerinin etkisini incelerken kaynak bölgesinin dayanımının da göz önünde bulundurulması gerekir. Buna yönelik olarak uygulanan testlerden birisi de sıyırma testidir. Şekil 4.8’te de görüldüğü üzere kopmanın kaynak çekirdeği içinden değil de etrafından oluşması istenir. Bu yüzden de kaynak çekirdeğinin içinde boşluk veya küçük çekirdek oluşumu gibi olayların olamaması istenir. Bu sebeple de zaten belli malzeme ve kalınlıklar için punta kaynağı parametreleri için sınırlar içeren standartlar ve teknik kılavuzlar mevcuttur. Ayrıca yukarıda belirtilen hataların var olup olmadığını tetkik etmek için kaynak çekirdeği bölgesinden kaynak yapılmış parçalar kesilerek de kaynak çekirdeği gözlemlenmeye çalışılmıştır (Şekil 4.9).



Şekil 4.8 Sıyırma Testi Örnekleri



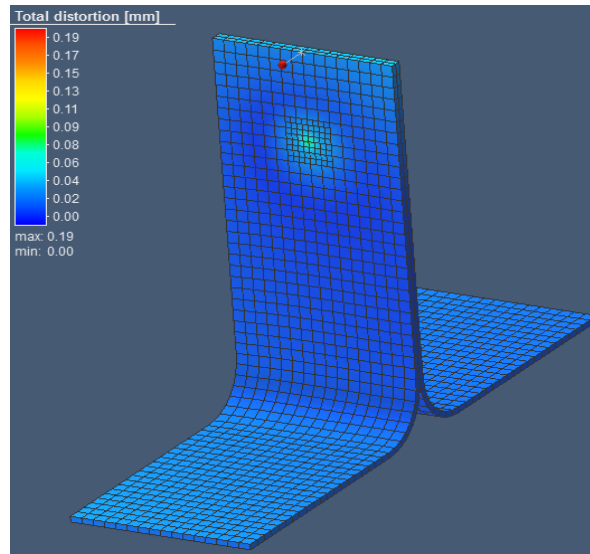
Şekil 4.9 Kaynak Bölgesi Tetkik Örnekleri

### 4.3 Küçük Parçalar için Regresyon Denemesi

Kaynak analiz yazılımlarını kullanmanın başlıca sebebi kaynak parametreleri ile distorsiyonlar arasında kurulması amaçlanan matematiksel bağıntıya bir ortam sağlamak idi. Weld Planner yazılımında kaynak parametreleri girilemediğinden bu

amaçla Simufact yazılımı kullanılmıştır. MSC firmasına ait olan bu yazılım için Almanya'daki direktörlükle temasa geçilmiştir. Başta firma tarafından gerçekleştirilmekte olan kaynak modülü üzerinde beraber çalışılması düşünülmüşse de bu gerçekleşmeyince firma tarafından serbest kullanım izni verilmiştir. Simufact Forming'te ise sadece kaynak analizi için gerekli olan meshler oluşturulmaktadır. Simufact firmasının serbest kullanım lisansı vermesindeki amaç doktora çalışmalarının sonuçları ile kendi analizlerini test etmek ve ayrıca problem çıkan belirli yerlerde geri bildirim olarak iyileştirme yönünde araştırmalarına devam etmektir. Buna yönelik olarak doktorant da çalışma sonuçları ile firmanın kaynak modülünün geliştirilmesinde yardımcı olmaktadır.

TOFAŞ'ta yapılacak çalışmalarda kaynak parametre değerlerini belirlerken parametre sınırlarını ve parametre değiştirince oluşabilecek distorsiyon farklarını görmek için daha basit ve küçük parçalarda gerek tek gerekse de çift puntalı analiz örnekleri Simufact'te gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.10).

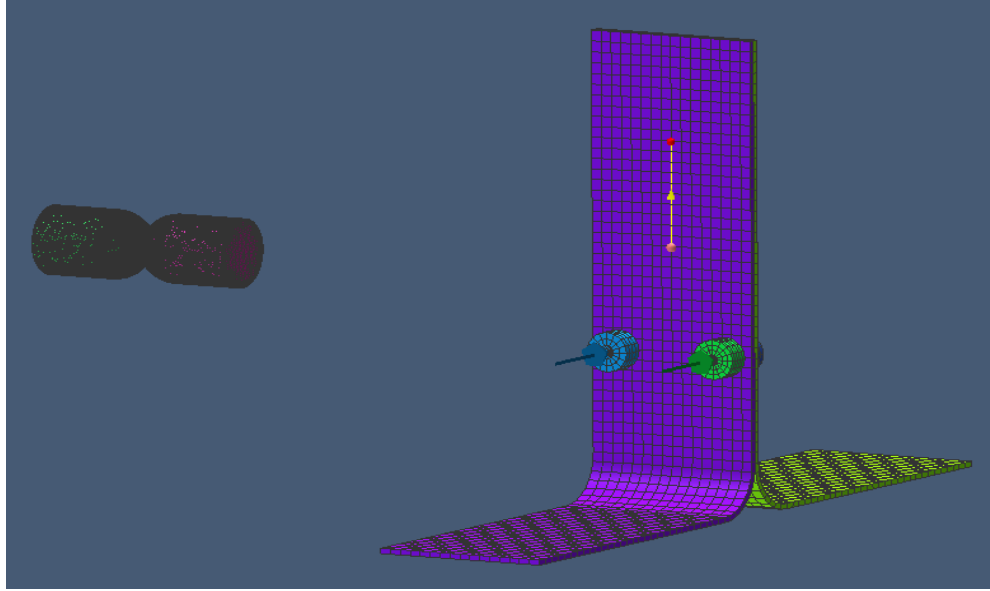


Şekil 4.10 Taguchi yöntemi için kurulan model sonucu örneği

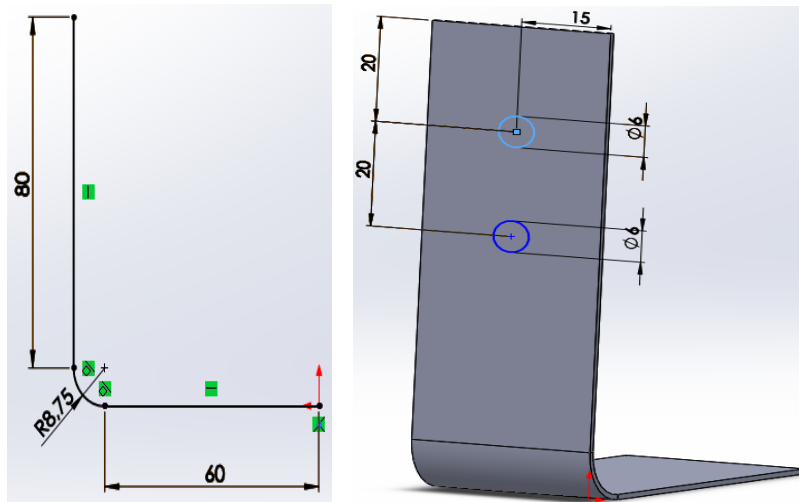
#### 4.3.1 Çözülen Sorunlara Örnek – Temas Problemi

Simufact 5'te 2016 yılı Temmuz ayından başlanarak simülasyon denemeleri yapılmaya başlanmıştır. Buna yönelik olarak kurulmuş olan bir model örneği Şekil 4.11'de verilmiştir. Kaynak modelinde geometrik girdi verileri olarak parça geometrileri (IGES formatı) (Şekil 4.12-Örnek parça ölçü ve punta noktalarının yerleri detayı) dışında,

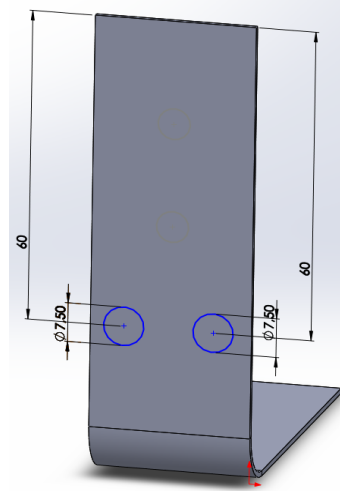
elektrod tipleri, fikstür (clamping) geometri ve noktaları (Şekil 4.13) ve bunların karşılıklarına gelen bearing geometri ve noktaları ile kaynak noktaları ve sırası verilmektedir. Elektrod olarak örneğin bu modelde üst elektrod için 'F1-13-18-50-6c5-5' elektrod tipi, alt elektrod için ise 'F1-13-18-50-6c5-6' elektrod tipi kullanılmıştır.



Şekil 4.11 Simufact Punta Kaynağı Proses model örneği

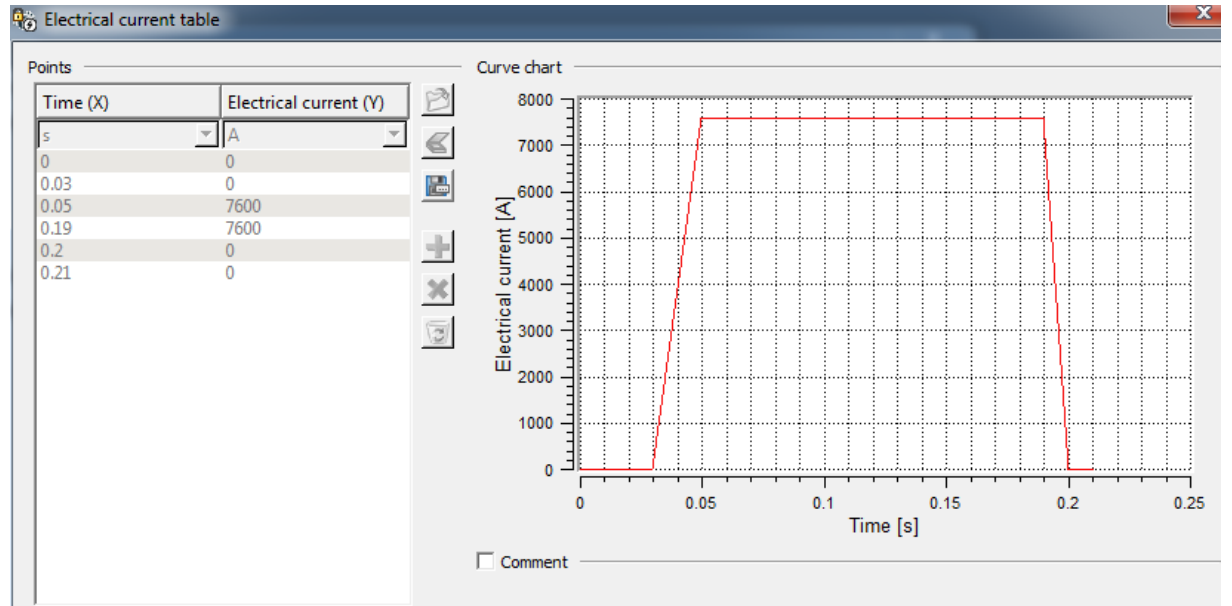


Şekil 4.12 Örnek parça (kalınlık: 1mm) ölçü ve punta noktalarının yerleri

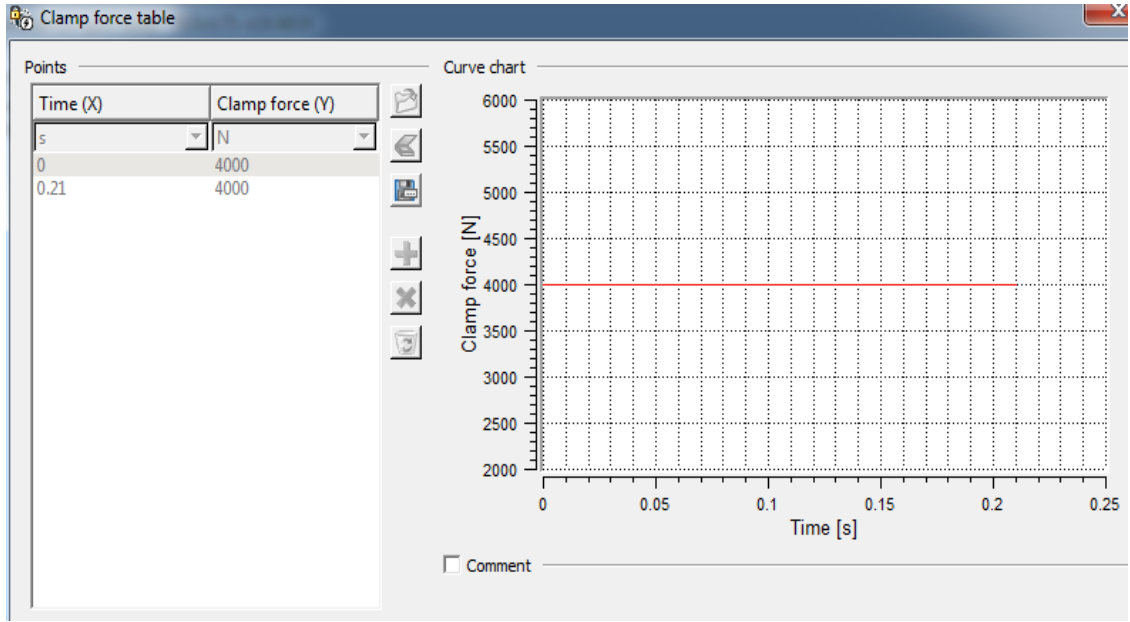


Şekil 4.13 Fikstür (clamping) geometri ve noktaları (kalınlık 4mm olarak alınmıştır; fakat bu örnek için büyük bir önem arz etmemektedir).

Bir sonraki aşamada ise punta kaynak proses parametreleri programa girilmiştir. Akım ve elektrod kuvveti parametreleri zamana bağlı olarak tanıtilmakta ve gerekli diyagramlar (Şekil 4.14-4.15) çizilmektedir.



Şekil 4.14 Zamana bağlı akım tablosu örneği



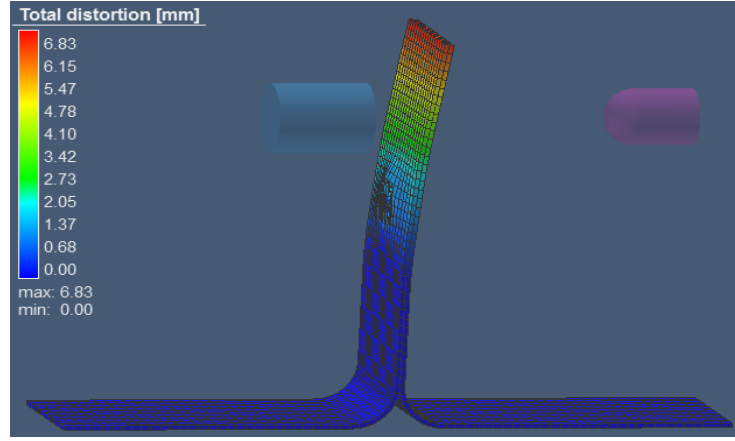
Şekil 4.15 Zamana bağlı elektrod kuvveti tablosu örneği

Yukarıda anılan örnekte Şekil 4.14 ve 4.15'te de görüldüğü üzere akım zamanı olarak 6 periyod, akım olarak 7600 A, elektrod baskı kuvveti olarak da 4000 N uygulanmıştır. Bu değerler kullanılan malzeme olarak seçilen paslanmaz çelik St 316 1mm'lik saca karşılık gelecek şekilde Mistaş A.Ş.'nin Punta Kaynağı Parametre Kılavuzundan [44] alınmıştır.

Doktora çalışmasının başında yapılan temrinlik çalışmalarda parçalar herhangi bir fikstüre bağlanmamış, parmak ile tutulmuştur. Buna uygun bir yaklaşım olarak sıkma kuvveti (clamping force) olarak 100 N; skıma rijitliği (clamping stiffness) olarak ise de 5 N/mm değerleri girilmiştir. Ayrıca birden fazla punta atılan yerlerde bekleme zamanı olarak (pause time) 1 sn seçilip; işlem bittikten sonra ise soğuma zamanı olarak 10 sn beklenip, sonuçlar bundan sonra irdelenmiştir.

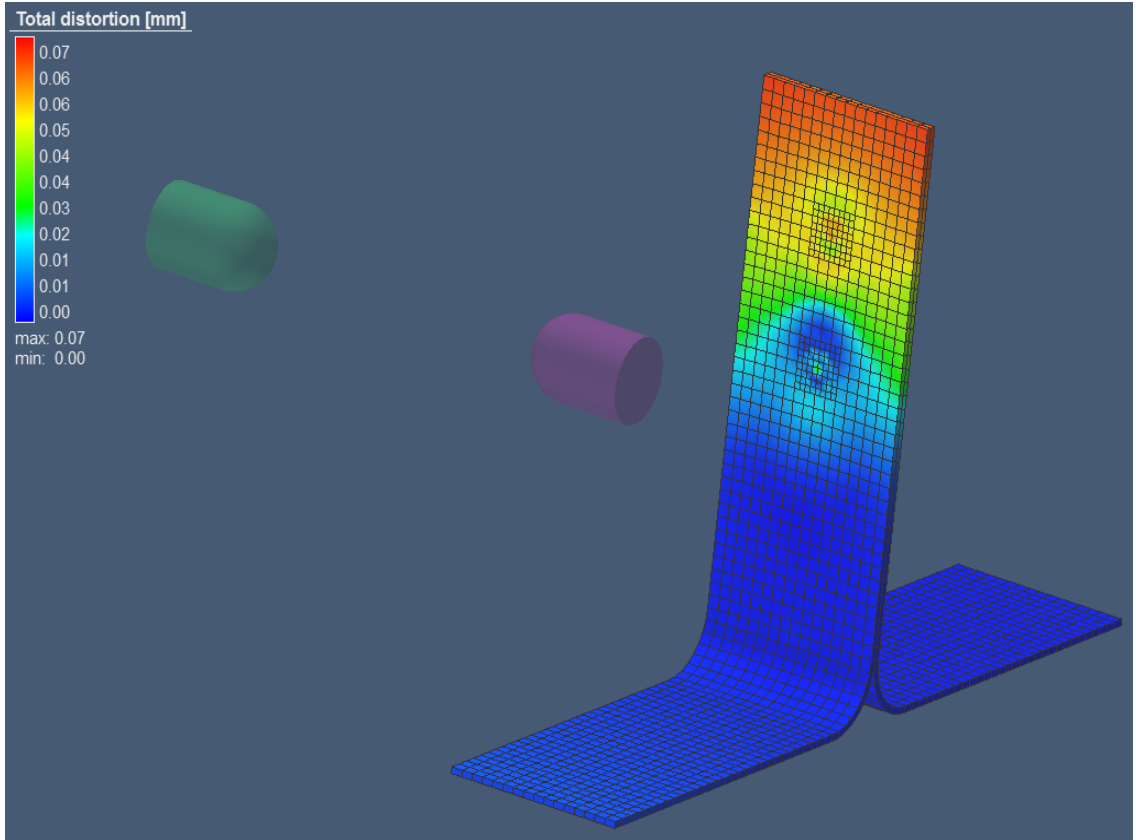
Parametreler ve elektrod uç çapları sanayideki gerçek uygulamalarının aynısını teşkil edecek şekilde kılavuzlardan seçilmiştir. Buna rağmen oluşturulan simülasyon koşturmamıştır. Bazı ufak parametre değişiklikleri yapılsa da simülasyon ya yine koşturmamış ya da kısmen koşturmamıştır. Bunun üzerine Simufact yetkilileri elektrod geometrilerinin uymadığını veya uygulanan elektrod kuvvetinin çok büyük olabileceğini belirtmişlerdir. Büyük akım ve büyük elektrod kuvveti ile birlikte parçanın ezildiğini ve simülasyonun belli bir adımdan (Örnek: Şekil 4.16) sonra koşturmadığını söylemişlerdir. Halbuki değerler kılavuzlardan yani gerçek uygulamalar üzerinden alınmıştır.





Şekil 4.16 İlk punta noktasından sonra simülasyonun durduğu an ve çok büyük yanlış distorsiyon sonuçları

Bunun üzerine değişik elektrod, akım ve kuvvet değerleri ile başka simülasyonlar düzenlenip bunların koşturulması denenmiştir. Kuvveti düşürdükçe ve alt elektrod uç formunu düzleştirip çapını büyüttükçe simülasyon yine tamamen tam koşmamış fakat %44'e kadar varan kısmı koşabilmiştir. Kuvvet 100 N'a kadar indirildiğinde ise simülasyonun tamamen koştugu (Şekil 4.17) gözlemlenmiştir.



Şekil 4.17 Simufact.Welding 5.0'da Punta Kaynağı Sonrası Distorsiyon Sonuçları

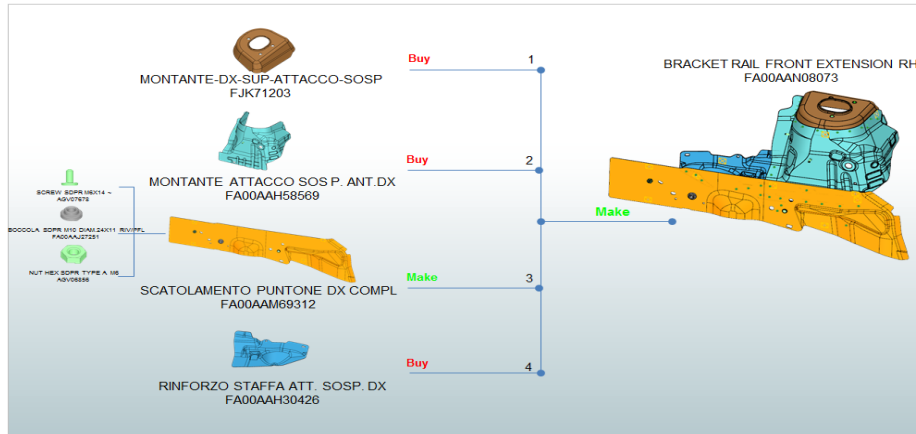


Simufact ile daha sonra yapılan temaslar sonucunda da burada asıl sorunun temas problemi olduğu belirlenmiştir. Bu sorun Aralık ayında yeni sürümü çıkarılan Simufact Welding 6.0'da düzeltilmeye çalışılmıştır. Bunun üzerine yeni sürüm yüklenerek bu sürüm üzerinden yeni simülasyonlar koşulmuştur. Bir önceki sürümde koşmayan simülasyonların hepsi bu sürümde koşmuştur. Temas probleminin büyük ölçüde çözüldüğü görülmüştür. Yeni sürüm üzerinden, distorsiyon üzerinde parametre etkilerini görmek için değişik denemeler yapılmıştır.

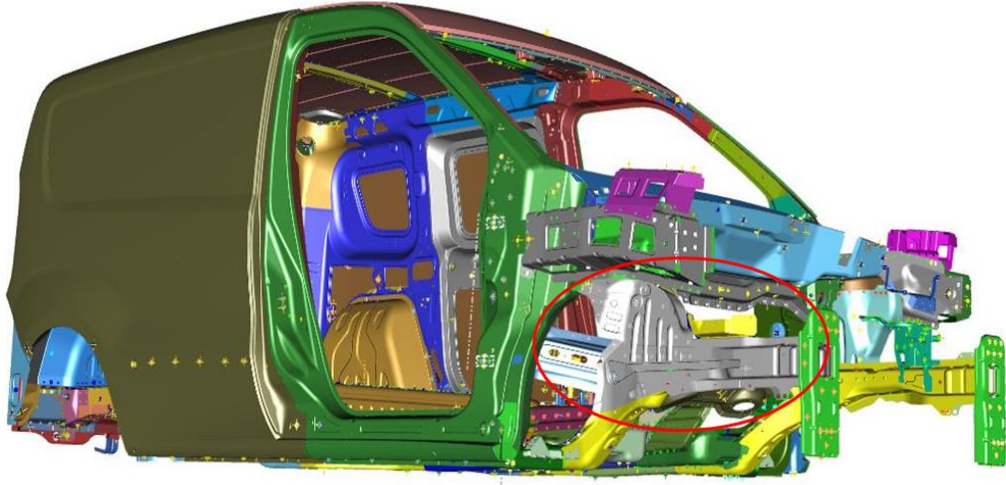
#### 4.4 TOFAŞ Endüstriyel Uygulama Örneği

##### 4.4.1 Kaynak Uygulaması

Genelde ikiyeşli gruplar ve temrinlik parçalar için yapılan distorsiyon incelemesinin gerçekte endüstride nasıl geliştiği ile ilgili bilgisi ortaya koyma ihtiyacı duyulmuştur. Tezin başında da sac parça üretici ve otomotiv firmaları olmak üzere çeşitli sanayi kuruluşları ziyaret edilmişti. Buralardan da konunun sac parça endüstrisi önem taşıdığı ve bu konudan kaynaklanan sorunların üreticiler için çözülmesi gerekli önemli konular haline geldikleri belirtilmiştir. Buna yönelik olarak TOFAŞ'ta Şekil 4.18 ve 4.19'da gösterilen 4 tekil parçadan oluşan Fiat USA Doblo'ya ait 'Sağ Ön Şasi Kolu Alt Komitesi' incelenmek üzere ele alınmıştır.



Şekil 4.18 'Doblo USA Sağ Ön Şasi Kolu Alt Komitesi' ve kapsadığı tekil elemanlar



Şekil 4.19 Komplenin Doblo USA model araç üzerinde gösterimi



Şekil 4.20 Örnek Alınan Montaj Grubunu Oluşturan Tekil Parçalar

Tekil parçaların (Şekil 4.20) malzemeleri HSLA çelikleri olup kalınlıkları ve kaliteleri şu şekildedir:

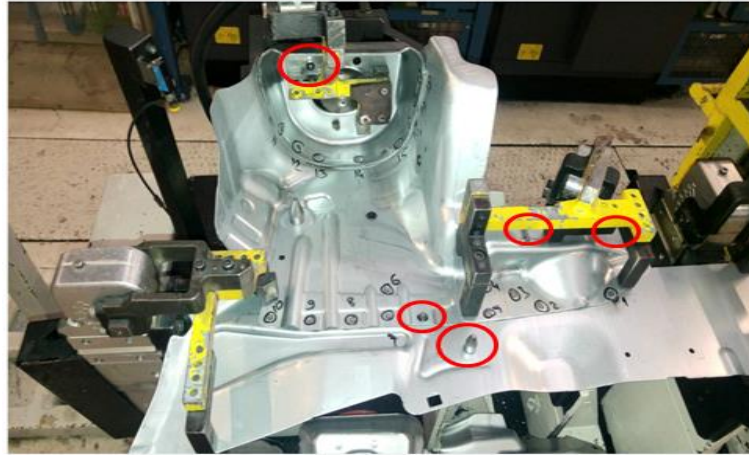
- 1.8 mm FEE 340 F ZNT/F/10/2S
- 1.6 mm FEE 220 BH ZNT/F/10/2S
- 3 mm FEE 340 F ZNT/F/14/2S

Kaynak işlemi parçaların örneği Şekil 4.21’de gösterilen fikstürlere bağlanması sonrası gerçekleştirilir. Kaynak işlemi 29 puntadan oluşmaktadır. İlk 18 puntadan sonra fikstür

grubundan parçalar alınıp ikinci bir fikstür grubuna bağlanmaktadır. Bu sırada bazı sınırlandırmalar saf dışı bırakılmaktadır (Şekil 4.22).

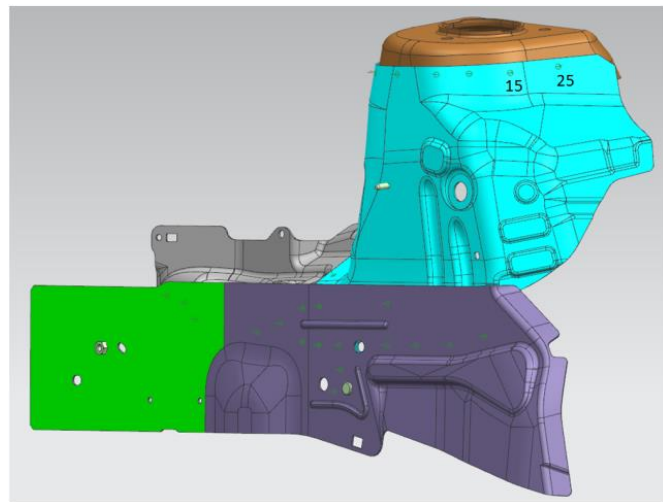
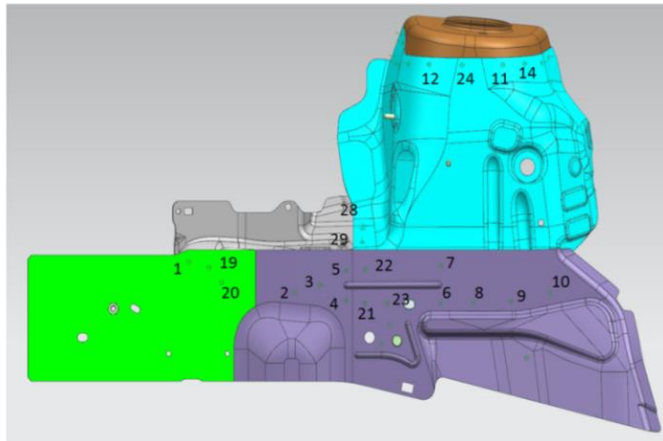
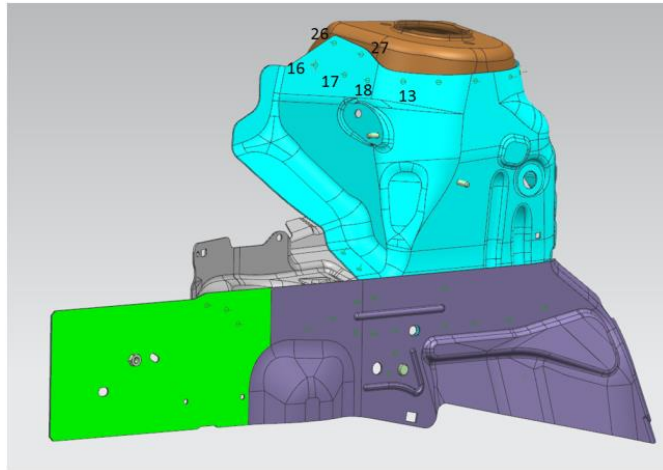


Şekil 4.21 İlk Kaynak Adımı

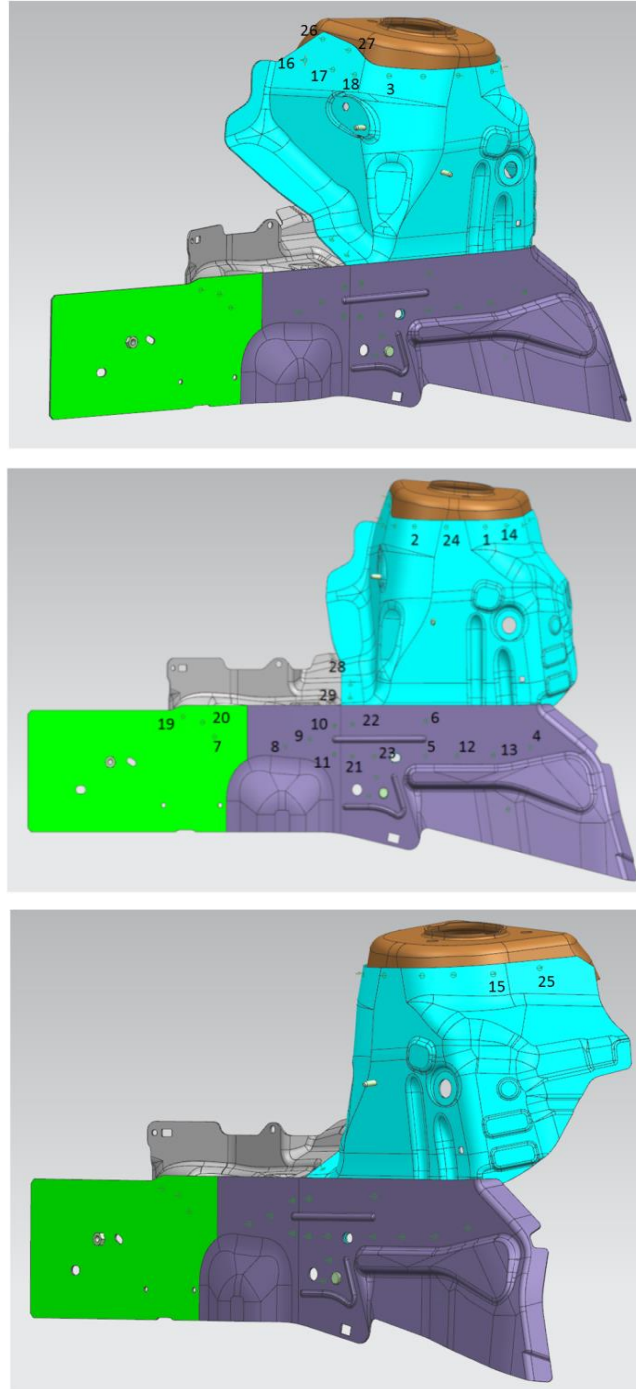


Şekil 4.22 İkinci kaynak adımı için elemine edilen sınırlandırmalar

TOFAŞ'ta kaynak işlemi sırasında iki sıra uygulanmıştır (Şekil 4.23). Bu sıralar parçaların hat üzerindeki kaynak işlemleri izlenerek oluşturulmuştur. 2. Kaynak sırasında komplede yukarıdaki tekil parçalardan kaynağa başlandığı görülmektedir.



Sıra 1



Sıra 2

Şekil 4.23 Montaj grubu için uygulanmış kaynak sıraları

TOFAŞ'tan incelemek üzere verilen komple sayısı 20 idi. Buna göre hem kaynak parametrelerinin (kaynak akımı, kaynak zamanı ve elektrod kuvveti) hem de kaynak sırasını değiştirmenin etkisini görmek için optimum tasarıma gidilmiştir. Buna yönelik proses katsayılarını da hesaplayabilmek için toplam 8 deney basamağında 2 farklı

kaynak sırası uygulanmıştır. Diğer 12 basamakta ise 3x2x2 lik Tam Faktöriyel deney tasarımı esaslarına uyulmuştur. Akım 3 seviye (8600-9100-9600 A), diğer parametreler 2 seviye (9-10 Periyot; 3230-3400 N) olarak seçilmiştir. Ayrıca bu 12 adımlık deney kısmı 2 tane de 2x2x2 lik Taguchi yöntemi incelemesi barındıracaktır. İlgili deney tablosunun tümü aşağıda verilmiştir (Tablo 1). Tablonun 9. Adımdan sonraki kısmı Minitab'te oluşturulmuştur.

Çizelge 4.2 TOFAŞ'taki kaynak işlemi deney kurulum tablosu

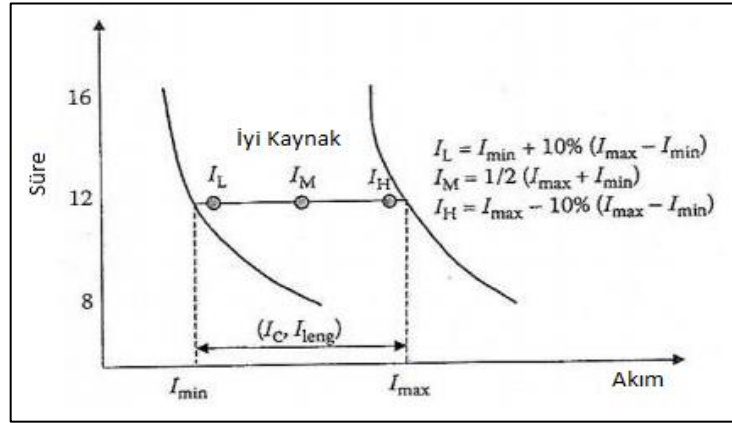
| Deney No | Akım (A) | Zaman (Per.) | Elektrod Kuvveti (N) | Sıra No | Orijinal Parametreler |
|----------|----------|--------------|----------------------|---------|-----------------------|
| 1        | 9100     | 10 (3 Pulse) | 3400                 | 1       |                       |
| 2        | 9100     | 10 (3 Pulse) | 3400                 | 1       |                       |
| 3        | 9100     | 10 (3 Pulse) | 3400                 | 1       |                       |
| 4        | 9100     | 10 (3 Pulse) | 3400                 | 1       |                       |
| 5        | 9100     | 10 (3 Pulse) | 3400                 | 2       |                       |
| 6        | 9100     | 10 (3 Pulse) | 3400                 | 2       |                       |
| 7        | 9100     | 10 (3 Pulse) | 3400                 | 2       |                       |
| 8        | 9100     | 10 (3 Pulse) | 3400                 | 2       |                       |
| 9        | 9100     | 9 (3 Pulse)  | 3230                 |         | Deney Seti            |
| 10       | 8600     | 9 (3 Pulse)  | 3400                 |         |                       |
| 11       | 9100     | 9 (3 Pulse)  | 3400                 |         |                       |
| 12       | 8600     | 10 (3 Pulse) | 3230                 |         |                       |
| 13       | 8600     | 9 (3 Pulse)  | 3230                 |         |                       |
| 14       | 9600     | 9 (3 Pulse)  | 3400                 |         |                       |
| 15       | 9600     | 10 (3 Pulse) | 3230                 |         |                       |



Çizelge 4.2 TOFAŞ'taki kaynak işlemi deney kurulum tablosu (devamı)

|    |      |              |      |  |            |
|----|------|--------------|------|--|------------|
| 16 | 9600 | 9 (3 Pulse)  | 3230 |  | Deney Seti |
| 17 | 9100 | 10 (3 Pulse) | 3400 |  |            |
| 18 | 9100 | 10 (3 Pulse) | 3230 |  |            |
| 19 | 9600 | 10 (3 Pulse) | 3400 |  |            |
| 20 | 8600 | 10 (3 Pulse) | 3400 |  |            |

Çizelge 4.2'deki değerler orijinal parametrelerden yaklaşık % 5'lik bir sapma ile belirlenmiştir. Asıl yöntem Senkara'nın kitabında [16] verilmiştir (Şekil 4.24). Bu yöntemle göre Lobe diyagramlarında sınır değerlere % 10 boyutta yaklaşılarak deney parametreleri verilebilirdi. Fakat elimizdeki malzemeler için Lobe diyagramları mevcut değildir. Zaten var olan değişik sac kalınlıkları, malzemeler ve kaplama kalınlıkları için Lobe diyagramlarına ulaşmak mümkün değildir.



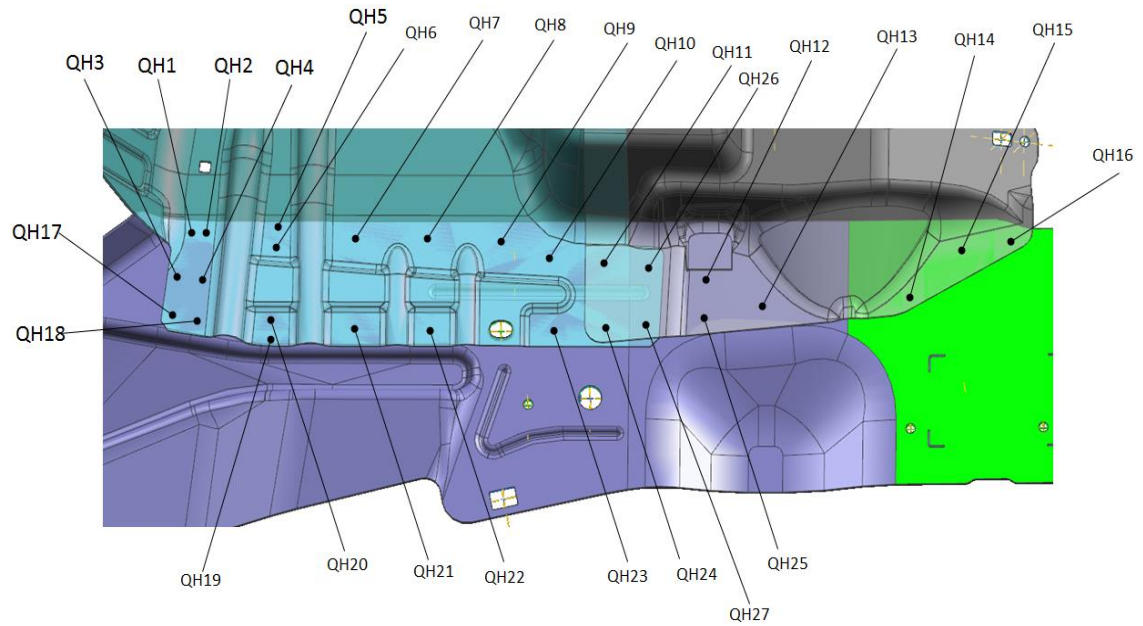
Şekil 4.24 Akım seviye parametrelerinin belirlenme örneği

#### 4.4.2 3B Tarama İşlemler

##### 4.4.2.1 Tekil Parçaların Tarama İşlemi Öncesi Hazırlık

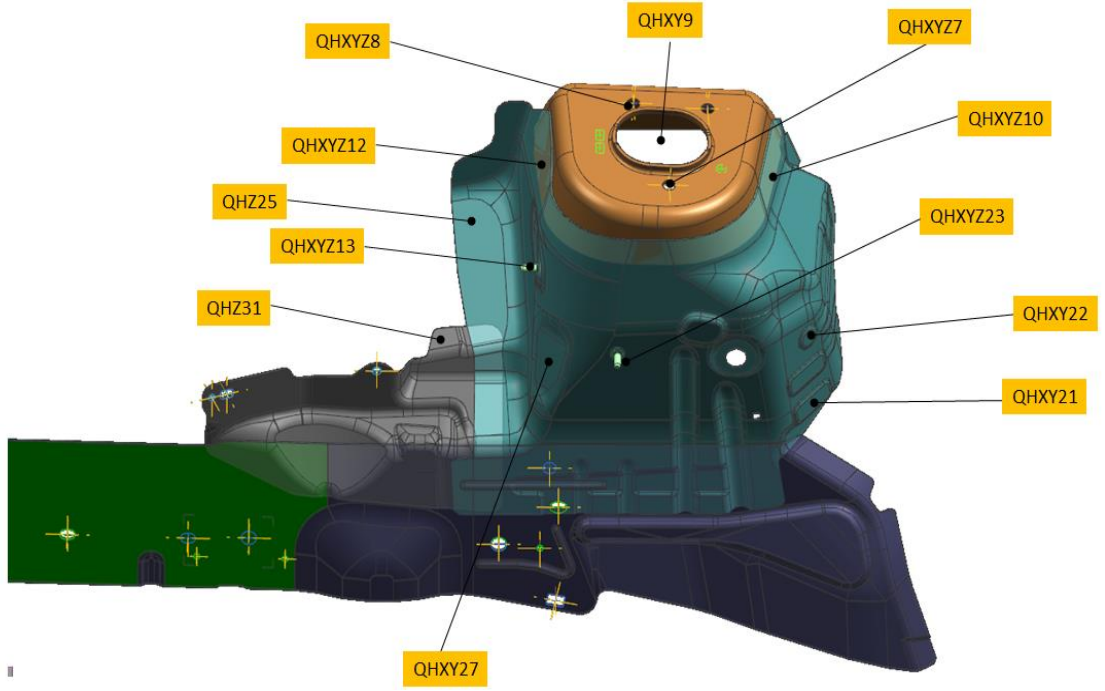
Parçaların üç boyutlu olarak taranmasına gerek duyulmamış, özellikle kopyalama bölgelerini kapsayan yüzeyler taranmıştır. Buna yönelik olarak hem parçaların teknik

resimlerinden yararlanılarak hem de kaynak bölgelerini temsil edecek şekilde karşılaştırma programında (Polyworks) gerekli olan karşılaştırma ve dolayısı ile ölçüm noktaları tespit edilmiştir. Hem tekil parçalar hem de komple için ölçüm noktaları örnekleri Şekil 4.25 ve 4.26’da gösterilmiştir. Bu noktalarda görüldüğü üzere, koordinat eksenleri hepsinde aynı verilmemiştir. Örneğin Şekil 4.25’teki noktaların sadece parça yüzeyine dik olan Y yönünde sapması olacağı düşünülmüş; bu yüzden sadece QH gösterimi ile nitelendirilmişlerdir. Bunun yanında, örneğin Şekil 4.26’daki QHXYZ12 noktasında bütün koordinat eksenlerindeki sapmalar ölçülmüştür. Bir başka örnek vermek gerekirse, QHXY9 noktasında deliğin Z eksenı yönündeki konumu saptanamayacağından sadece X ve Y eksenlerine ait veriler kaydedilecektir. Bütün tekil parçaların ve komple için gerekli tarama ölçüm noktaları bu şekilde incelenerek tayin edilmiştir. Polyworks programında yine de bütün noktalarda bütün eksenlere ait sapmalar gösterilebilecektir.



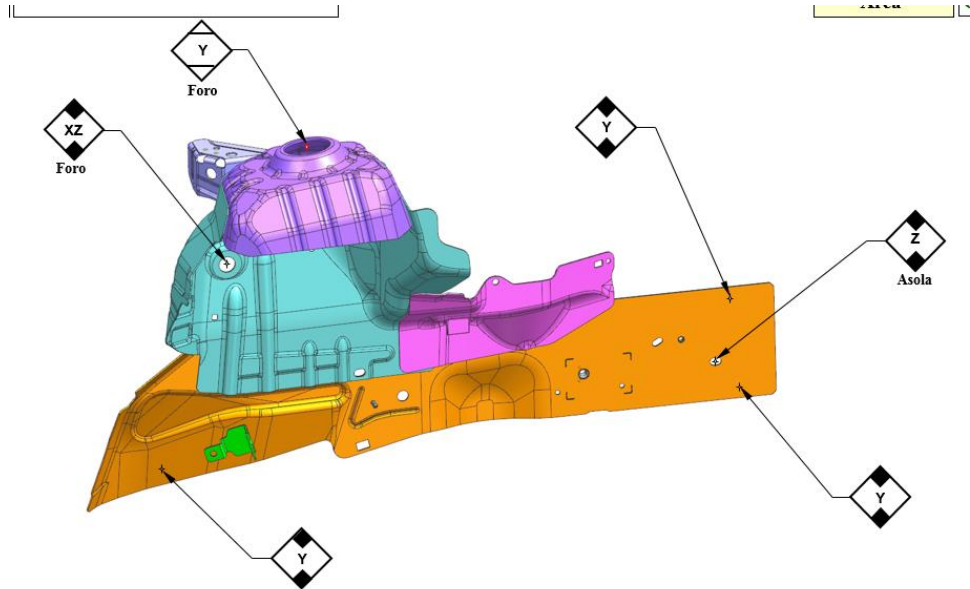
Şekil 4.25 Scatolamento Puntone ve Montante DX Atacco sosp. parçası kopyalama yüzeyleri ölçüm noktaları





Şekil 4.26 Scatolamento Puntone completo cs. için ölçüm noktaları

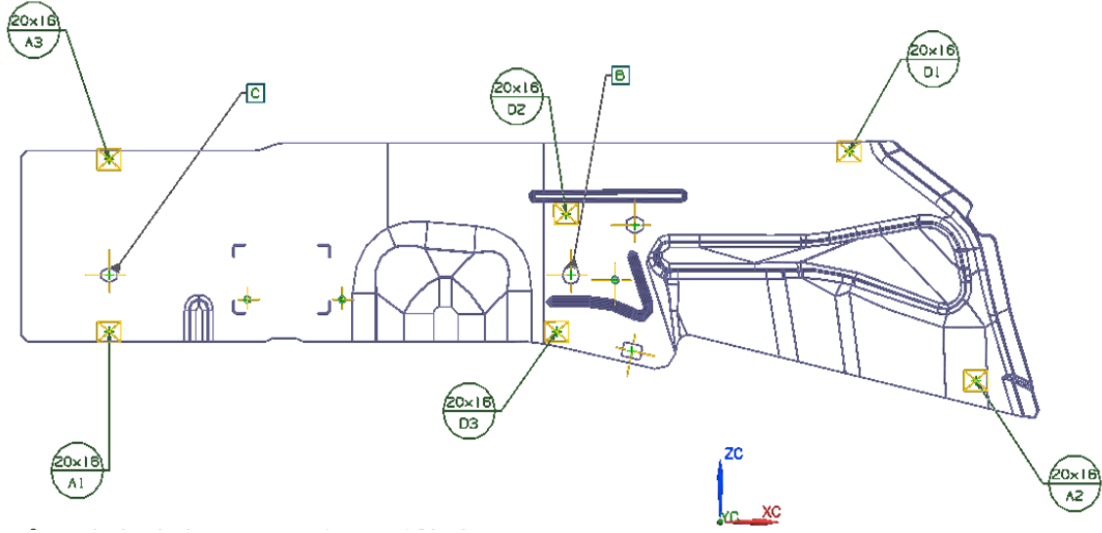
Parçaların gerek karşılaştırma analizi gerekse ölçüm sırasında sabitlenmesi referans noktalarına göre olacaktır (Şekil 4.27). Bu yüzden referans noktalarının dikkate alınması çok önemlidir.



Şekil 4.27 Komple Parçanın Referans Noktaları

Kaynak işlemi sırasında da parçaları fikstüre bağlayarak sabitleme, tekil parçaların referans noktalarını dikkate alınarak yapılmaktadır. Örneğin Şekil 4.28'deki örnekte parça, A1, A2 ve A3 noktalarında parça yüzeyine dik yönde (Y yönünde) üç noktadan

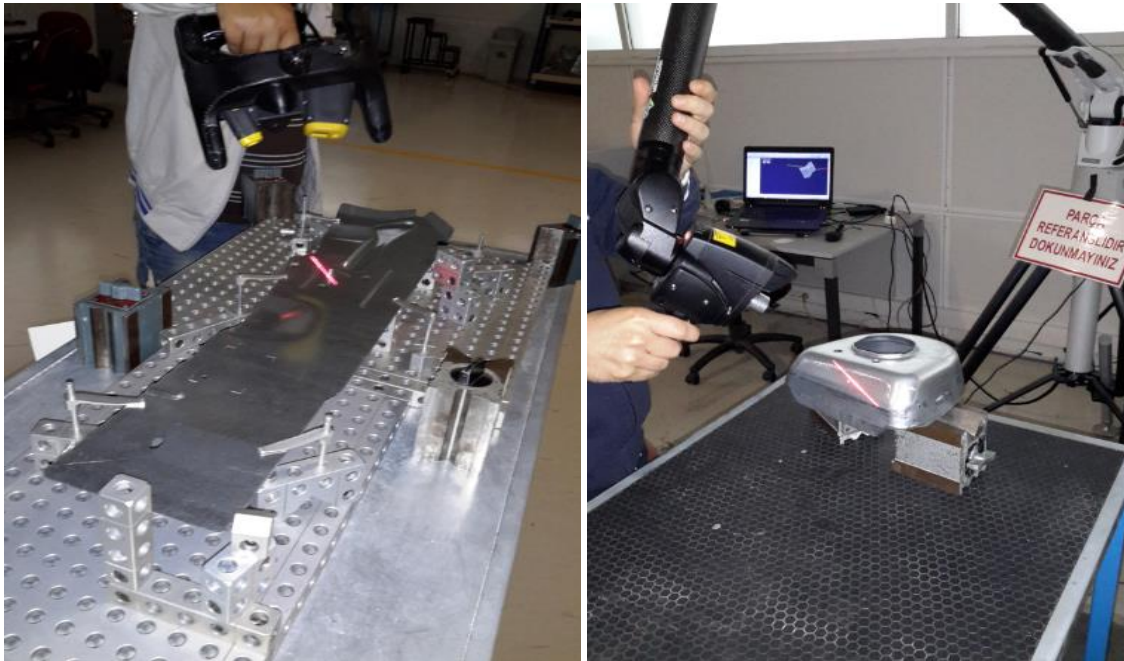
sabitlenmiştir. Daha sonra B noktasında kayma; C noktasında ise dönme hareketleri kısıtlanıp tekil parça sabitlenmiştir. Bütün tekil parçalar için böyle toplam 5 noktadan referanslama yapılmaktadır.



Şekil 4.28 Scatolamento Puntone parçasının referanslara göre fiktüre bağlanması

#### 4.4.2.2 Punta Kaynak Distorsiyonlarının Belirlenmesine Yönelik Tarama İşlemleri

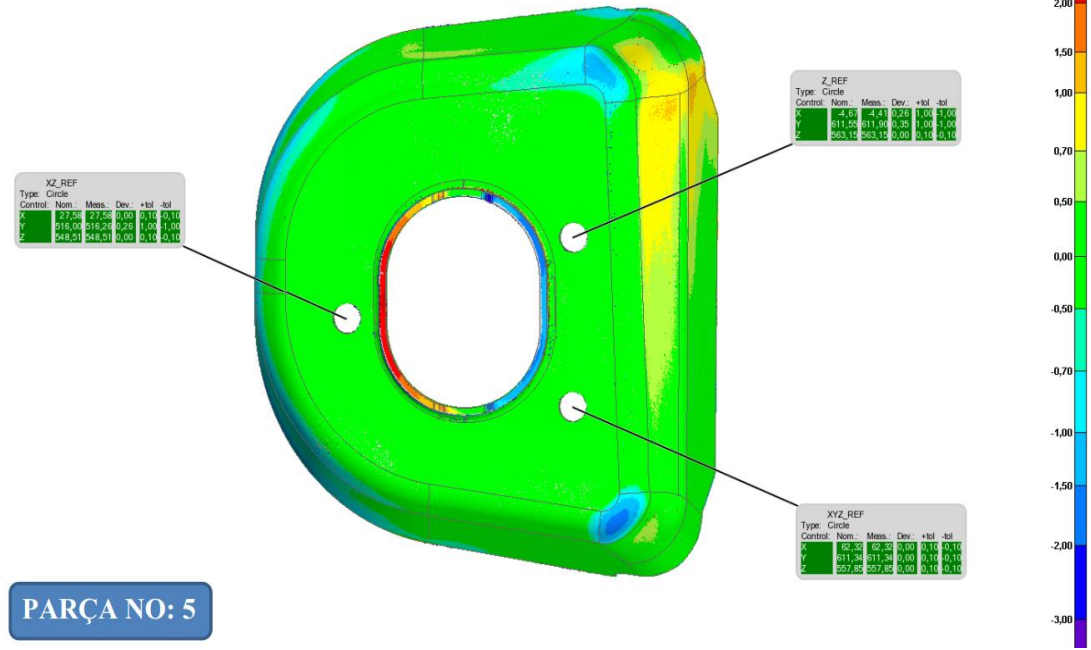
Kaynak işlemine başlamadan önce tekil parçaların montajı öncesi tarama işlemleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.29).



Şekil 4.29 Tekil Parça Tarama İşlemi Örnekleri

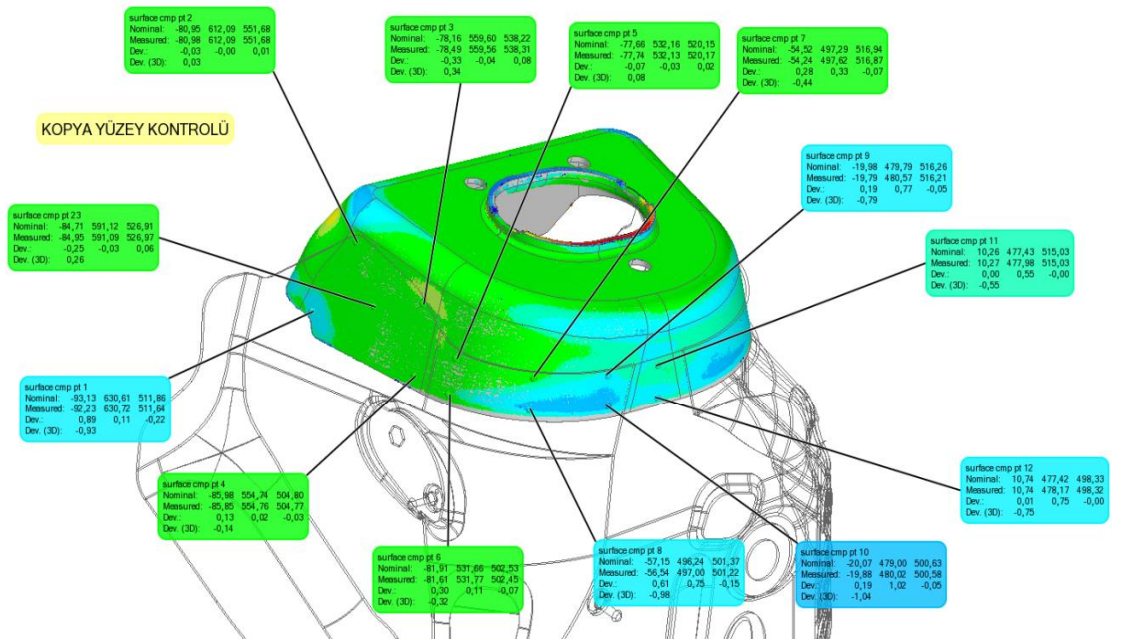
Alt kompleyi oluşturan 4 adet parçadan 20'şer adet temin ederek ölçülmeleri amacıyla TOFAŞ'ın Kalite ve Ölçme Laboratuvarı'na gönderilmiştir. Ölçümlerin tarama ile mi yoksa kritik bölgelerin prob ile belirlenmesi yolu ile mi olacağına karar vermeye gerek duyulmuştur. Yine TOFAŞ yetkilileri ile yapılan görüşmeler sonucu, bütün noktaların verisini alacağımızdan, tarama ile proba ölçüm arasında çok küçük bir hassasiyet farkı olduğundan ve proba ölçüm çok zaman alacağından tarama yöntemine karar verilmiştir. Tarama Nikon Romer RA-7535SI ve Steinbichler NDI Optotrak Pro Series 2000 marka tarama cihazları ile gerçekleştirilmiştir. Tarama için de belli karşılaştırma noktaları seçilmiştir. Ayrıca RPS çakıştırma yönteminde kullanılacak referans noktaları da kontrol edilmiştir. Buna yönelik 2 örnek aşağıda verilmiştir (Şekil 4.30-4.31). Taramalarda kopyalama yüzeyleri belirlenerek bunlar taranmıştır. Kopyalama yüzeylerinden kasıt punta kaynağı sırasında birleşecek yüzeylerdir. Böylece distorsiyonlara ulaşma yolunda ilk veri elde edilmiş olmuştur. Bu veri şekillendirme sonrası CAD datasından sapmaları bize sunmaktadır.

# REFERANS NOKTALARININ KONTROLÜ

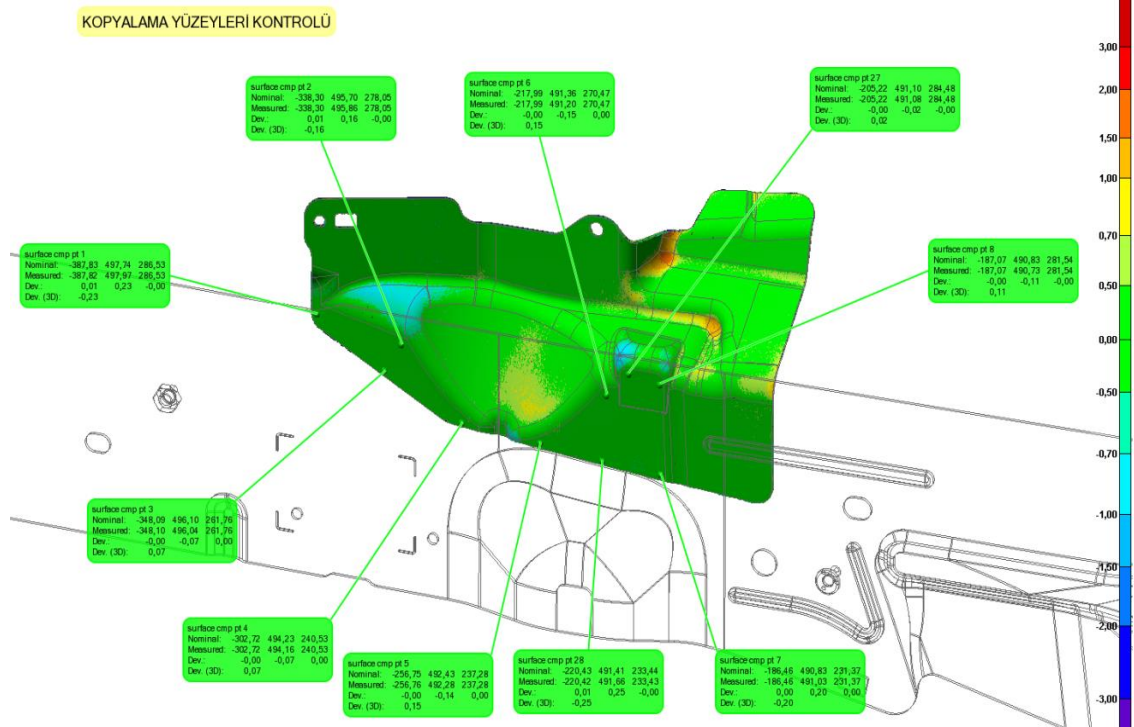
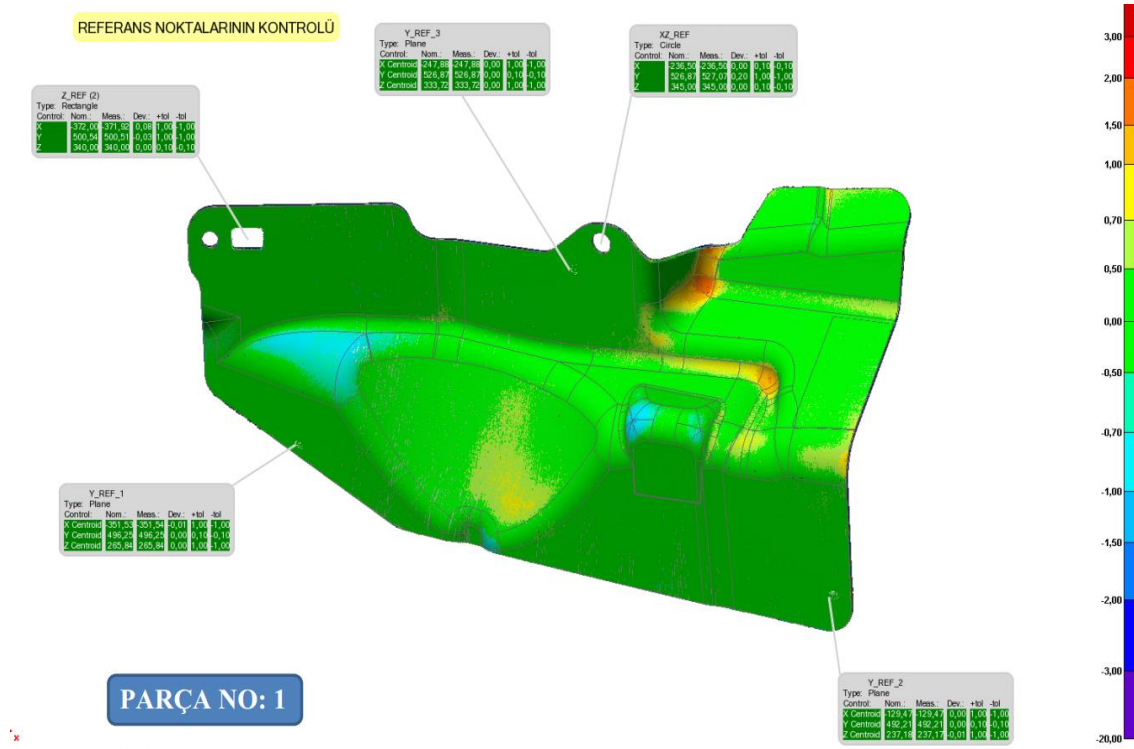


# PARÇA NO: 5

# KOPYA YÜZEY KONTROLÜ



Şekil 4.30 TOFAŞ-Tarama Sonucu Örnekleri-1



Şekil 4.31 TOFAŞ-Tarama Sonucu Örnekleri-2

Punta kaynağı sonrası distorsiyonların ve yüzeysel deformasyonların belirlenmesi amacıyla, bu işlem sonrası elde edilen veri ile montaj sonrası komplekslerin tarama

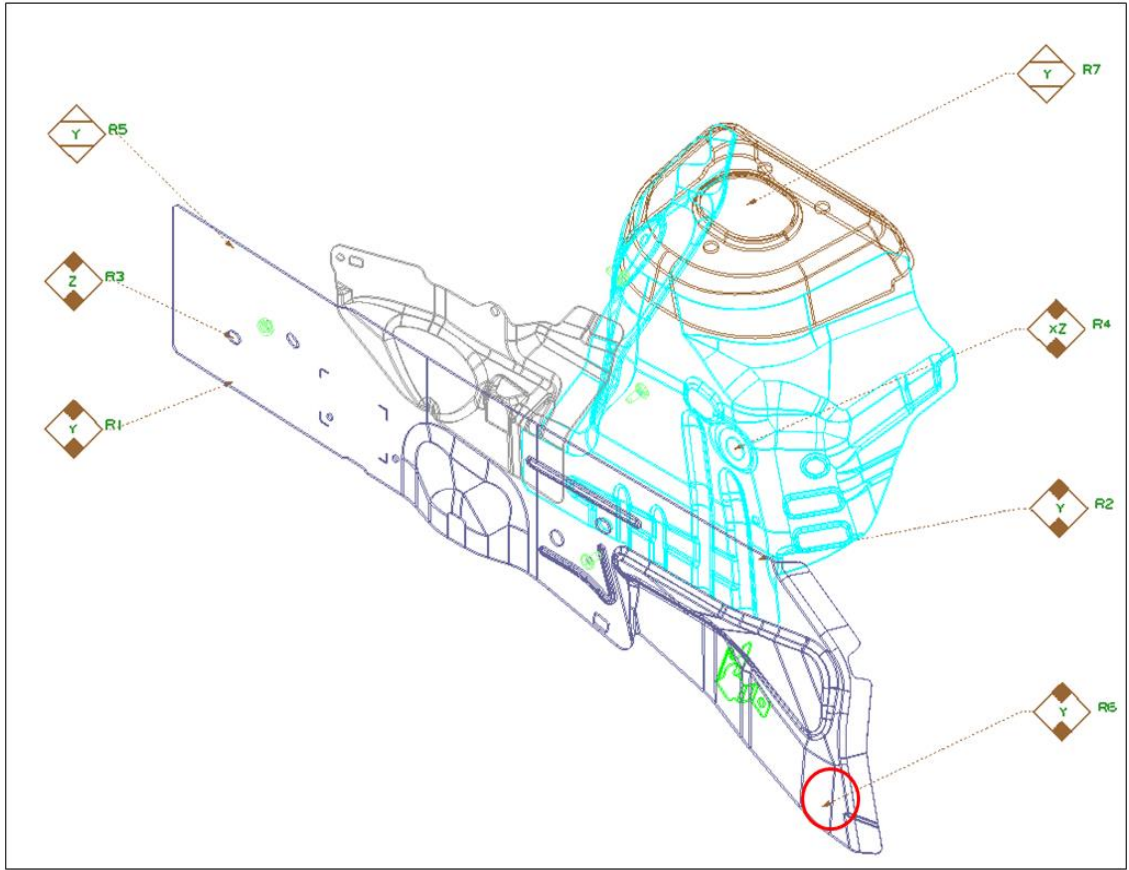


verilerinin çakıştırılması gerekmektedir. Bu montaj gruplarının tarama işlemi yine Romer marka lme kolu tarama cihazlarında gerçekleştirilmiştir (şekil 4.32).

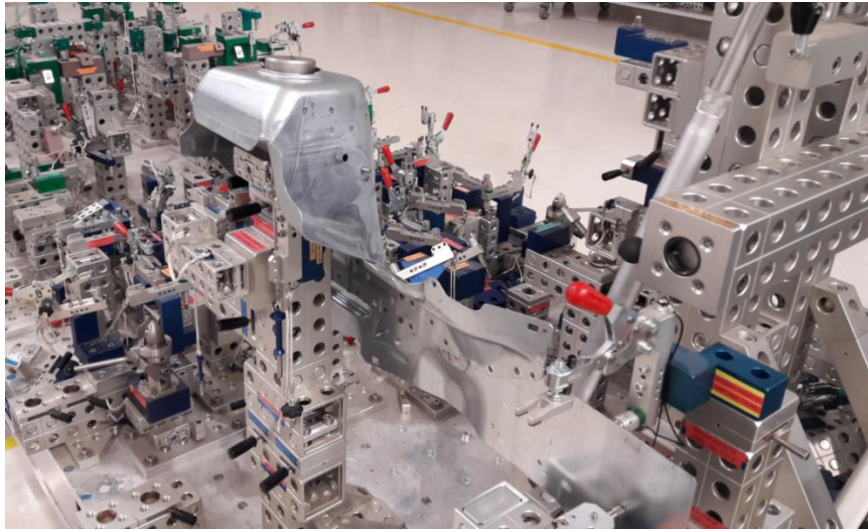


şekil 4.32 Bir Komple Tarama rneği

Tarama işleminde fikstürleme (*clamping*) büyük önem taşımaktadır. Fikstrleme teknik resimlerde verilen yönlere ve bölgelere göre yapılmıştır (şekil 4.33 – 4.34). Zaten tekil ve montaj sonrası verilerin çakıştırma işlemi Polyworks programında başta çeşitli referans noktalarına göre yapılırken yine bu fikstürleme bölgeleri dikkate alınmaktadır.

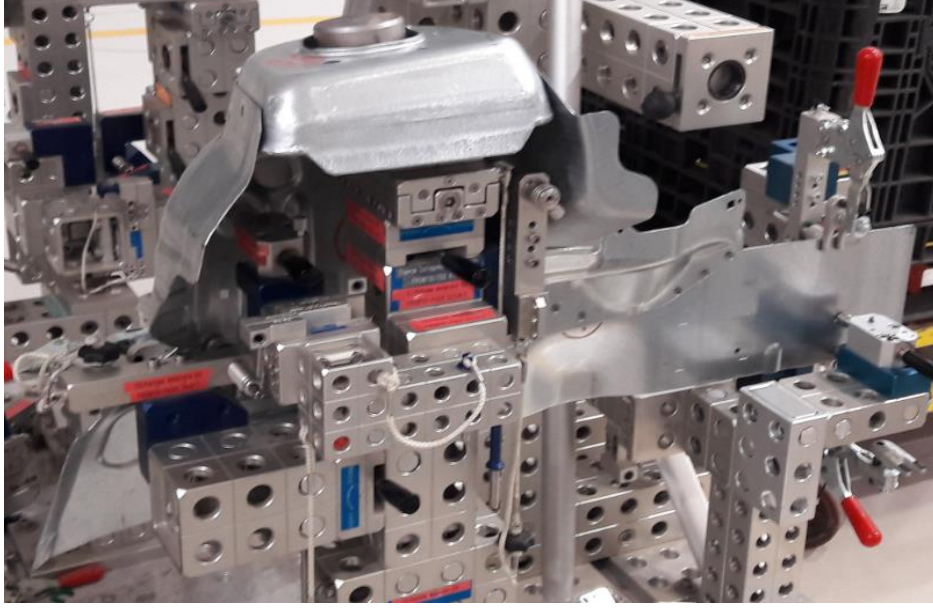


Şekil 4.33 Komple için geçerli referans noktaları



Şekil 4.34 Tarama öncesi komplenin fikstürlenmesi

Fikstürleme yaparken bazı geometrik kısıtlamalara göre referanslandırma da yapılamamaktadır. Fakat yine de parçanın 3-2-1 prensibine göre 3 düzlemden hareketinin kısıtlandığından kesin olarak emin olunmaktadır. Burada Şekil 4.33'te kırmızı ile işaretlenmiş olan Y'deki 4. Fikstür bölgesi atanamamıştır (Şekil 4.35).

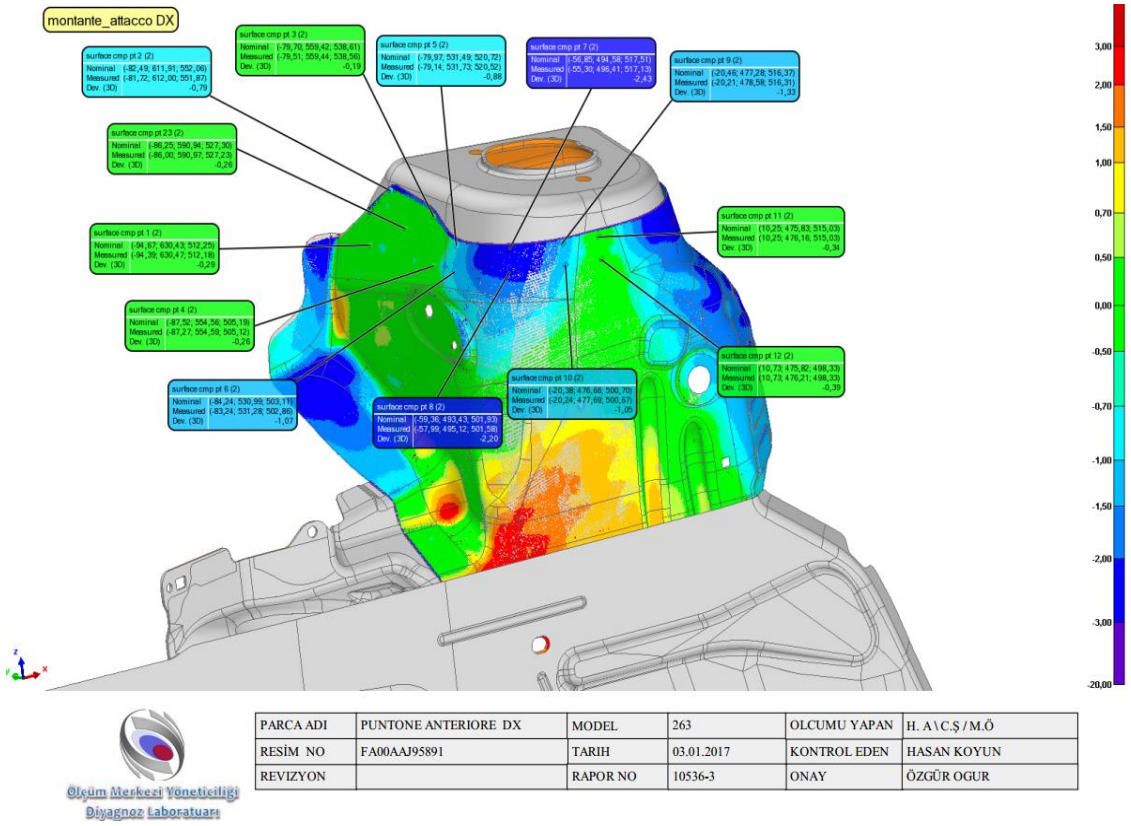


Şekil 4.35 Fikstürün atanamadığı örnek

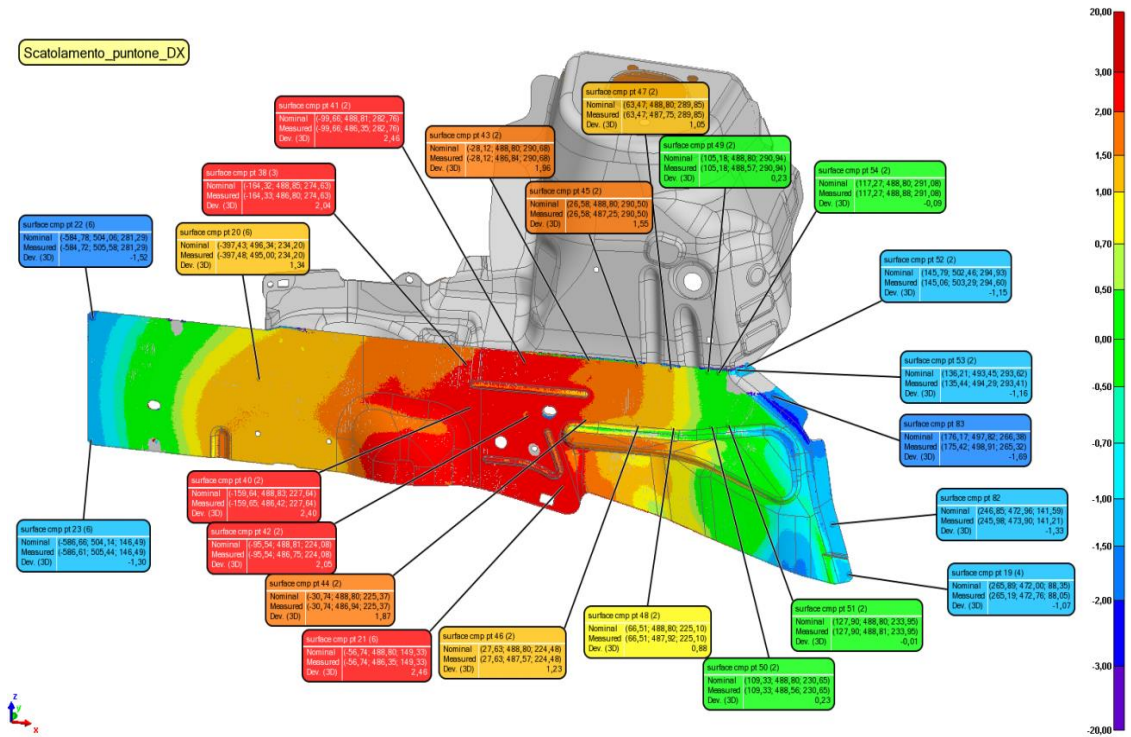
#### 4.4.2.3 Verilerin Çakıştırılması ve Taramaların Raporlanması

Montaj gruplarının tarama datası belli referans noktalarına göre CAD datası ile çakıştırılmış ve her bir tekil parça için ve önceden belirlenmiş çeşitli noktalara göre tarama raporları hazırlanmıştır. İki parça için Şekil 4.36 ve 4.37’de sunulmaktadır.





Şekil 4.36 Montante Attacco DX parçası için kompledeki bir tarama ve raporlama örneği

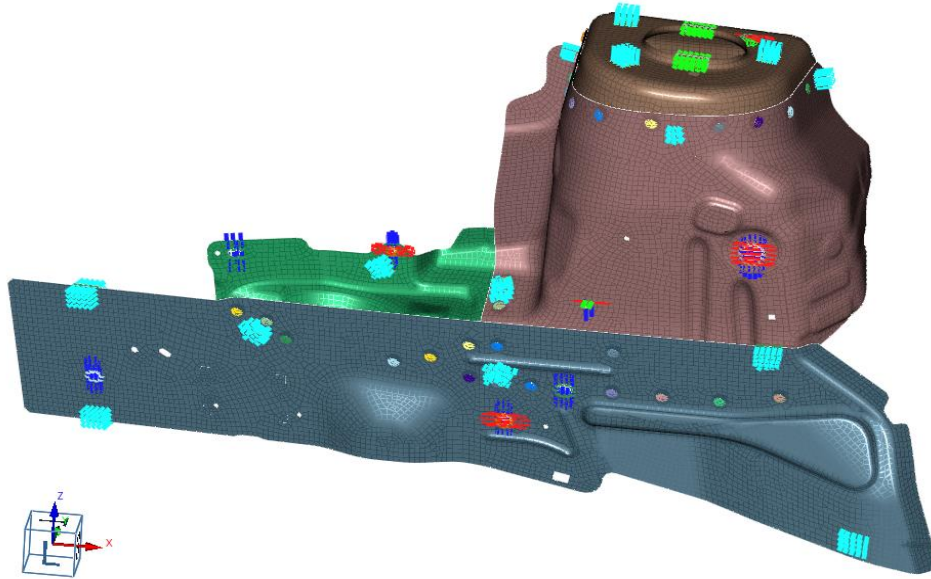


Şekil 4.37 Scatolamento Puntone DX parçası için kompledeki bir tarama örneği

#### 4.4.3 Analiz Çalışması 1

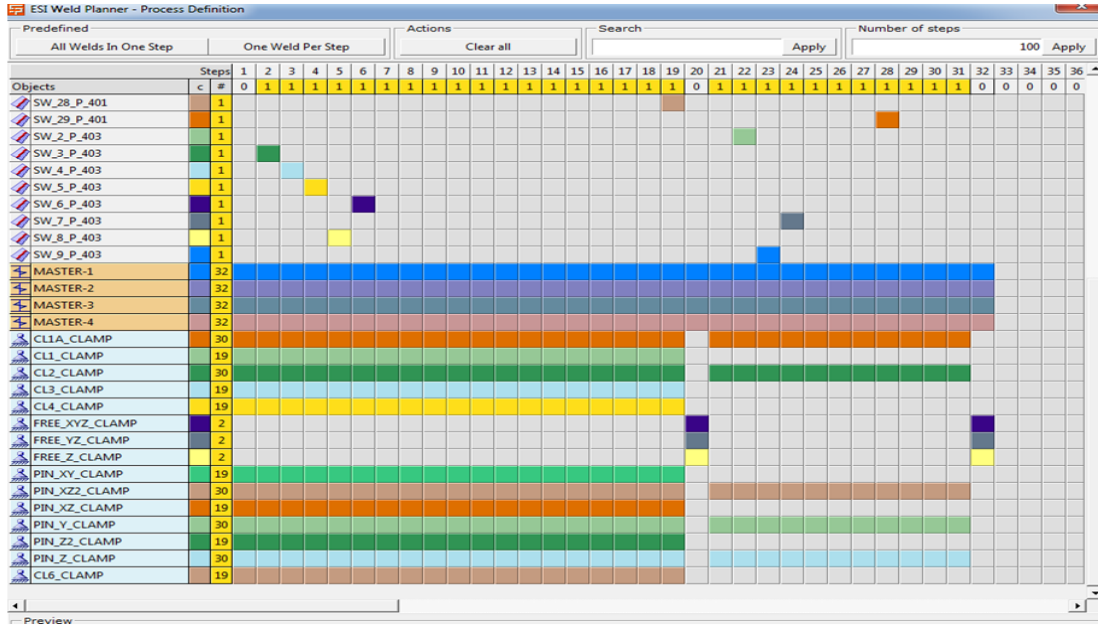
Gerekli taramalar ve karşılaştırma analizi sonucu elde edilen sapmaların karşılaştırılması için kaynak distorsiyonlarını belirlemek üzere, 'Weld Planner' kaynak analiz programına başvurulmuştur. Bu yazılım kaynak parametrelerini dikkate almadan sadece kaynak bölgesinin kaynak sonrası soğuması ve kendini çekmesi prensibi üzerinden ('local shrinkage') hesaplama yapmakta ve daha çok kaynak sırası ve fikstür noktalarını belirlemek için kullanılmaktadır. En büyük avantajı çok kısa hesaplama süresidir.

Weld Planner'daki hesaplamadan önce model hazırlığı için Visual-Mesh ve Visual Weld programları kullanılmıştır. Visual-Mesh'te komplemin IGS modelinden parçaların mid-surface'leri çıkarılmış ve mesh atılıp gerekli düzeltmeler yapılmıştır. Kaynak çekirdeği 6 mm olarak seçilip, bu bölgedeki gerekli hassas mesh Visual Weld'te otomatik olarak atılmıştır. Bu bölgenin etrafına düzgün bir şekilde layer mesh atılarak sıcaklık dağılımının hassas ve düzenli olması sağlanmıştır. Hazırlanan model Şekil 4.38'de görüldüğü gibi punta bölgeleri ve fikstür noktalarını içerecek şekilde Weld Planner yazılımına import edilmiş ve gerekli son bilgiler (malzeme bilgisi, sac kalınlıkları, fikstür yönleri) burada atanmıştır. Malzeme olarak FEE 420 bilgisine sahip olduğu için bu ilk çalışma için en yakın malzeme olarak bu malzeme atanmıştır.



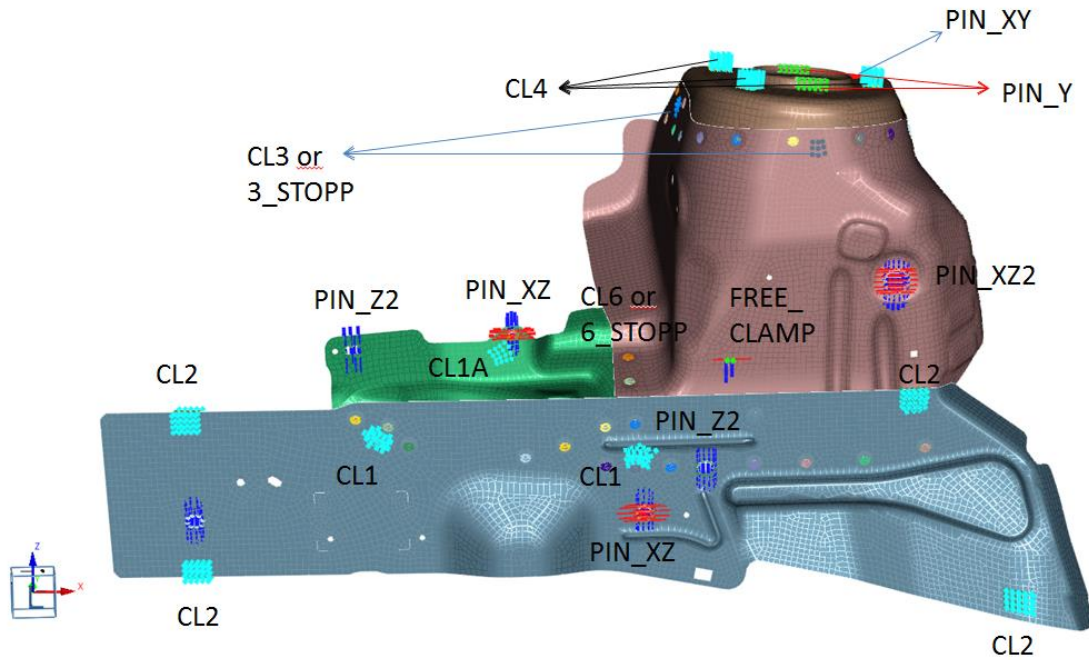
Şekil 4.38 Fikstür ve punta çapı bölgelerini içeren Weld Planner modeli

Son olarak kaynak sıraları atanmıştır. Analize yukarıda anılan iki kaynak sırası (Şekil 4.23) girilip iki ayrı analiz yapılmıştır. Kaynak sıralarının atanması sırasında birinci prosesten ikinci prosese grubun aktarılması da tanımlanmıştır (Şekil 4.39).



Şekil 4.39 Weld Planner’da Kaynak Sırası ve ilgili adımlardaki fişstür girişi

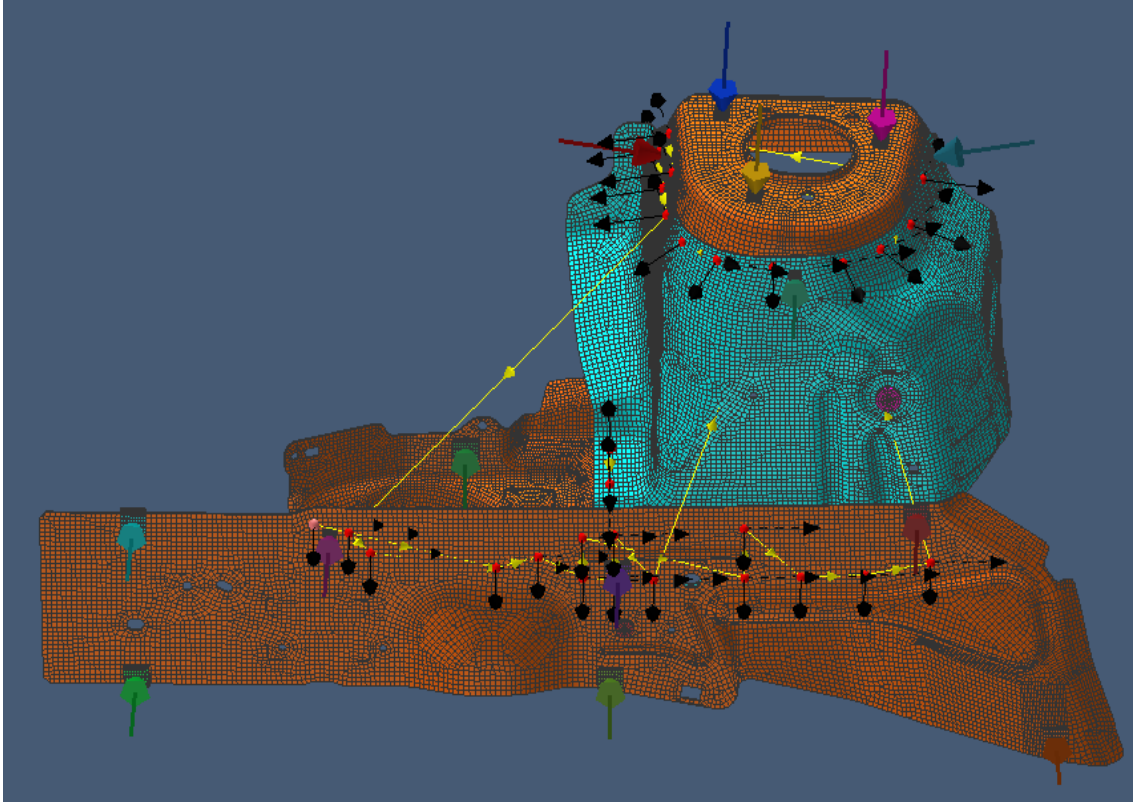
Şekil 4.39’da verildiği gibi bazı fişstürler 2. Adımda devre dışı bırakılmıştır. Bu şekilde verilen fişstürler Şekil 4.40’ta gösterilmiştir.



Şekil 4.40 Montaj grubundaki fişstürler

#### 4.4.4 Analiz Çalışması 2

Simufact yazılımında TOFAŞ'tan alınan örnek kaynak prosesi olarak gerçeğe en yakın şekilde modellenmiştir. Bu sırada yazılımdaki kaynak parametreleri, fikstürler ve kapama kuvvetleri, elektrod tipleri, punta kaynak sırası gerçeğe en yakın şekilde oluşturulmuştur (Şekil 4.41). Model kompleks bir yapıya sahip olduğundan modelin meshi oluşturulmadan önce gerekli modifikasyonlar ve tamir işlemleri MSC Apex programında gerçekleştirilmiştir.

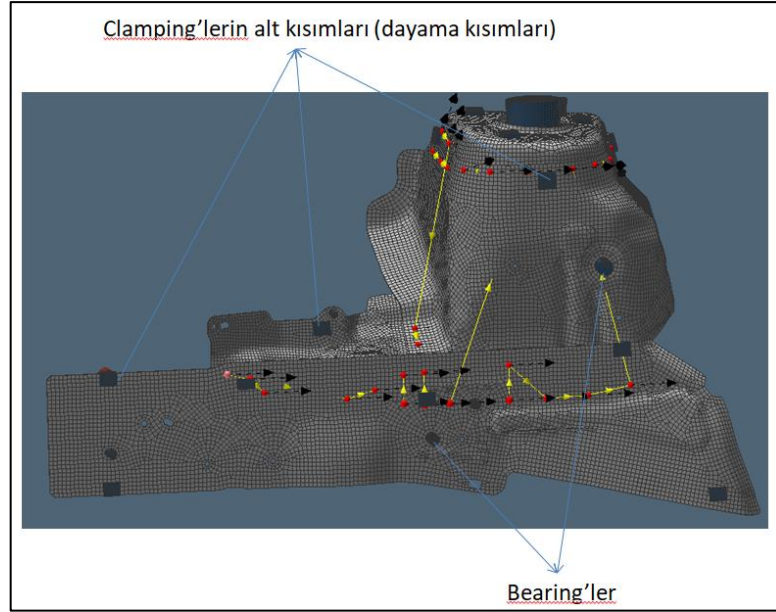


Şekil 4.41 Simufact'e girdi olarak verilecek TOFAŞ Analiz Modeli

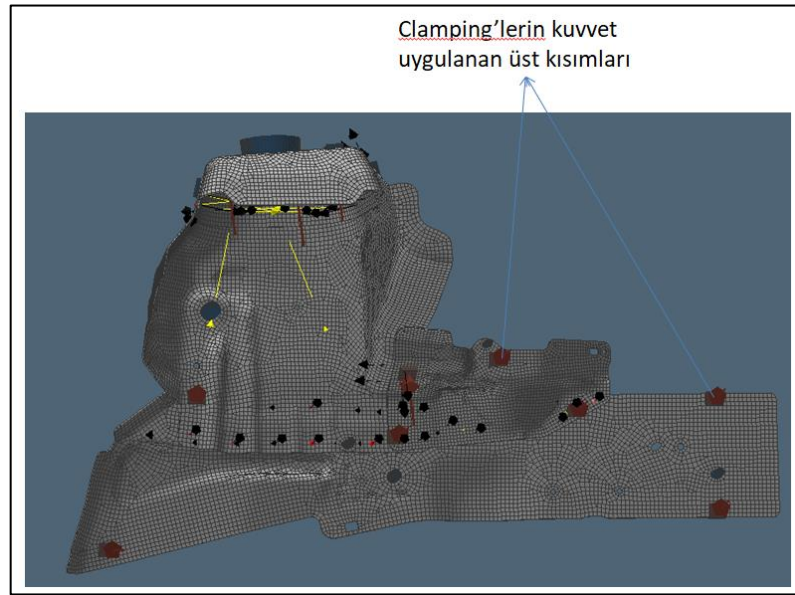
Analizler için sınır şartları hakkındaki bilgiler aşağıdaki gibi verilebilir.

Modelde tek tabakalı mesh oluşturulmuştur. Model üzerinde pensler (clamping'ler) ve dayamalar (bearing'ler) sınırlandırmalar (constraints) olarak gösterilmiştir.





Şekil 4.42 Clamping ve Bearing'lerin gösterimi



Şekil 4.43 Clamping'lerin gösterimi

Yukarıdaki şekillerde mavi ile gösterilmiş bölgeler clamping'lerdir. Aşağıdaki resimde gösterilen fikstür kuvvetleri toplam 5000 N'dur. Bu kuvvet ilgili ayaklara bölünmektedir (kuvvet gösterimleri clamping'lere dik kırmızı oklar ile). Clamping'ler parçayı iki yönden sıkıştırmaktadır. Bearing'lerde genelde pernolar görevlendirilmekte ve bu pernoların çapları Fiat normlarına göre parça deliklerinden 0.1 mm küçüktür. Şekil 4.42'de kırmızı noktalar punta noktaları; sarı ile gösterilen çizgiler ise kaynak sırasını temsil etmektedir.

#### 4.4.4.1 Kaynak Parametreleri ve Temini

İlgili kompleinin kaynağında kullanılan bütün parametre değerleri TOFAŞ Kaynak Ekibi tarafından ilişkili punta kaynak parametre formunda sunulmuştur. İkili sac bölgesi yanında üçlü sac bölgeleri için de farklı akım parametresi değerleri olup iki ayrı program punta kaynak makinasına kaydedilmekte; operatör üçlü sac bölgesinde kaynak programını değiştirmektedir. Bu değerlerin bazıları aşağıda gösterilmiştir:

*Yaklaşma Zamanı: 20 Periyod*

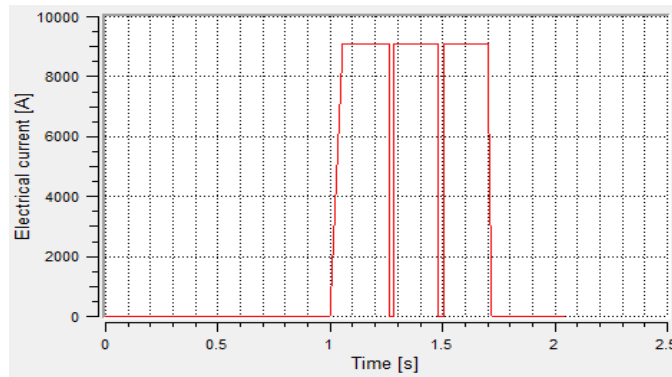
*Yukarı Rampa: 3 Periyod (Üçlü Sac Bölgesi için 4 Periyod)*

*Kaynak Zamanı : 10 Periyod (Üçlü Sac Bölgesi için 12 Periyod)*

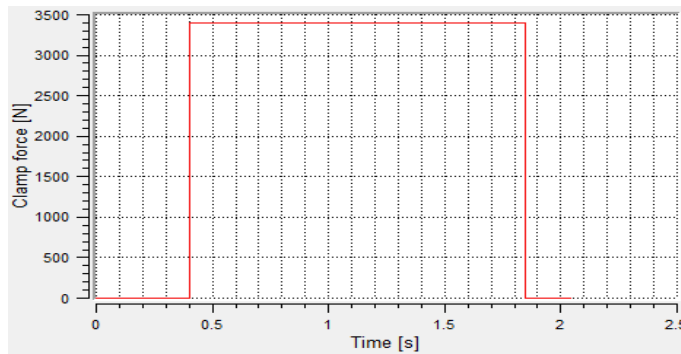
*Kaynak Akımı: 9.1 kA (Üçlü Sac Bölgesi için 10.2 kA)*

*Elektrod Sıkma Kuvveti: 3400 N*

Parametre değerlerine karşılık gelen zamana bağlı akım ve kuvvet diyagramları ise Şekil 4.44 ve 4.45'te gösterilmektedir.



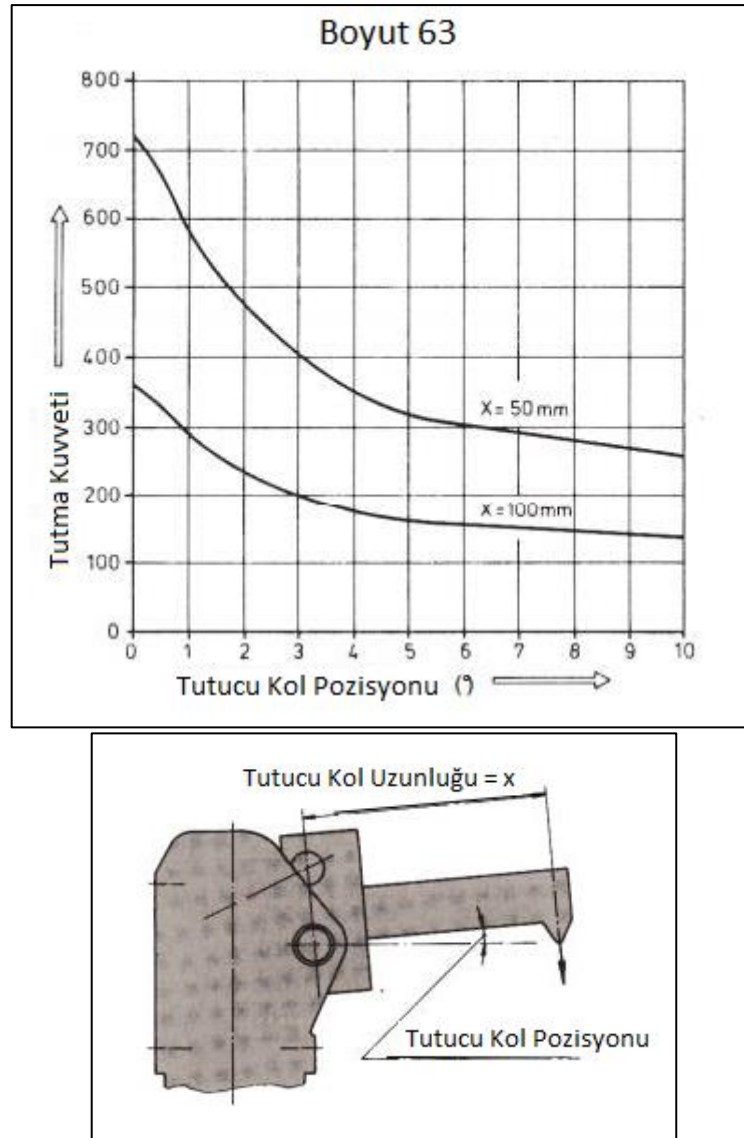
Şekil 4.44 İlgili komple için zamana bağlı akım diyagramı



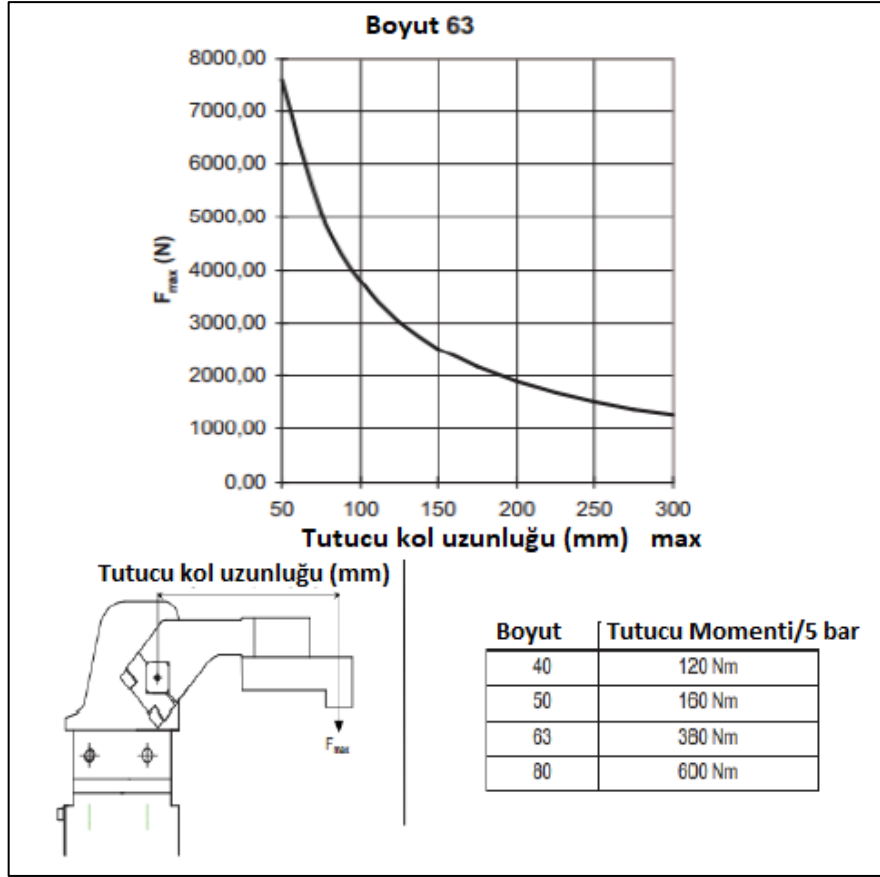
Şekil 4.45 İlgili komple için zamana bağlı kuvvet diyagramı

#### 4.4.4.2 Fikstür Özellikleri

Montaj hattında ele aldığımız parça grubunun kaynağında kullanılan fikstür elemanlarının kaynak analizinde (Simufact) modellenmesi açısından sıkma kuvvetleri ve rijitlikleri araştırılmıştır. Rijitlikleri açısından tam bir veri elde edilemese de sıkma kuvvetleri hakkında bazı model araştırmaları yapılmıştır. Öncelikle, Tünkers marka S63 marka fikstür kullanıldığı öğrenildiği için bu model hakkında bilgi toplanmıştır. Şekil 4.46 ve 4.47'den de görüldüğü üzere bu kuvvet tabii öncelikle pnömatrik silindirin basıncından, daha sonra ise kol uzunluğu ve açılma açısından etkilenmektedir.

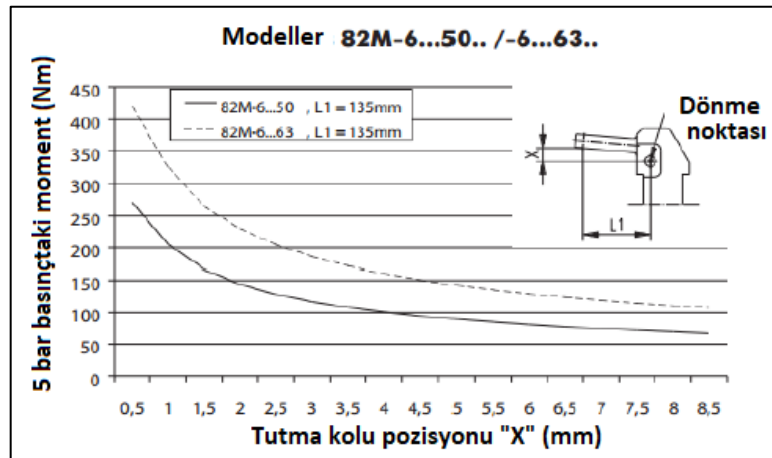


Şekil 4.46 Fikstür Açılma Açısına karşılık Sıkma Kuvveti (*Clamping Force against opening angle*) - Tünkers Marka



Şekil 4.47 Kol Uzunluğuna karşılık Sıkma Kuvveti (*Clamping force against length of clamping arm*) - Tünkers Marka

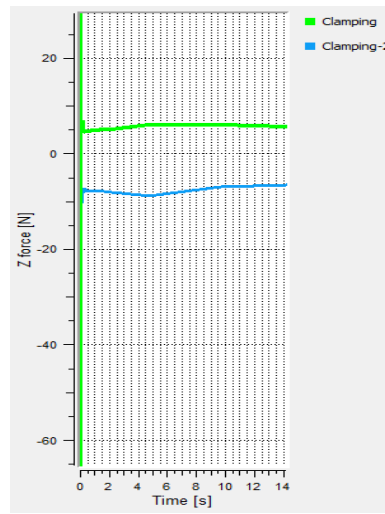
Çalışmanın ilerleyen döneminde, montaj hattında TOFAŞ Metod Ekibi ile görüşülüp hattın o kısmında Destaco marka fikstürlerin kullanıldığı tespit edilmiştir. Modeller tek tek belirlenmiş olsa da aralarında çok fazla yoktur ve 6 bar'lık yine '63' model fikstür kullanılmaktadır (Şekil 4.48). Anılan ekip ile yapılan görüşmelerin sonunda model için sıkma kuvvetinin genelde 5000 N olarak alınmasına karar verilmiştir.



Şekil 4.48 Kol konumuna karşılık Sıkma Kuvveti – Destaco Marka



Modeller genel olarak Destaco 6 serisi olsa da birbirlerinden farklı model özellikleri vardır. Metod ekibi de tam olarak açılma açısına ve kol uzunluklarına ve bütün modellerin ayrıntılarına (Web'te de yok) sahip olmadığından hepsi için 5000 N kuvvet seçilmiştir. İleride Şekil 4.47'deki tablo ve diyagramdan kol uzunluğundan (moment kolu olarak varsayıp) momentten direk kuvvete geçme olasılığı vardır. Bu arada başka daha küçük parçalar için analiz yapılmış olsa da, Simufact'te 'Time History Plot' (Şekil 4.49) seçeneğinden bu fikstürlere büyük kuvvet gelmediği görülmüştür. Burada da görüldüğü gibi kuvvetler çok düşük düzeyde olup 100 N'luk fikstür kuvvetini aşmamaktadırlar.



Şekil 4.49 Fikstürlere gelen tepki kuvvetinin kaynak süreci boyunca zamana bağlı değişimi

Kaynak sırasında elektrod olarak ise DIN EN ISO 5821'e [47] göre 'G0-20-22-50-8-8-22c5' tip elektrod kullanılmıştır.

#### 4.4.5 Ultrasonik Testler

##### 4.4.5.1 Ultrasonik Testlerin Uygulanması, Sonuçlar ve Yorumlar

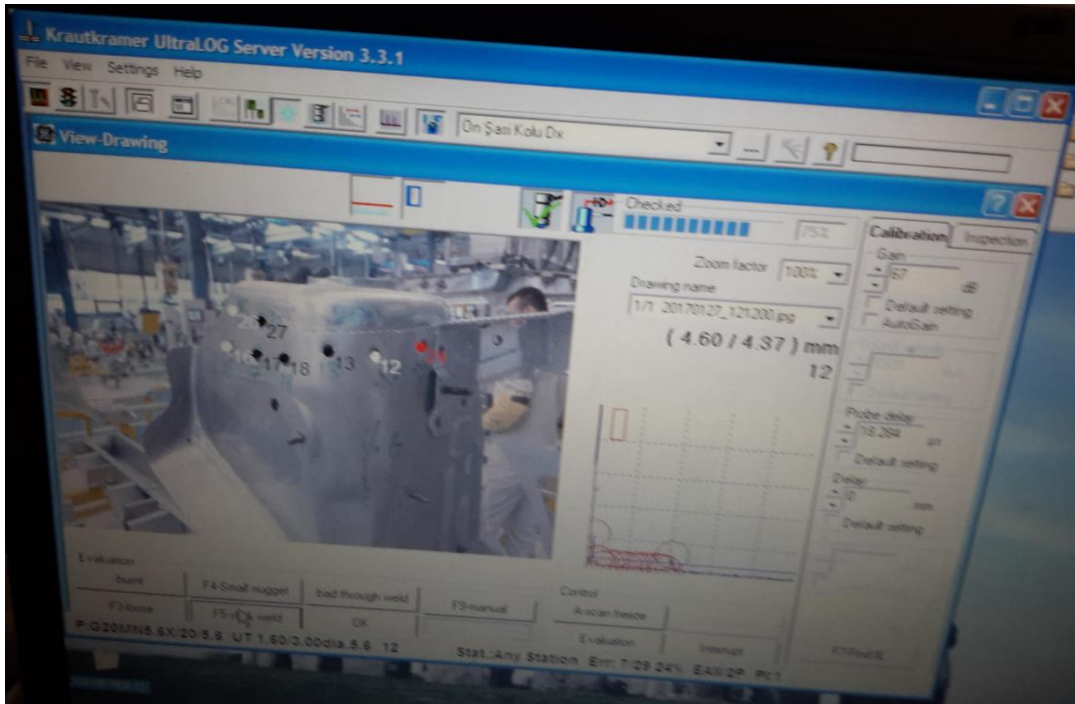
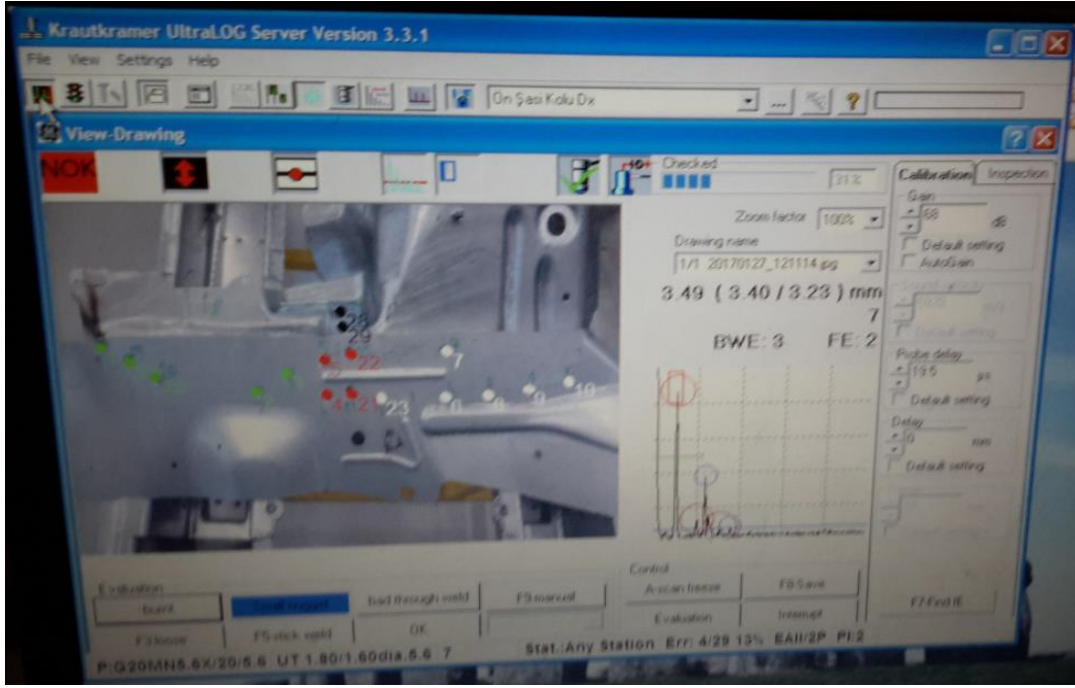
TOFAŞ'ta ele alınan parçalarda deneysel tasarıma gidilmiş ve yukarıda açıklanan sebepten ötürü yaklaşık bir parametre seçimi yapılmıştır. Buna ek olarak deney öncesi parametrelerin tayini daha önceden yapılamadığı için (*daha sonradan yapılmıştır; ileride açıklanmıştır*) oluşan puntaların sağlıklı olduğunu ve gerçek bir punta kaynağı işlemi olup oluşmadığını belirlemek gerekmiştir. Dolayısıyla sonuçları yorumlamadan

nce bütün numunelerde punta bölgelerinin hepsine ultrasonik test uygulanmıştır. Krautkramer marka cihazda probun punta noktalarına dokunması ile gerçekleştirilen uygulanan işlem rneği şekil 4.50’de gösterilmiştir.



şekil 4.50 Komplelere Ultrasonik Test uygulama rneği

Ultrasonik test uygulanmadan önce ultrasonik test uygulama nokta sırası ve kalınlıklarını içeren bir ultrasonik test planı cihazın bağlı olduğu programa tanıtılmaktadır. Programın arayüz önekleri şekil 4.51’de verilmektedir. Test sonuçları, gönderilen ses dalgalarının dalgalanması sonucu, yeterli kaynak olmadığını gösteren stick weld, küçük çekirdek olduğunu gösteren small nugget, normal ve iyi kaynak yapıldığını gösteren OK veya yanmış kaynağı gösteren burnt weld sonuçlarını vermektedir. Bu sonuçlar bir rapor halinde verilmektedir.



Şekil 4.51 Ultrasonik Test programı arayüz örnekleri

Şekil 4.51’de verilen örneğin 4.37 mm değeri puntalanan sac kalınlığı toplamının % 95 ini göstermektedir. Bu değer % 5lik bir elektrod dalma sınırı ile hesaplanmıştır. Ölçülen toplam kalınlık, bu dalma oranı düşüldükten sonra kalan değerden küçük ise yani dalma istenilen seviyede gerçekleşmiş ise stick weld ihtimali ortadan kalmış demektir.

Kaynak planında parçalar sabit kalınlıkta kabul edilmektedir. Fakat gerçekte örneğin 3 mm kalınlığındaki Montante Attacco parçasında kalınlığın 2.7 ile 3.4 mm arasında değiştiği ultrasonik test sırasında gözlemlenmiştir. Bunun üzerine başta sadece yüzey tarandığı için Montante Attacco parçasının bir tane örneğinin her iki yüzeyi taranmış ve parçanın punta bölgesi yakınındaki kalınlık dağılımları raporlanmıştır.

Tarama da sonuçta 0.1 mm'ye ulaşan hassasiyete sahip bir işlem olduğu için kalınlık ayrıca yine bir parça örneği üzerinde hem ultrasonik test aleti hem de mikrometre (Şekil 4.52) ile belirlenmiştir.



Şekil 4.52 Kritik kalınlıkların ölçümü

#### 4.4.6 Puntalama Noktalarına Sıyırma ve Çekme Testlerinin Uygulanması

##### 4.4.6.1 Deney Kurulumları ve Gerçekleştirilmesi

TOFAŞ'ta ele alınan komple için uygulanan deneyde atanan puntaların kaynak parametreleri yaklaşık olarak belirlenmiş ve buna yönelik kaynak kalitesini belirlemek üzere ultrasonik testler uygulanmıştı. Parametreleri belirlemeden önce muhtemel parametre sınır değer aralıkları arasında çekme (*Tensile Test*) ve sıyırma (*Tensile Shear Test*) testleri gerçekleştirmek gerekti. Ayrıca ele alınan komple, taramalar dışında Simufact programında da gerçek prosese en yakın şekilde modellenecek ve oluşan distorsiyonlara ulaşılabilecektir. Bunun için yine bir deney kurulumu düzenlenecek ve sınır parametre değerleri belirlemek gerekecektir. Bu iki sebepten ötürü bir önceki deneyden de yararlanılarak ele alınan komple ile aynı malzemeye sahip numunelere

çekme ve sıyırma testi uygulamaya karar verilmiştir. Bu testler Bursa’da sac parça üretimi yapan otomotiv firması Ermetal A.Ş.’de yürütülmüştür. Bu çalışma da firma içi özel bir proje olarak yapılmıştır. Ayrıca sunulması amaçlanan metodolojide distorsiyonlar matematiksel bağıntı ile bulunacaktır. Fakat bağıntıya gireceğimiz değerler rastgele olamaz; belli bir aralık içinde kalmalıdır. Bu yüzden baştan böyle sınır değerlerinin kesinleştirilip kesinleştirilemeyeceği de metodolojik açıdan saptanmış olacaktır.

Sözü edilen testleri gerçekleştirmeden önce komplemin tekil parçalarına ait aynı malzeme ve kalitede sac bulma arayışına gidilmiştir. Tekil parçaların malzemeleri HSLA çelikleri olup kalınlıkları ve kaliteleri şu şekildedir:

- 1.8 mm FEE 340 F ZNT/F/10/2S
- 1.6 mm FEE 220 BH ZNT/F/10/2S
- 3 mm FEE 340 F ZNT/F/14/2S

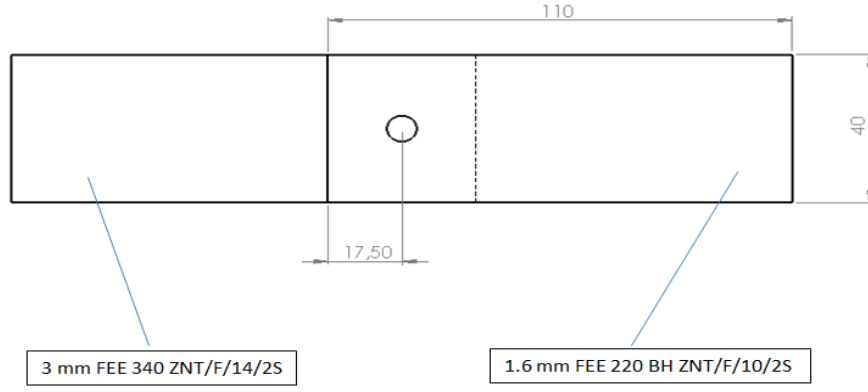
FEE 340 F-ZNT/F/2S çeliği ‘Soğuk Şekillendirmeye Uygun Yüksek Mukavemetli Düşük Alaşımlı (HSLA) Sürekli Sıcak Daldırma Yöntemi ile Çinko Kaplanmış (Galvanize) Çelikler’ sınıfına girmektedir. FEE 220 BH ZNT/F/2S çeliği ise ‘Soğuk Şekillendirme İşlemine Uygun Sürekli Sıcak Daldırma Yöntemiyle Kaplanarak Galvanize Edilmiş Fırın Sertleşmeli (Bake-Hardening) Çelikler’ sınıfındadır [77]. Burada örneğin FEE 340 F ZNT/F/10/2S çeliğinde, ZNT/F çinko kaplama türünü, 2S kaplamanın çift taraflı olduğunu, F soğuk haddeleme ürünü, 10 rakamı ise kaplamanın kalınlığının en küçük değerinin 10 µm olduğunu göstermektedir.

Numunelerin imal edileceği yukarıdaki kalite malzemelerin temini için Şahinkul, Beyçelik, Sarıgözoğlu sac gibi sac parça üretici firmalarla ve sac üreticisi ve tedarikçisi Borçelik, Erdemir, Arcelor Mittal, Bamesa firmaları ile temaslara ve bazıları ile birebir görüşmeler yapılmıştır. Bu temaslara sonunda Borçelik firmasından yeterli boyutta 1.8 mm kalınlığında FEE 340 F ZNT/F/10/2S ve 3 mm kalınlığında FEE 340 F ZNT/F/14/2S kalite sac levhalar temin edilmiş ve Ermetal Firmasına ulaştırılmıştır. 1.6 mm kalınlığındaki FEE 220 BH ZNT/F/10/2S kalite sac ise Ermetal’in kendisi tarafından sağlanmıştır.

Sıyırma testleri Tam Faktoriyel olarak düzenlenmiş olan aşağıdaki deney kurulumuna göre gerçekleştirilmiştir. Numune resmi ise ölçüleri ile birlikte Şekil 4.52’de verilmiştir. Ölçüler DIN EN ISO 14273 [53] standardına göre verilmiştir.

Çizelge 4.3 Sıyırma testleri deney kurulum tablosu

| DENEY BİLGİLERİ                                         |                          |                     | MALZEME BİLGİLERİ (1 Kalem=36 Numune) |                                 |                              |
|---------------------------------------------------------|--------------------------|---------------------|---------------------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| KOPYALAMA BÖLGESİ                                       | Deney Seviyeleri (l,t,F) | Deney Tekrar Sayısı | ‘1.8 mm FEE 340 F ZNT/F/10/2S’        | ‘1.6 mm FEE 220 BH ZNT/F/10/2S’ | ‘3 mm FEE 340 F ZNT/F/14/2S’ |
| Rinforzo + Scatolamento                                 | 3x2x2                    | 3                   | X X                                   |                                 |                              |
| Rinforzo + Montante Attacco                             | 3x2x2                    | 3                   | X                                     | X                               |                              |
| Rinforzo + Scatolamento + Montante Attacco (Üçlü Bölge) | 3x2x2                    | 3                   | X X                                   | X                               |                              |
| Scatolamento + Montante Attacco                         | 3x2x2                    | 3                   | X                                     | X                               |                              |
| Montante DX + Montante Attacco                          | 3x2x2                    | 3                   |                                       | X                               | X                            |
| TOPLAM NUMUNE SAYISI (1 Numune: 110X40 mm)              |                          |                     | 216                                   | 144                             | 36                           |
| TOPLAM SAC İHTİYACI (mm <sup>2</sup> )                  |                          |                     | 950400 mm <sup>2</sup>                | 633600 mm <sup>2</sup>          | 158400 mm <sup>2</sup>       |
| TOPLAM SAC İHTİYACI ≈ (m <sup>2</sup> )                 |                          |                     | 0.9504 m <sup>2</sup>                 | 0.6336 m <sup>2</sup>           | 0.1584 m <sup>2</sup>        |



Şekil 4.53 Sıyrma Testi numune boyutları örneği

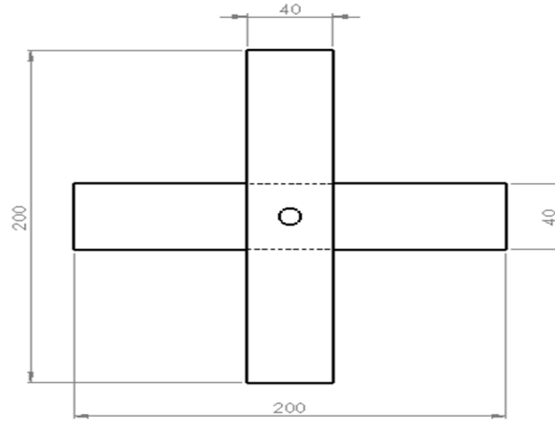
Çekme Testleri de yine Tam Faktoriyel olarak düzenlenmiş olan aşağıdaki deney kurulumuna göre gerçekleştirilmiştir. Sıyrma testlerinden farklı olarak burada tekrar sayısı 2'dir. Numune resmi ise ölçüleri ile birlikte Şekil 4.53'te verilmiştir. Ölçüler DIN EN ISO 14272 [54] standardına göre verilmiştir.

Çizelge 4.4 Çekme testleri deney kurulum tablosu

| DENEY BİLGİLERİ                                         |                          |                     | Malzemelere göre Numune Sayıları |                                 |                              |
|---------------------------------------------------------|--------------------------|---------------------|----------------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| KOPYALAMA BÖLGESİ                                       | Deney Seviyeleri (l,t,F) | Deney Tekrar Sayısı | '1.8 mm FEE 340 F ZNT/F/10/2S'   | '1.6 mm FEE 220 BH ZNT/F/10/2S' | '3 mm FEE 340 F ZNT/F/14/2S' |
| Rinforzo + Scatolamento                                 | 3x2x2                    | 2                   | 48                               |                                 |                              |
| Rinforzo + Montante Attacco                             | 3x2x2                    | 2                   | 24                               | 24                              |                              |
| Rinforzo + Scatolamento + Montante Attacco (Üçlü Bölge) | 3x2x2                    | 2                   | 48                               | 24                              |                              |
| Scatolamento + Montante Attacco                         | 3x2x2                    | 2                   | 24                               | 24                              |                              |
| Montante DX + Montante Attacco                          | 3x2x2                    | 2                   |                                  | 24                              | 24                           |

Çizelge 4.4 Çekme testleri deney kurulum tablosu (devamı)

|                                                       |             |             |    |
|-------------------------------------------------------|-------------|-------------|----|
| <b>TOPLAM NUMUNE SAYISI</b> (1 Numune:<br>200X40 mm)  | 144         | 96          | 24 |
| <b>Duruma göre Eksik Numune Sayısı</b>                | 73          | 67          | -  |
| <b>TOPLAM SAC İHTİYACI <math>\approx (m^2)</math></b> | $0.584 m^2$ | $0.536 m^2$ | -  |

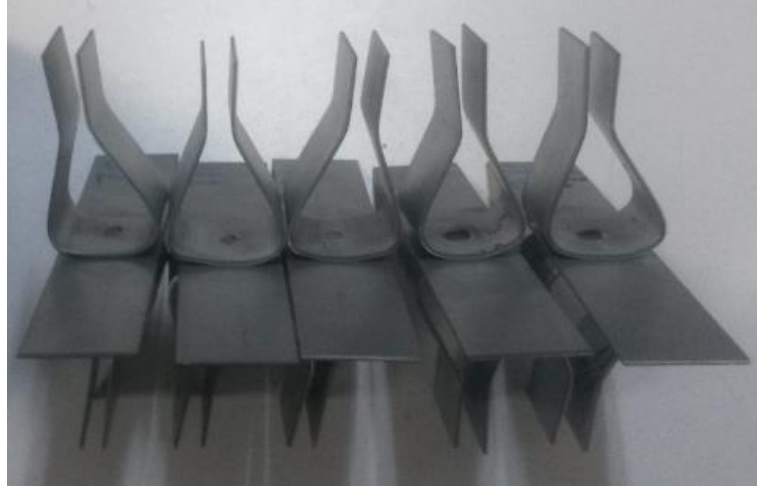


Şekil 4.54 Çekme Testi numune boyutları örneği

Şekil 4.54'te gösterilen açınımlar son hallerine bükülerek Şekil 4.55'teki çekmeye hazır son numune örnekleri hazırlanmıştır.







Şekil 4.55 İkili ve üçlü sac için çekme testine hazır numune örnekleri

Instron marka 5582 model 10 ton kapasiteli çekme cihazında 10 mm/dak çekme hızı ile gerçekleştirilen sıyırma ve çekme testlerinin örnekleri Şekil 4.56 ve 4.57’de verilmiştir.



Şekil 4.56 Numunelerin sıyırma testlerinin gerçekleştirilmesi



Şekil 4.57 Üçlü sac numunelerinin çekme testlerinin gerçekleştirilmesi

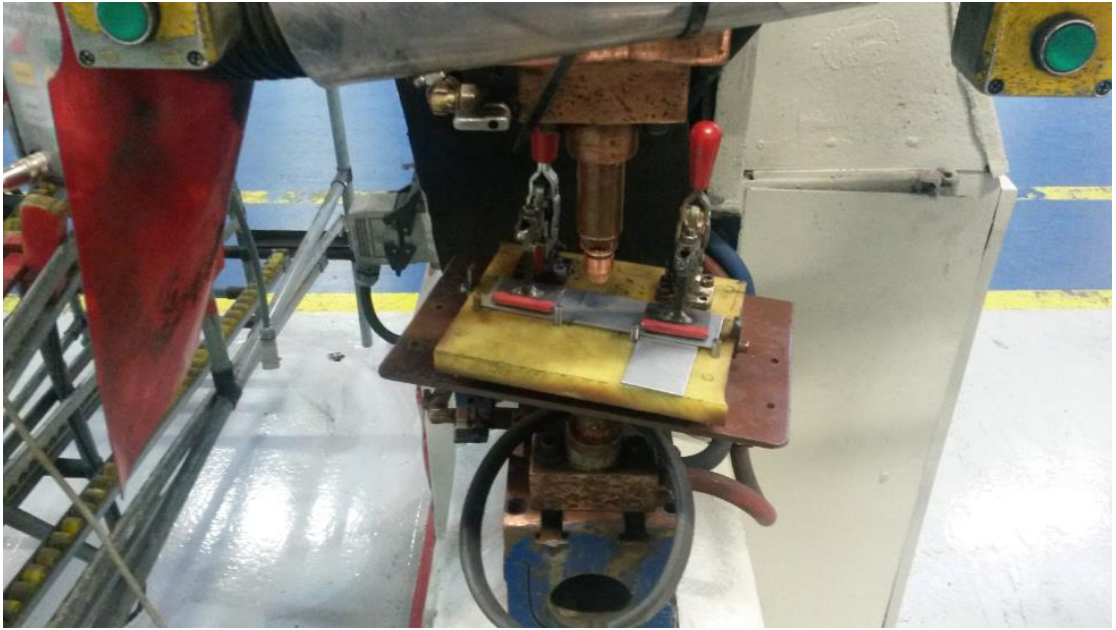
#### 4.4.6.2 Kaynak Parametrelerinin Ayarlanması

Başlangıçta uygun kaynak parametre aralığını bulurken elimizde TOFAŞ'ın parametreleri dışında herhangi bir girdi verisi yoktu. Bu nedenden dolayı başlangıçta bazı parametre kombinasyonları denenmiştir. Bu deneme numunelerine Şekil 4.58'de görülen tahribatlı muayene (*Chisel Test-Keski Testi*) uygulanmıştır. Burada amaç bir kaynak çekirdeğinin oluştuğunu görmek ve bu çekirdek çapının belli sınırlar içinde kaldığını test etmektir. Kumpas ile yapılan bu testte çekirdek çapının DIN EN ISO 14373'e [17] göre  $3,5\sqrt{t}$  ile  $6\sqrt{t}$  arasında değişebileceği kabul edilmiştir. t burada sac kalınlığı olup bizim örneklerimiz için minimum çekirdek çapı yaklaşık 4,5 mm olarak hesaplansa da Ermetal Firması ve yetkili mühendislerinin tavsiyesi ile 6 mm olarak alınmıştır.

Kaynak işlemi uygulanmadan önce parçaları kaynak sırasında fikstürlemek için özel basit bir aparat dizayn edilmiştir. Kaynak elektrodu altındaki aparatlı düzenek Şekil 4.59'da gösterilmiştir. Elektrod olarak ise DIN EN ISO 5821'e [47] göre TOFAŞ örneğinde de uygulanmış olan 'G0-20-22-50-8-8-22c5' tip elektrod kullanılmıştır.



Şekil 4.58 Kaynak parametre sınır değerleri belirlenebilmesi için numunelere Tahribatlı Muayene uygulanması

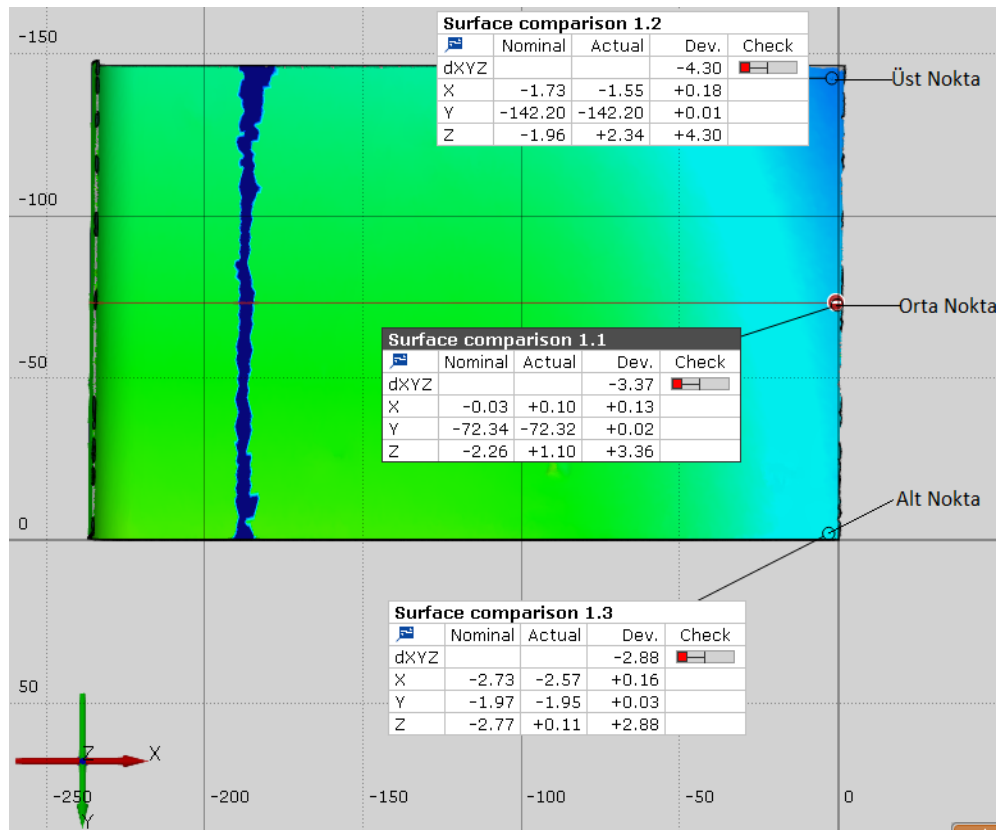


Şekil 4.59 Kaynak fiktür aparatı ve makina görünümü

## DENEY VE ANALİZ SONUÇLARI

## 5.1 Temrinlik Çalışma

## 5.1.1 Tarama Çalışmaları Sonuçları



Şekil 5.1 Parça 1 - RPS 4 için sonuçlar

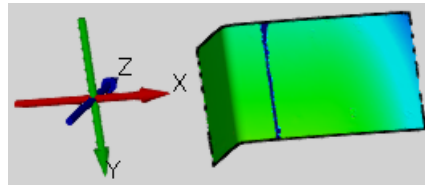
Şekil 5.1'deki sonuçlardan da görüldüğü gibi yüzey üzerinde sapmalar farklı büyüklüktedir. Bu yüzden şimdilik başlangıçta üst, orta ve alt nokta (Şekil 5.1) olmak üzere sacın kenarlarına yakın üç nokta sapması göz önünde bulundurulacaktır. İleride oluşturulmuş olan tabloların (Çizelge 5.1) verisi de bu gösterime dayanmaktadır.

#### 5.1.1.1 Gerçekleştirilmiş olan Karşılaştırma Analizi Sonuçları (Sapma Miktarları (mm))

Aşağıda verilen değerler ile ilgili koordinat eksenleri tabloların altlarında belirtilmiştir. Hepsinin koordinat sistemleri farklı olduğu için birbirleri arasında geçişte eksen dönüşümleri için gerekli trigonometrik bağlantılar kullanılabilir. İstatistiksel Analiz Yöntemleri için bu dönüşümler gerekecektir.

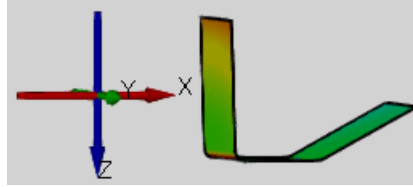
Çizelge 5.1 Parça 1 için ve RPS Yöntemi ile elde edilen veriler

| 1.Parça | Orta Nokta |         |         |         | En Yüksek Nokta |         |         |         | En Alt Nokta |         |         |         |
|---------|------------|---------|---------|---------|-----------------|---------|---------|---------|--------------|---------|---------|---------|
| RPS No  | Nominal    | X eksen | Y eksen | Z eksen | Nominal         | X eksen | Y eksen | Z eksen | Nominal      | X eksen | Y eksen | Z eksen |
| 3       | -3,34      | 0,12    | 0,04    | 3,34    | -3,94           | 0,15    | 0,02    | 3,94    | -2,74        | 0,11    | 0,03    | 2,73    |
| 4       | -3,37      | 0,13    | 0,02    | 3,36    | -4,30           | 0,18    | 0,01    | 4,30    | -2,88        | 0,16    | 0,03    | 2,88    |
| 5       | -3,12      | 0,12    | 0,04    | 3,11    | -4,60           | 0,17    | 0,03    | 4,59    | -2,37        | 0,09    | 0,05    | 2,37    |
| 6       | -3,25      | 0,13    | 0,03    | 3,24    | -4,56           | 0,17    | 0,03    | 4,55    | -2,62        | 0,02    | 0,09    | 2,62    |
| 7       | -1,28      | 0,01    | 0,00    | 1,28    | -2,19           | 0,02    | 0,01    | 2,19    | -0,19        | 0,00    | 0,00    | 0,19    |
| 8       | -1,48      | 0,06    | 0,01    | 1,48    | -2,83           | 0,09    | 0,37    | 2,81    | -1,13        | 0,05    | 0,01    | 1,13    |



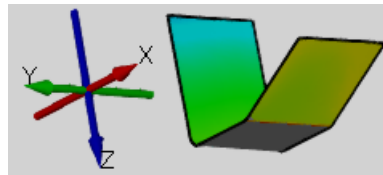
Çizelge 5.2 Parça 2 (Sol Nokta) için ve RPS Yöntemi ile elde edilen veriler

| 2.Parca<br>(Sol Nokta) | Orta Nokta |         |         |         | En Yüksek Nokta |         |         |         | En Alt Nokta |         |         |         |
|------------------------|------------|---------|---------|---------|-----------------|---------|---------|---------|--------------|---------|---------|---------|
| RPS No                 | Nominal    | X eksen | Y eksen | Z eksen | Nominal         | X eksen | Y eksen | Z eksen | Nominal      | X eksen | Y eksen | Z eksen |
| 3                      | -1,34      | -1,34   | -0,02   | 0       | -1,37           | -1,37   | 0       | -0,01   | -1,45        | -1,45   | 0       | -0,02   |
| 4                      | -3,88      | -3,87   | 0       | -0,21   | -3,7            | -3,69   | -0,13   | -0,17   | -3,95        | -3,94   | 0,03    | -0,23   |
| 5                      | -2,59      | -2,59   | -0,05   | 0,08    | -2,81           | -2,81   | 0,02    | -0,03   | -2,98        | -2,97   | -0,03   | 0,11    |
| 6                      | 1,43       | 1,43    | 0       | 0,04    | 1,64            | 1,64    | 0       | 0,05    | 1,31         | 1,31    | 0       | 0,04    |
| 7                      | -0,49      | -0,49   | 0       | -0,02   | -0,96           | -0,96   | 0       | -0,03   | -0,09        | -0,09   | 0       | 0       |
| 8                      | -2,35      | -2,35   | 0       | 0,06    | -2,71           | -2,71   | -0,05   | 0       | -2,33        | -2,33   | 0,04    | 0,08    |



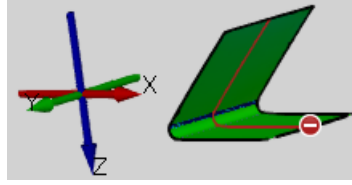
Çizelge 5.3 Parça 2 (Sağ Nokta) için ve RPS Yöntemi ile elde edilen veriler

| 2.Parca<br>(Sağ Nokta) | Orta Nokta |         |         |         | En Yüksek Nokta |         |         |         | En Alt Nokta |         |         |         |
|------------------------|------------|---------|---------|---------|-----------------|---------|---------|---------|--------------|---------|---------|---------|
| RPS No                 | Nominal    | X eksen | Y eksen | Z eksen | Nominal         | X eksen | Y eksen | Z eksen | Nominal      | X eksen | Y eksen | Z eksen |
| 3                      | -0,15      | 0,08    | 0       | 0,12    | -0,69           | 0,36    | 0       | 0,59    | -0,16        | 0,08    | 0       | 0,13    |
| 4                      | -0,85      | 0,43    | 0       | 0,73    | -1,38           | 0,71    | 0       | 1,18    | -0,74        | 0,37    | -0,01   | 0,63    |
| 5                      | -1,66      | 0,76    | -0,01   | 1,48    | -1,22           | 0,57    | -0,01   | 1,08    | -1,31        | 0,61    | 0,02    | 1,16    |
| 6                      | -0,63      | 0,33    | 0       | 0,54    | -1,56           | 0,86    | -0,14   | 1,29    | -0,17        | 0,09    | 0       | 0,14    |
| 7                      | -0,02      | 0,01    | 0       | 0,02    | -0,34           | 0,17    | 0       | 0,29    | -0,17        | 0,09    | 0       | 0,14    |
| 8                      | -0,85      | 0,39    | 0       | 0,75    | -1,26           | 0,59    | 0       | 1,12    | -0,92        | 0,43    | 0       | 0,81    |



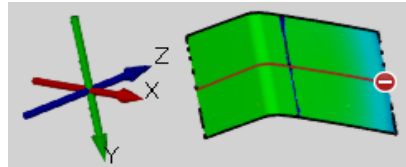
Çizelge 5.4 Parça 3 için ve RPS Yöntemi ile elde edilen veriler

| 3.Parça | Orta Nokta |         |         |         | En Yüksek Nokta |         |         |         | En Alt Nokta |         |         |         |
|---------|------------|---------|---------|---------|-----------------|---------|---------|---------|--------------|---------|---------|---------|
| RPS No  | Nominal    | X eksen | Y eksen | Z eksen | Nominal         | X eksen | Y eksen | Z eksen | Nominal      | X eksen | Y eksen | Z eksen |
| 3       | -1,23      | -0,87   | -0,01   | -0,86   | -1,28           | -0,9    | -0,08   | -0,9    | -0,76        | -0,54   | -0,01   | -0,53   |
| 4       | -0,8       | -0,56   | 0       | -0,58   | -0,47           | -0,32   | 0       | -0,34   | -0,57        | -0,39   | -0,01   | -0,41   |
| 5       | -0,81      | -0,6    | 0       | -0,54   | -1,18           | -0,88   | -0,12   | -0,77   | -0,95        | -0,71   | 0       | -0,64   |
| 6       | -0,25      | -0,18   | 0       | -0,17   | -0,98           | -0,71   | -0,01   | -0,68   | 0,46         | 0,33    | 0       | 0,32    |
| 7       | -5,5       | -3,85   | -0,05   | -3,93   | -5,97           | -4,17   | -0,07   | -4,27   | -4,9         | -3,43   | -0,02   | -3,5    |
| 8       | -0,61      | -0,44   | 0       | -0,43   | -0,65           | -0,46   | 0       | -0,46   | -0,19        | -0,14   | 0       | -0,13   |



Çizelge 5.5 Parça 1 için ve Best-Fit Yöntemi ile elde edilen veriler

| 1.Parça     | Orta Nokta |         |         |         | En Yüksek Nokta |         |         |         | En Alt Nokta |         |         |         |
|-------------|------------|---------|---------|---------|-----------------|---------|---------|---------|--------------|---------|---------|---------|
| Best-Fit No | Nominal    | X eksen | Y eksen | Z eksen | Nominal         | X eksen | Y eksen | Z eksen | Nominal      | X eksen | Y eksen | Z eksen |
| 3           | -1,38      | 0,05    | 0,02    | 1,38    | -1,04           | 0,03    | 0,01    | 1,04    | -1,82        | 0,08    | 0,06    | 1,82    |
| 4           | -3,18      | 0,12    | 0,08    | 3,17    | -3,32           | 0,12    | 0,06    | 3,32    | -3,58        | 0,17    | 0,11    | 3,57    |
| 5           | -2,21      | 0,1     | 0,02    | 2,21    | -2,72           | 0,12    | 0,01    | 2,72    | -2,44        | 0,11    | 0,03    | 2,43    |
| 6           | -2,47      | 0,09    | 0,04    | 2,47    | -2,77           | 0,1     | 0,03    | 2,77    | -2,69        | 0,05    | 0,18    | 2,68    |
| 7           | -0,23      | 0       | 0       | 0,23    | -0,12           | 0       | 0       | 0,12    | -0,24        | 0       | 0       | 0,24    |
| 8           | -          | -       | -       | -       | -               | -       | -       | -       | -            | -       | -       | -       |



### 5.1.1.2 Gom Inspect'te gerçekleştirilen Açısal Sınırların Tayini

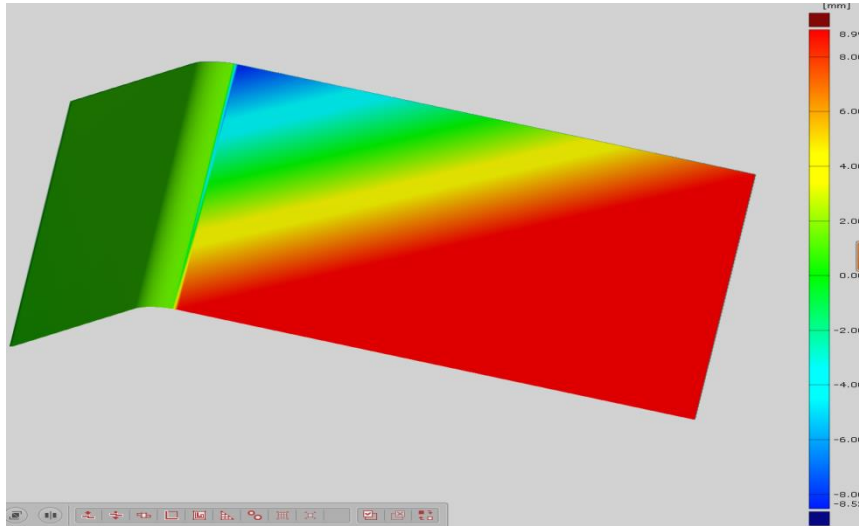
Ayrıca, eğer örneğin parçanın açılması bir açı toleransı ile kısıtlanmış ise parçanın başlangıçta sınırlar içinde kalıp kalmadığı bu sefer çizim datasının CAD datası olarak kabul edilmesi ile çözülebileceği düşünülmüştür. Bu CAD datası şu adımlar (ör. Solidworks'te) ile oluşturabilir:

1. Parçayı 'Sheet Metal bölümünde' 'unfold' edip genişliğini ölçmek
2. Bu genişlikte aynı kalınlıkta yeni bir 'sheet' parça oluşturmak
3. Bu parçayı kenardan aynı uzaklıktaki 'bending line'dan aynı yarıçap fakat bu sefer istenilen açı ile bükmek.

Böyle bir karşılaştırma modeli yaratmak ve bu modelle karşılaştırma modeli gerçekleştirmek tarafımızdan düşünülüp uygulanmıştır.

Örneğin bu işlemler Parça 1 için bir örnek olarak uygulanmış ve Şekil 5.2'de sonuçlara ulaşılmıştır. Mavi ile belirtilen kısımlar tolerans dışı kalan bölgeyi göstermektedir. Tabii bu sadece bir karşılaştırma örneği olarak düşünülmüştür.

Burada sadece bir örnek teşkil etmesi açısından; 2 derecelik bir sapma baz alınmıştır. Ayrıca bu toleranslar geometrik olarak da verilebilir; örneğin iki düzlemin arasında kalmak gibi. Yine bu tip bir tolerans türü için benzer bir karşılaştırma yolu izlenebilir.

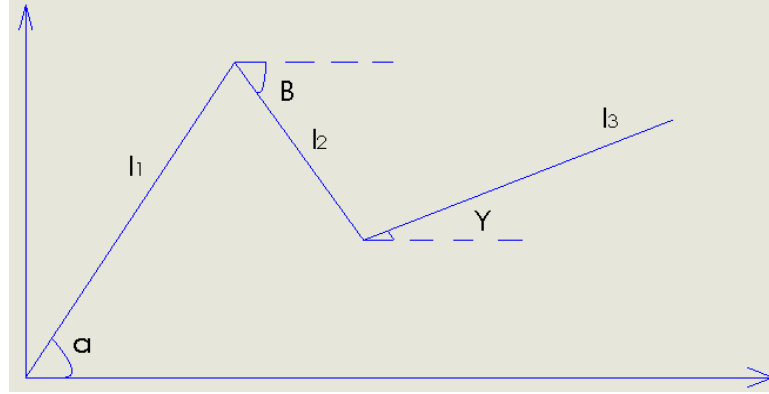


Şekil 5.2 Parça 1 için bir örnek uygulama



### 5.1.2 İlgili Temrinlik Çalışma için Hazırlanan Matematiksel Model Önerileri

Algoritma ve yazılım oluşturmak için önce başlangıç örnek modeller düşünülmüştür. Burada amaç en basitten daha karmaşık modellere ilerlemektir. Bunun için 1. model olarak iki boyutlu üç düz parçanın sanki montaj yapılmış hali (Şekil 5.3) ele alınmıştır. Burada geri esneme veya distorsiyon değil, montaj sırasında uç noktaların (birleşme noktalarının) herhangi bir yer değişimi (örneğin: ısı genleşme) olduğu kabul edilebilir.



Şekil 5.3 Üç parçanın model boyutları

Bu örnek model için tolerans aralığı sırası ile aritmetik, kuadratik ve probablist hesaplama yöntemleri için verilmiştir. Matris denklemlerinin solu değişim gösterecek bölgeyi, sağ taraf ise içinde kalınması gereken tolerans aralık sınırını göstermektedir.

$l_{10}, l_{20}, l_{30}$  : Nominal değerler;  $l_{11}, l_{21}, l_{31}$  : Deformasyon sonundaki değerler

IT değerleri her bir parçanın toleransını göstermektedir.

Aritmetik Yöntem:

$$\begin{vmatrix} \cos \alpha & \cos \beta & \cos \gamma \\ \sin \alpha & \sin \beta & \sin \gamma \end{vmatrix} \begin{vmatrix} l_{11} - l_{10} \\ l_{21} - l_{20} \\ l_{31} - l_{30} \end{vmatrix} \leq \begin{vmatrix} IT_1 \cos \alpha + IT_2 \cos \beta + IT_3 \cos \gamma \\ IT_1 \sin \alpha + IT_2 \sin \beta + IT_3 \sin \gamma \end{vmatrix} \quad (4.1)$$

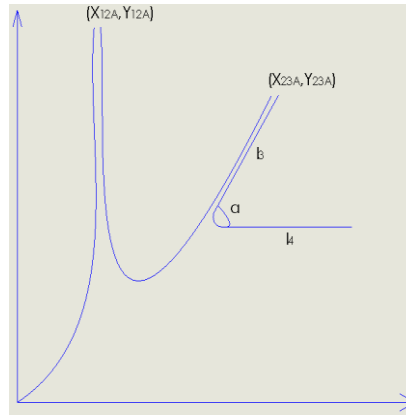
Kuadratik Yöntem:

$$\begin{vmatrix} \cos \alpha & \cos \beta & \cos \gamma \\ \sin \alpha & \sin \beta & \sin \gamma \end{vmatrix} \begin{vmatrix} l_{11} - l_{10} \\ l_{21} - l_{20} \\ l_{31} - l_{30} \end{vmatrix} \leq \sqrt{\frac{IT_1^2 \cos^2 \alpha + IT_2^2 \cos^2 \beta + IT_3^2 \cos^2 \gamma}{IT_1^2 \sin^2 \alpha + IT_2^2 \sin^2 \beta + IT_3^2 \sin^2 \gamma}} \quad (4.2)$$

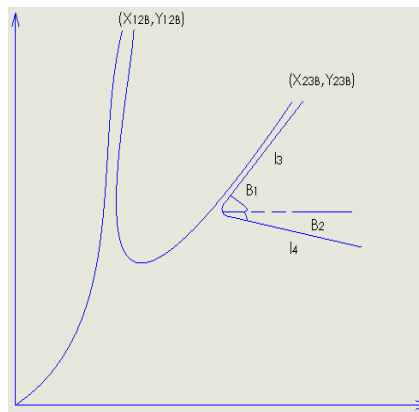
Probabilist Yöntem:

$$\begin{vmatrix} \cos \alpha & \cos \beta & \cos \gamma \\ \sin \alpha & \sin \beta & \sin \gamma \end{vmatrix} \begin{vmatrix} l_{11} - l_{10} \\ l_{21} - l_{20} \\ l_{31} - l_{30} \end{vmatrix} \leq \frac{\sqrt{3(IT_1^2 \cos^2 \alpha + IT_2^2 \cos^2 \beta + IT_3^2 \cos^2 \gamma)}}{\sqrt{3(IT_1^2 \sin^2 \alpha + IT_2^2 \sin^2 \beta + IT_3^2 \sin^2 \gamma)}} \quad (4.3)$$

Ele alınan 2. örnek model (Şekil 5.3) ise farklı açılarla bükülmüş farklı uzunluktaki üç parçanın montajını 2 boyutta vermektedir. Bu parçalar kurgulanarak tasarlanmıştır. Burada Şekil 5.4 başlangıç durumunu (A indisi ile); Şekil 5.5 ise tekil geri esneme ve kaynaklı montaj sonundaki distorsiyonlar sonucundaki durumu (B indisi ile) modellemektedir. Burada en sağdaki üçüncü parça için de diğer parçalara uygulanmış olan uç noktaların koordinat hesabı yapılabilmiş olsa da parçanın geometrisi uygun olduğu için açılardan trigonometrik hesaplara gidilmiştir.



Şekil 5.4 Başlangıç durumu



Şekil 5.5 Tekil geri esneme ve kaynaklı montaj sonundaki distorsiyonlar sonucundaki durum

Aritmetik Yöntem:

$$\left| \begin{array}{l} (X_{12B} - X_{12A}) + (X_{23B} - X_{23A}) + |(l_4 \cos \beta_2 - l_3 \cos \beta_1) - (l_4 - l_3 \cos \alpha)| \\ (Y_{12B} - Y_{12A}) + (Y_{23B} - Y_{23A}) + |(l_4 \sin \beta_2 + l_3 \sin \beta_1) - (l_3 \sin \alpha)| \end{array} \right| \leq \quad (4.4)$$

$$\left| \begin{array}{l} IT_{1X} + IT_{2X} + (IT_{4X} - IT_3 \cos \alpha) \\ IT_{1Y} + IT_{2Y} + (IT_{4Y} - IT_3 \sin \alpha) \end{array} \right|$$

Kuadratik Yöntem:

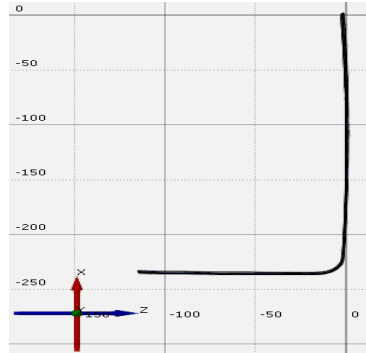
$$\left| \begin{array}{l} (X_{12B} - X_{12A}) + (X_{23B} - X_{23A}) + |(l_4 \cos \beta_2 - l_3 \cos \beta_1) - (l_4 - l_3 \cos \alpha)| \\ (Y_{12B} - Y_{12A}) + (Y_{23B} - Y_{23A}) + |(l_4 \sin \beta_2 + l_3 \sin \beta_1) - (l_3 \sin \alpha)| \end{array} \right| \leq \quad (4.5)$$

$$\left| \frac{\sqrt{IT_{1X}^2 + IT_{2X}^2 + (IT_{4X} - IT_3 \cos \alpha)^2}}{\sqrt{IT_{1Y}^2 + IT_{2Y}^2 + (IT_{4Y} - IT_3 \sin \alpha)^2}} \right|$$

Probabilist Yöntem:

$$\left| \begin{array}{l} (X_{12B} - X_{12A}) + (X_{23B} - X_{23A}) + |(l_4 \cos \beta_2 - l_3 \cos \beta_1) - (l_4 - l_3 \cos \alpha)| \\ (Y_{12B} - Y_{12A}) + (Y_{23B} - Y_{23A}) + |(l_4 \sin \beta_2 + l_3 \sin \beta_1) - (l_3 \sin \alpha)| \end{array} \right| \leq \quad (4.6)$$

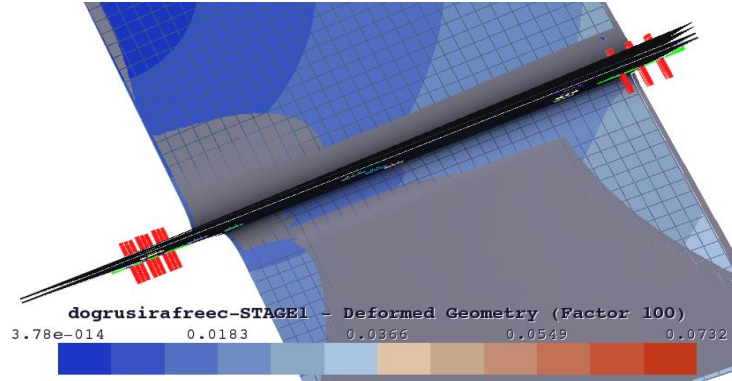
$$\left| \frac{\sqrt{3(IT_{1X}^2 + IT_{2X}^2 + (IT_{4X} - IT_3 \cos \alpha)^2)}}{\sqrt{3(IT_{1Y}^2 + IT_{2Y}^2 + (IT_{4Y} - IT_3 \sin \alpha)^2)}} \right|$$



Şekil 5.6. Şekillendirilmiş parçanın GOM Inspect'teki STL formatındaki verisi

Şekil 5.6'da görüldüğü gibi tekil parçaların bükme sonrası biçimleri tam olarak CAD datasıyla uyuşmamaktadır. Örneğin Parça 1'in dik yüzeyi yatay yüzey ile tam olarak 90°'lik bir açı yapmamaktadır. Biçimi eğriseldir. Bu yüzden yukarıda öngörülen eşitlikler çalışmanın bu deneysel kısmında kullanılamayacaktır. Bu eşitliklerde kaynak distorsiyonları sonucu parça uçlarının birlikte hareket edecekleri düşünülmüştür. Fakat gerçekte parça uçlarının hareketi bir gülün açılımına benzetilebilir. Uçlar yaklaşmakta fakat tam olarak dokunmamaktadırlar. Eğer parçalar imalat sonrası CAD parçası ile tam olarak aynı biçime sahip olsaydı da yine Şekil 5.4'te öngörülen hareket olmayacaktır. Bu

5.10'daki kaynak simülasyonu sonrası distorsiyon sonuçları ile de desteklenebilir. Şekil 5.7'de büyültme faktörü kullanıldığında bazı bölgeler 4 yüzey, bazı bölgeler 2 yüzey ile gösterilmektedir. Fakat başlangıçta iki orta yüzey mevcuttur. Bu da çok küçük olsa da bir açılma olduğunu kanıtlamaktadır.



Şekil 5.7 Sac yüzeylerinin Gösterimi

Oluşan puntalar yerlerinden koparılıp soyma testine tabi tutulup çekirdek olup oluşmadığına bakılmıştır. Buna göre Şekil 5.8'de görüldüğü üzere küçük de olsa 3 mm'lik bir çekirdek oluşmuştur.

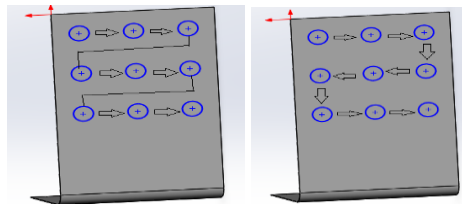


Şekil 5.8 Oluşan Çekirdek

Bu çalışma için iki sıra belirlenmiştir (Şekil 5.9). Ayrıca 3,4,5 ve 6,7,8 grupları için de punta noktalarının sayıları etkeni göz önüne alınıp araştırılmıştır.

Sıra 1:

Sıra 2:



Şekil 5.9 Kaynak sıralarının gösterimi

*Punta kaynağı sonrası iki etkenin etkisini gösteren Weld Planner analiz sonuçları*

1. Punta sayısı (Aynı kaynak sırası)

Orta noktadaki yer değiştirme (Parça 1 üzerinde) (Şekil 5.10'a göre):

(Punta Çapı: 5 mm)

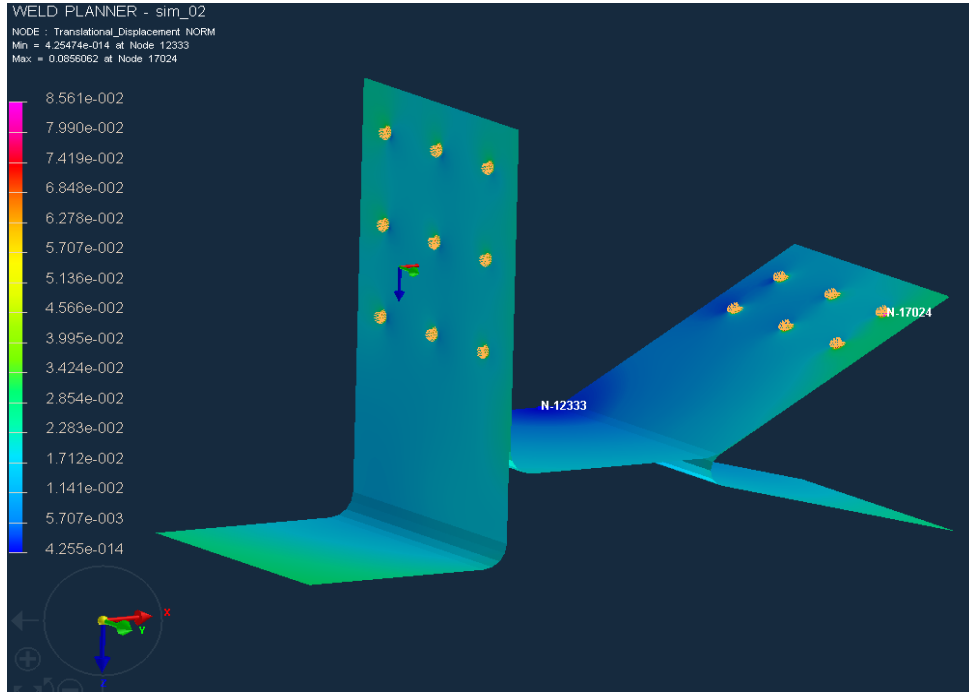
Montaj Grupları 3,4 ve 5: 0.01932 mm (Şekil 5.9)

Montaj Grupları 6,7 ve 8: 0.01489 mm

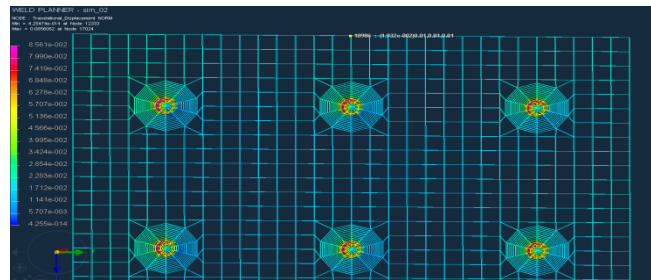
(Punta Çapı: 3 mm)

Montaj Grupları 3,4 ve 5: 0.008501mm

Montaj Grupları 6,7 ve 8: 0.005267 mm



Şekil 5.10 Weld Planner'da Sıra 1 ve montaj grupları 3,4,5 için bir analiz örneği



Şekil 5.11 Orta noktadaki yer değiştirmeyi belirlemek için model

2. Kaynak sırası (Şekil 5.9'a göre) (aynı punta sayısı)

Orta noktadaki yer değiştirme (Parça 1 üzerinde):

Sıra 1: 0.01932 mm (Punta Çapı: 5 mm)

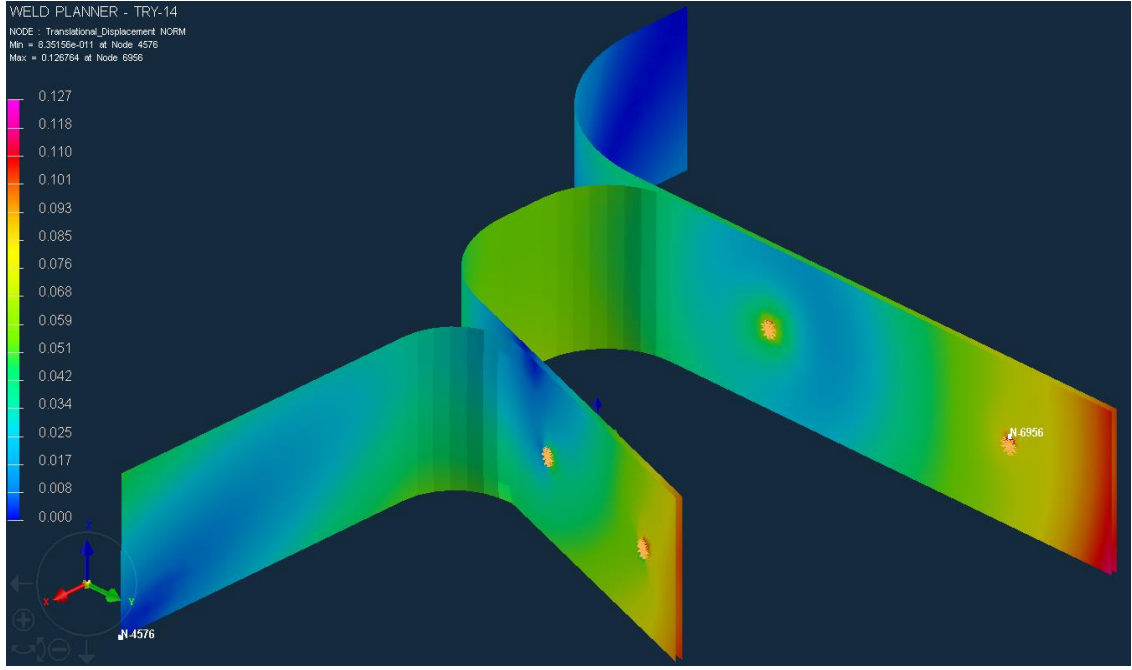
Sıra 2: 0.01938 mm

Sıra 1: 0.008501 mm (Punta Çapı: 3 mm)

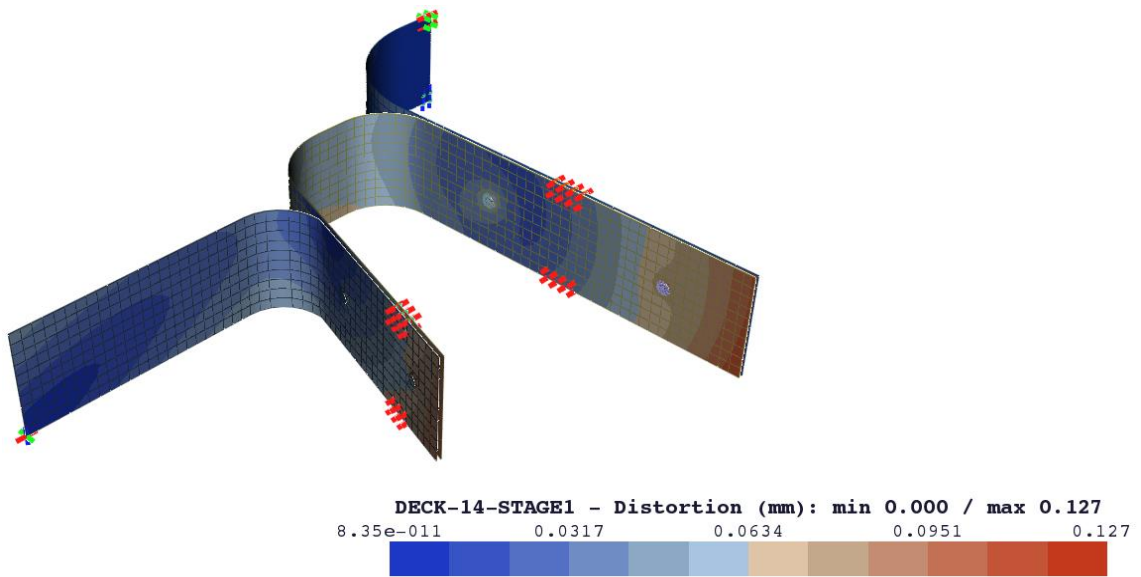
Sıra 2: 0.007823 mm

Yukarıdaki çalışmada distorsiyonların çok küçük çıkmalarının sebebi sadece sıra ve punta sayısı etkisi görmek için fikstür kullanmayıp serbest pens (free clamp) kullanılmasıdır. Free clamp noktaları kaynak bittikten sonra üç eksenle parçanın kaldığı noktaları göstermektedir. Parçanın uzayda kaymaması için bir nevi kaynak sonrası sabitleme mekanizmasıdır.

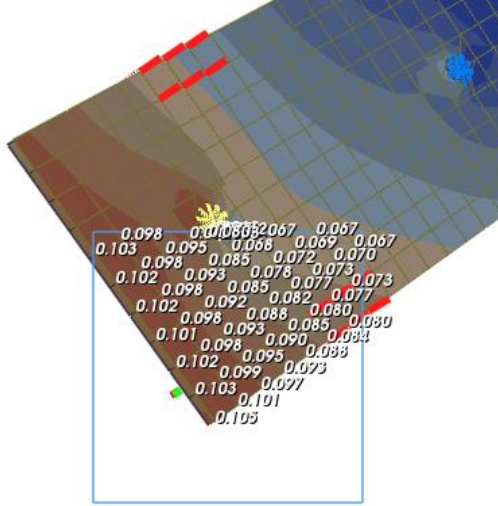
Yukarıdaki çalışmanın yanında yukarıdaki matematiksel modele temel teşkil edecek Weld Planner analizleri de gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada clamping (fikstürler uygulanmıştır). İlk olarak, her iki tarafta da iki noktalı üç tekil parçadan oluşan bir punta kaynağı örneği (Şekil 5.12-5.13-5.14) analiz edilmiştir. Kırmızı ve yeşil bölgeler (Şekil 5.13) çeşitli yönlerdeki hareketi kısıtlayacak fikstür noktalarıdır. Ayrıca malzeme St 52; kalınlık ise 2 mm olarak seçilmiştir. Şekil 5.14-a,-b ise her iki birleşme ucundaki nodların distorsiyon değerlerini göstermektedir (Şekil 5.14-a: Şekil 5.3'teki 2.ve 3. parçalar; Şekil 5.14-b: 5.3'teki 1.ve 2. parçalar) . Bizim için önemli olan noktalar zaten burasıdır; çünkü bu örnekte hem distorsiyonlar uçlarda en büyük, hem de buralarda örneğin bir kulak veya delik olabilir ve buranın dikkate alınması istenebilir. Tabii tolerans zinciri çalışmasında kritik ölçüler montaj grubunun farklı yerlerinde ise bu bölgeler seçilip buralardaki sonuçlar ele alınabilir.



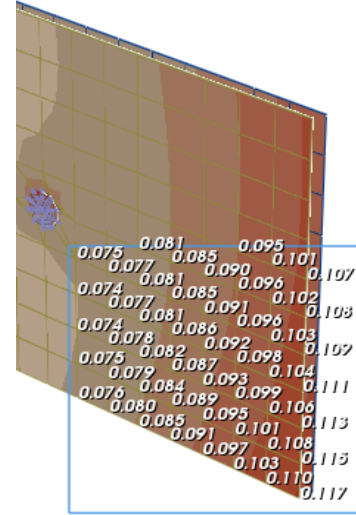
Şekil 5.12 Punta Kaynak Analizi Örneği Sonucu



Şekil 5.13 Fikstürlerin Gösterimi ile Punta Kaynak Analizi Örneği Sonucu



Şekil 5.14-a

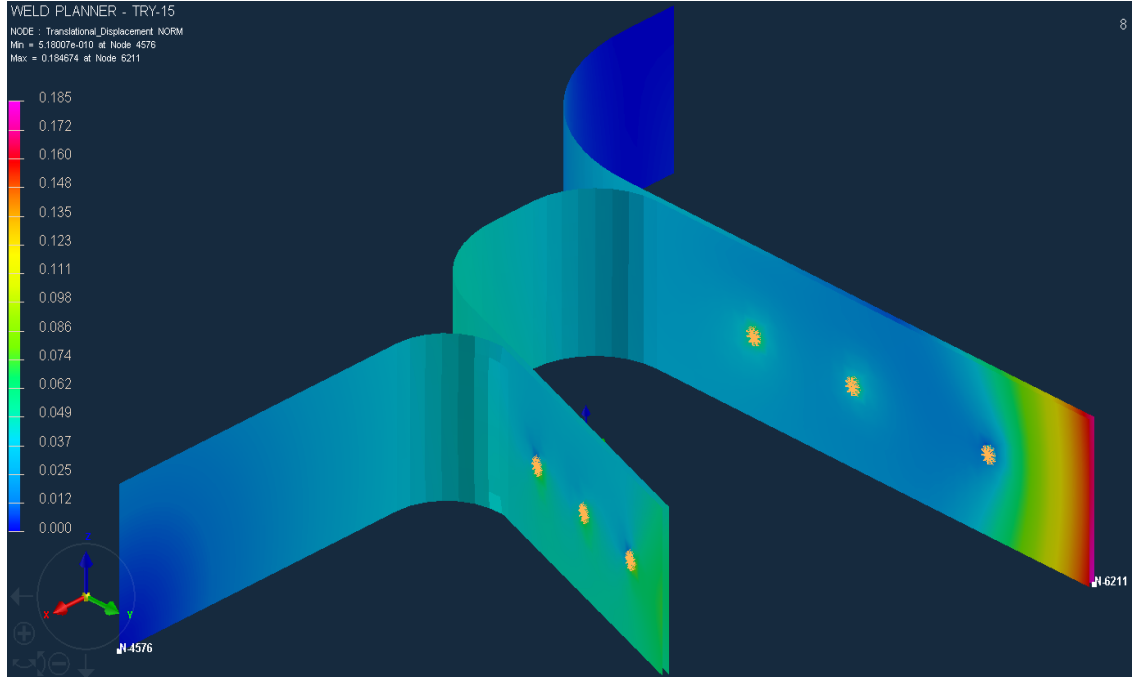


Şekil 5.14-b

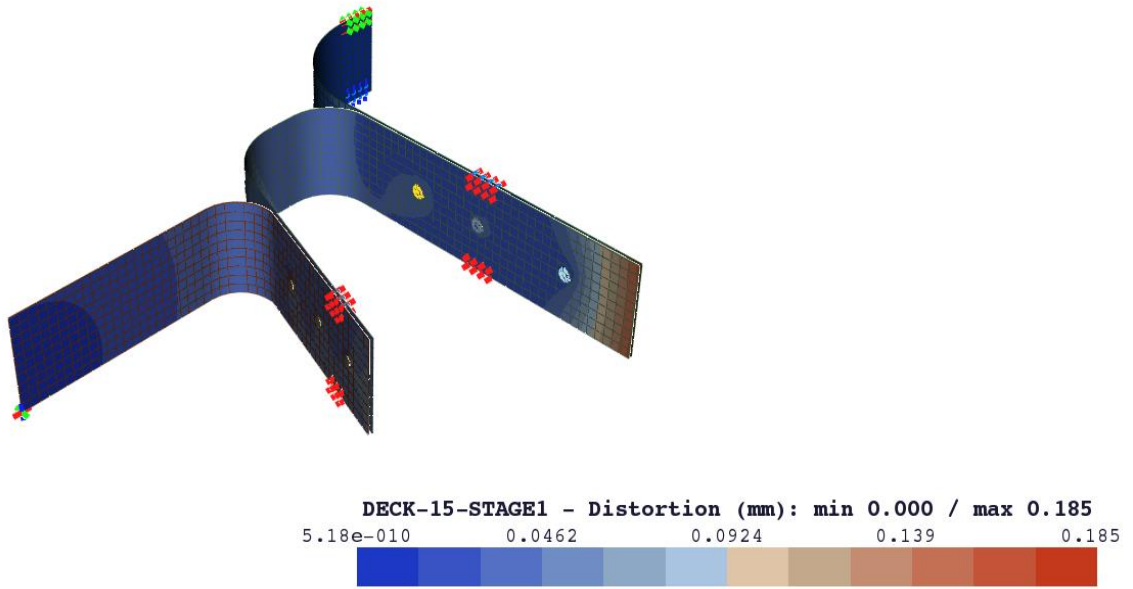
Şekil 5.14 Punta Kaynağı sonrası distorsiyon boyutları

İkinci örnekte ise (Şekil 5.15-5.16-5.17) her iki tarafta da üç noktalı bir punta kaynağı örneği analiz edilmiş olup yukarıdaki örnekteki aynı işlemler bu örneğe de uygulanmıştır. Görüldüğü üzere uçtaki distorsiyonlar biraz artmıştır (Şekil 5.15-5.16). Bunun sebebi punta kaynağı noktalarının arttırılmasıdır. Tabii kaynak programı parametreleri, kaynak noktası sayısı, parça şekilleri ve boyutları değiştiğinde sonuçlar değişecektir. Yukarıda anıldığı gibi, burada da Şekil 17 a-b ise her iki birleşme ucundaki nodların distorsiyon değerlerini göstermektedir (Şekil 17-a: Şekil 5.3'teki 2.ve 3. parçalar; Şekil 17-b: Şekil 5.3'teki 1.ve 2. parçalar).

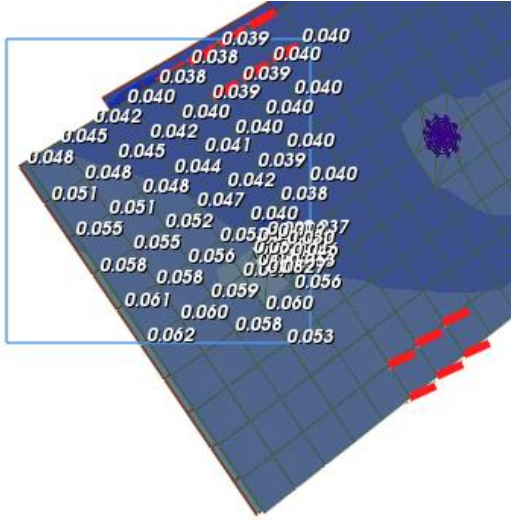




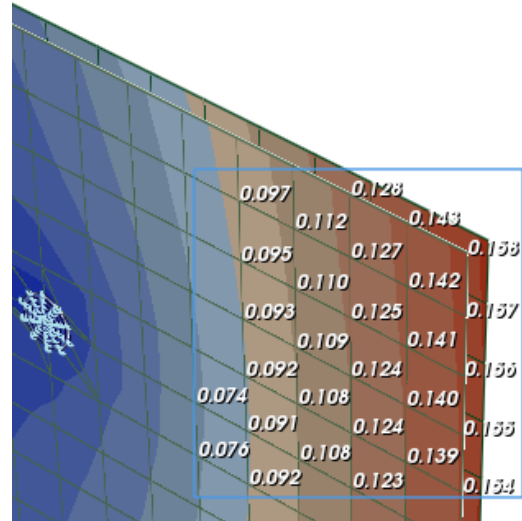
Şekil 5.15 Punta kaynak analizi örneği sonucu (üçlü punta için)



Şekil 5.16 Fikstürlerin gösterimi ile punta kaynak analizi örneği sonucu (üçlü punta için)



Şekil 5.17-a



Şekil 5.17-b

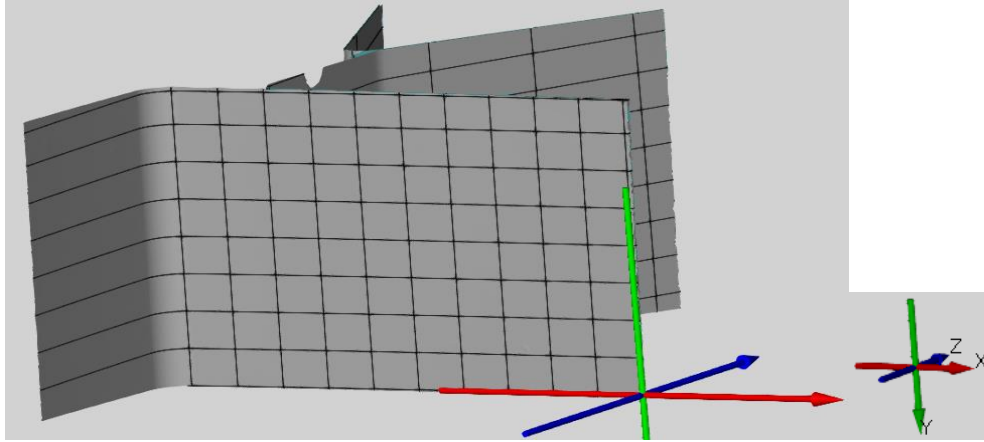
Şekil 5.17 Punta kaynağı sonrası distorsiyon boyutları (üçlü punta için)

Tarama ve analiz sonuçları karşılaştırıldığında büyük mutlak değer farklarına rağmen parçaların kenarı boyunca kaynak sırası etkisinden benzer distorsiyon dağılım değişimi gözlemlenmiştir.

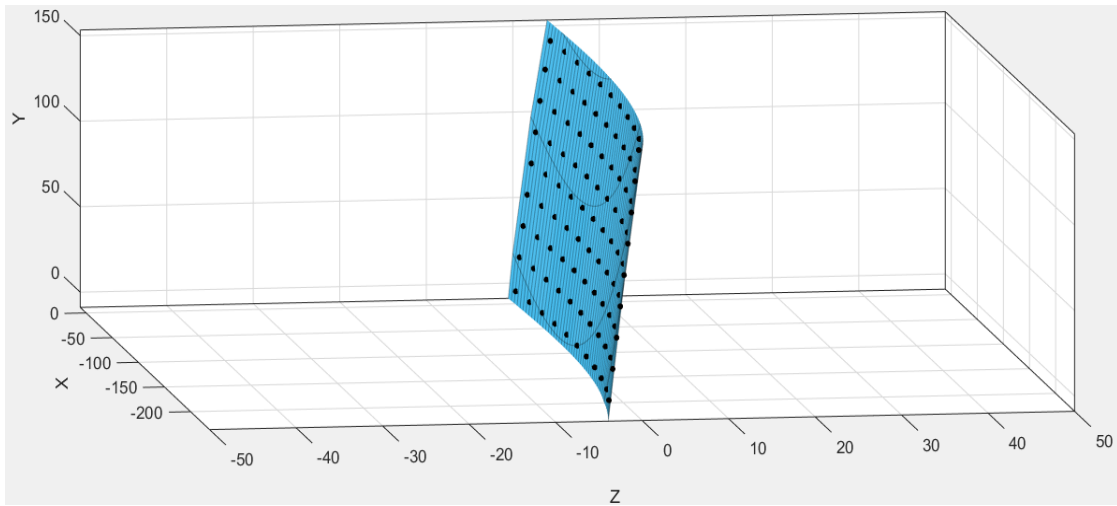
### 5.1.3 Matlab ile GOM Sonucunu Yüzey Haline Dönüştürme (Yüzeyleri Fonksiyonel olarak Modelleme)

Kaynak öncesi ve sonrası parça ve montaj grupları 3 boyutlu olarak taranmış ve çıkan veriler STL olarak kaydedilip 'GOM Inspect' yazılımında bu veriler karşılaştırılarak distorsiyonlar incelenmiştir, buradan da anlaşıldığı gibi distorsiyonlar her noktada farklıdır. Fakat bir çözüm olarak kaynak sonrası çarpılmış montaj grubunun yüzeylerinin matematiksel fonksiyon olarak 3 boyutlu koordinat ekseninde modellenmesi düşünülmüştür. Kaynak öncesi ve sonrası yüzeyler GOM yazılımından direk olarak export edilememektedir. Bu problemi çözmek için Nurbs gibi yazılımların mevcut olduğu belirtilmiş olsa da, başlangıç olarak başka bir çözüm arayışına gidilmiştir. Şekil 8'de gözüktüğü gibi GOM Inspect yazılımında montaj gruplarında dikey yönde 8, yatay yönde ise 10 kesit (section) atılmış (Şekil 5.18) ve yazılımda tek tek kesişme noktaları oluşturulup bu noktaların koordinatları alınıp, bu koordinat verisi Matlab programına import edilmiştir. Daha sonra Matlab yazılımı yardımı ile örneğin 3. dereceden bir polinom eşitliği yaklaşımı ile Şekil 5.18'deki matematiksel yüzey ve onun yaklaşık

fonksiyonu elde edilmiştir. Böylece her parçanın yaklaşık yüzey fonksiyonu çıkartılıp bu fonksiyonlar toplanarak sonuca gidilebilir.



Şekil 5.18 GOM Inspect'te Kesitler Yardımı ile Deforme Olmuş Yüzeylerin Noktalarının Koordinatlarının Elde Edilmesi



Şekil 5.19 Matlab'te Curve Fitting komutu ile Deforme Olmuş Yüzey Denklemi Eldesi

Linear model Poly33:

$$f(x,y) = p00 + p10*x + p01*y + p20*x^2 + p11*x*y + p02*y^2 + p30*x^3 + p21*x^2*y + p12*x*y^2 + p03*y^3$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

p00 = 12.65 (9.981, 15.31)  
p10 = 43.85 (40.33, 47.37)  
p01 = 0.4078 (0.3104, 0.5052)  
p20 = -2.916 (-4.33, -1.503)  
p11 = -0.001753 (-0.04625, 0.04274)  
p02 = 0.001086 (9.613e-05, 0.002076)

p30 = 0.1638 (-0.001644, 0.3293)  
p21 = -0.009829 (-0.01693, -0.002724)  
p12 = -0.0001574 (-0.0003234, 8.689e-06)  
p03 = -1.311e-05 (-1.589e-05, -1.032e-05)

Goodness of fit:

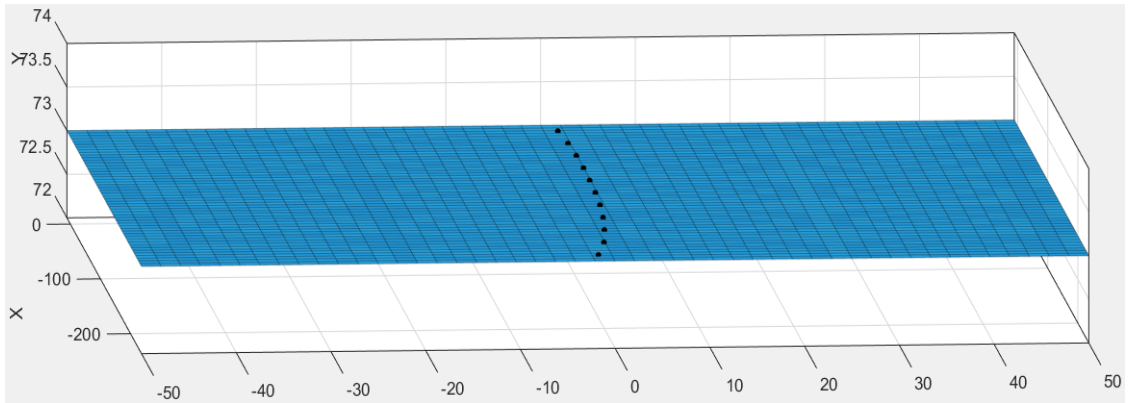
SSE: 620.2

R-square: 0.9972

Adjusted R-square: 0.9969

RMSE: 2.64

Çakıştırma sonrası yüzeylerin noktasal sapmaları bulunurken belirli bir eksenini alıp onun üzerinden gidilmiştir. Bu durumda, parçaların sadece orta ekseninde alınan noktalar kullanılarak, yine Şekil 5.20'deki gibi bir yaklaşık eşitlik elde edilebilir. Böylece ise her parçanın orta ekseninin fonksiyonu çıkartılıp bu fonksiyonlar toplanarak sonuca gidilebilir.



Şekil 5.20 Matlab'te Curve Fitting komutu ile Deforme Olmuş Yüzeyin Orta Ekseninin Gösterimi

## 5.2 Punta Makinası Kullanım Tanıma Çalışmaları Sonuçları

Çizelge 5.6 Uygulanan kaynak parametreleri

|                                    | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10  | 11  | 12   | 13 | 14   |
|------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|------|----|------|
| Yaklaşma Zamanı (Çevrim)           | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 20  | 20  | 20   | 20 | 20   |
| Sıkma Zamanı (Çevrim)              | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 20  | 20  | 20   | 20 | 20   |
| Başlangıç % Akım                   | 15   | 15   | 15   | 15   | 15   | 15   | 15   | 15   | 15   | 15  | 15  | 15   | 15 | 15   |
| Yükselme Zamanı (Çevrim)           | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0    | 0  | 0    |
| Kaynak Zamanı (Çevrim)             | 20   | 20   | 10   | 30   | 20   | 30   | 30   | 50   | 30   | 20  | 50  | 20   | 30 | 30   |
| Kaynak % Akım                      | 22   | 30   | 30   | 30   | 30   | 30   | 20   | 30   | 20   | 35  | 25  | 40   | 32 | 30   |
| Darbe Sayısı                       | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0    | 0  | 0    |
| Bitiş % Akım                       | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0    | 0  | 0    |
| İniş Zamanı (Çevrim)               | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 15   | 15  | 15  | 15   | 15 | 15   |
| Tutma Zamanı (Çevrim)              | 15   | 15   | 15   | 15   | 15   | 15   | 20   | 20   | 40   | 10  | 10  | 10   | 10 | 10   |
| Açma Zamanı (Çevrim)               | 10   | 10   | 10   | 10   | 10   | 10   | 10   | 10   | 10   | 10  | 10  | 10   | 10 | 10   |
| Akım Değeri (kA) (Cihazın Kendisi) | 6,02 | 8,53 | 8,78 | 8,53 | 8,03 | 8,78 | 5,52 | 8,28 | 5,27 | 9,7 | 6,7 | 12,8 | 9  | 8,03 |
| Akım Değeri (kA) (Ampermetre ile)  |      | 9,4  | 9,46 | 9,33 | 8,84 | 9,51 | 6,1  |      | 5,8  | 9,9 | 7   | 13,9 |    | 8,9  |

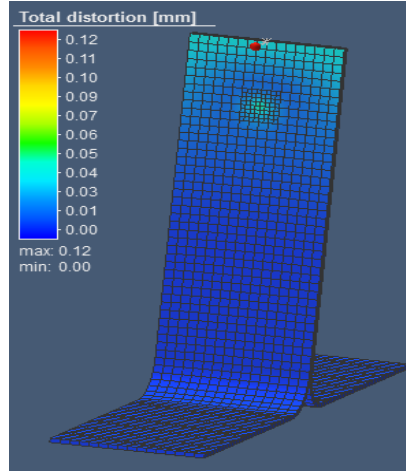
Buna göre örneğin Örnek 14'te istenen kopma sağlanmış ve arzu edilen çekirdeğin oluştuğu görülmüştür.



Şekil 5.21 Örnek 14'teki istenen çekirdek oluşumu

### 5.3 Küçük Parçalar için Regresyon Denemesi Sonuçları

Yeni sürüm üzerinden, distorsiyon üzerinde parametre etkilerini görmek için değişik denemeler yapılmıştır. Sonuçların bazen farklılık gösterdiği görülmüştür. Bu nedenle doğruluklarının incelenmesine devam edilmelidir. Aşağıda yapılan denemelerden bir kısmının sonucu derlenmiştir. Genel olarak şimdiye kadar yapılmış olan denemelerde, yapılacak gerekli karşılaştırmalar için distorsiyon sonucu olarak daha önceki temrinliklere karşılık gelen orta eksenin üst noktası ele alınmıştır (Şekil 5.22).



Şekil 5.22 Simufact Welding 6.0 Sonuç Örneği

#### 5.3.1 Çeşitli Simülasyon Denemeleri ve Distorsiyon Sonuçları (Şekil 5.22’de karşılık gelen orta noktada bulunan)

1. Kısım (Şekil 5.18’deki gibi tek punta atılmıştır):

Joule Kanuna göre bütün adımlarda aynı ısı enerjisini verecek şekilde parametreler ayarlanmıştır. Dist ile gösterilenler distorsiyon sonuçlarıdır.

t=9 Per. I= 6600 A Dist=0.02212 mm

t=7 Per. I= 7600 A Dist=0.03563 mm (F küçültülünce Dist=0.04484 mm)

t=0.11 s I= 8600 A Dist=0.03403 mm

Bütün adımlarda farklı ısı enerjisini verecek şekilde farklı parametreler ayarlanmıştır.

t=0.1 s I= 7600A Dist=0.02151 mm

t=0.18 s I= 7600 A Dist=0.0488 mm

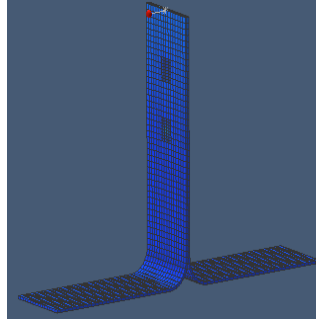
t=0.14 s I= 8600 A Dist=0.04357

2. Kısım (Şekil 5.23'teki gibi çift punta atılmıştır):

t=7 Per. I= 7600 A Dist=0.0585 mm

t=0.14 s I= 6600 A Dist=0.03819 mm

t=0.14 s I= 8600 A Dist=0.03964 mm

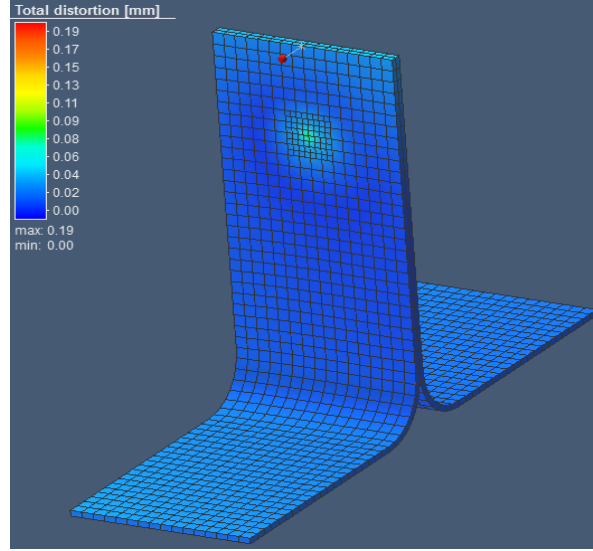


Şekil 5.23 Simufact Welding 6.0 çift punta çalışması

Yukarıda verilen örneklere ve daha sonra yapılan Taguchi çalışmalarına göre de akım ve zamanın arttıkça, elektrod kuvvetinin ise düştükçe distorsiyonun arttığı gözlemlenmiştir. Yalnız bazı akım değerlerinde (örneğin 7600 A) ise distorsiyon değerinin maksimuma ulaştığı ve akım arttırıldıkça distorsiyonun düştüğü görülmüştür. Bu yüzden simülasyon sonuçları iyi incelenmeli ve doğrulukları sorgulanmalıdır. Bununla birlikte sonuçların geometriye, punta noktalarının yer ve sayılarına da bağlı oldukları gözlemlenmiştir.

### 5.3.2 Taguchi Çalışmaları

Punta kaynak parametrelerinin distorsiyon üzerine olan etkisini görmek için Taguchi yöntemine başvurulmuştur. Bu yöntemle dayanarak birçok deneme gerçekleştirilmiştir. Bunlardan birinin deney tablosu (Çizelge 5.7) ve sonuçları aşağıda verilmektedir. Kullanılan modelde (Şekil 5.24) ise tek punta atılmıştır. Parça boyutları konusunda ise Şekil 5.23'a göre farklılık olarak, ikinci punta atılmadığı için buna göre parça boyutları biraz daha küçültülüp punta noktası kenara daha çok yaklaştırılmıştır.



Şekil 5.24 Taguchi yöntemi için kurulan model sonucu örneği

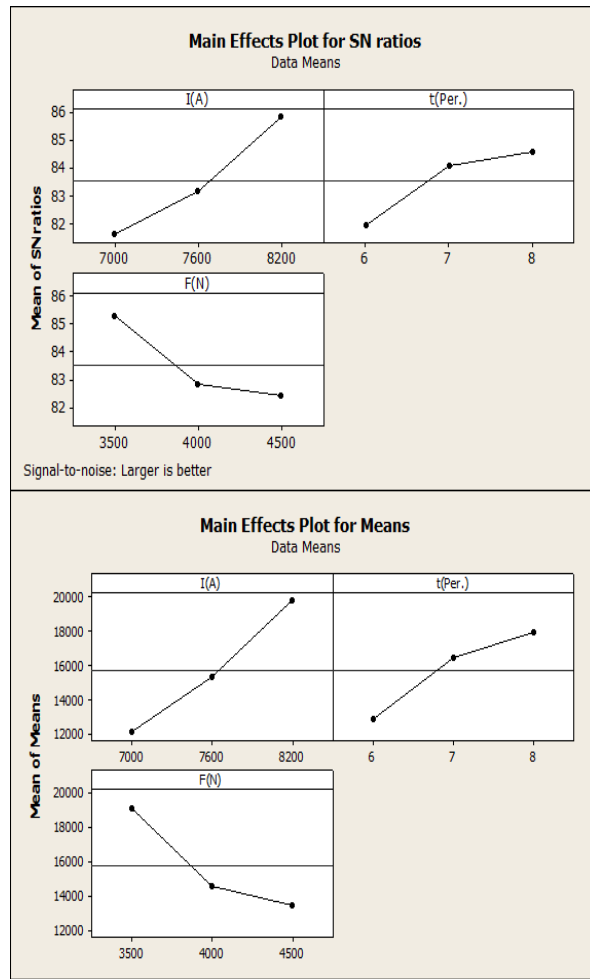
Hem bu örnek hem de diğer örnekler için, deney (simülasyon) sonuçlarını analizde 'Minitab 16' istatistiksel analiz programı kullanılmıştır.

Çizelge 5.7 Taguchi yöntemi için girilen parametre seviye ve değerleri

| I(A) | t(Per.) | F(N) | DİSTORSİYON ( $10^{-6}$ mm) |
|------|---------|------|-----------------------------|
| 7000 | 6       | 3500 | 12400                       |
| 7000 | 7       | 4000 | 13530                       |
| 7000 | 8       | 4500 | 10360                       |
| 7600 | 6       | 4000 | 9603                        |
| 7600 | 7       | 4500 | 13580                       |
| 7600 | 8       | 3500 | 22740                       |
| 8200 | 6       | 4500 | 16460                       |
| 8200 | 7       | 3500 | 22220                       |
| 8200 | 8       | 4000 | 20620                       |



### 5.3.3 Sonuçlar



Şekil 5.25 Taguchi sonuçları

Parametre derecelerini değiştirerek elde edilen çeşitli deneme sonuçları:

The regression equation is

$$\text{DISTORTION} = -28039 + 6,39 I(A) + 2543 t(\text{Per.}) - 5,65 F(N)$$

$$S = 2351,75 \quad R\text{-Sq} = 86,4\% \quad R\text{-Sq}(\text{adj}) = 78,2\%$$

The regression equation ( $I^2$ , F) is

$$\text{DISTORTION} = -3892 + 0,000421 I^2(A) + 2543 t(\text{Per.}) - 5,65 F(N)$$

$$S = 2337,58 \quad R\text{-Sq} = 86,5\% \quad R\text{-Sq}(\text{adj}) = 78,4\%$$

The regression equation ( $I^2$ ,  $F^2$ ) is

$$\text{DISTORTION} = -15239 + 0,000421 I^2(A) + 2543 t(\text{Per.}) - 0,000697 F^2(N)$$

$$S = 2390,91 \quad R\text{-Sq} = 85,9\% \quad R\text{-Sq}(\text{adj}) = 77,4\%$$

The regression equation ( $\sqrt{F}$ ) is

$$\text{DISTORTION} = -5304 + 6,39 I(A) + 2543 t(\text{Per.}) - 718 \sqrt{F(N)}$$

$$S = 2326,46 \quad R\text{-Sq} = 86,6\% \quad R\text{-Sq}(\text{adj}) = 78,6\%$$

The regression equation ( $I^2, \sqrt{F}$ ) is

$$\text{DISTORTION} = 18844 + 0,000421 I^2(A) + 2543 t(\text{Per.}) - 718 \sqrt{F(N)}$$

$$S = 2312,13 \quad R\text{-Sq} = 86,8\% \quad R\text{-Sq}(\text{adj}) = 78,9\%$$

Şekil 5.25'te de görüldüğü üzere şu sonuçlara varılmıştır:

- Uygulanan akım büyük olduğunda distorsiyon büyüktür.
- Uygulanan kaynak zamanı büyük olduğunda distorsiyon büyüktür.
- Uygulanan elektrod kuvveti küçük olduğunda distorsiyon büyüktür.

Bu sonuçlar teori ile de örtüşmüştür. Kaynak akımı ve zamanı arttığında Joule Kanununa göre ısı enerjisi de artmakta ve distorsiyon da artmaktadır. Elektrod kuvveti düştüğünde de aynı etki görülmüştür. Çünkü düşen elektrod kuvveti ile temas alanı düşmüş ve kontak (temas) direnci artıp ısı girdi enerjisi yine büyümüştür. Oluşturulmuş olan regresyon eğrileri de şimdilik yeterli gibi görünse de yukarıda görüldüğü gibi değişik varyasyonlar ile yakınlık derecesi arttırılabilir.

#### 5.3.4 Tam Faktöriyel Çalışmaları

TOFAŞ'ta yapılan çalışmalar sırasında elektrod kuvvetinin pek değiştirilmemesi tavsiye edilmişti. Bunun üzerine elektrod kuvveti inceleme dışı bırakılarak akım ve kaynak zamanının etkisini görmek için çeşitli tam faktöriyel denemeleri yapılmıştır. Bunlardan birinin deney tablosu (Çizelge 5.8) ve sonuçları aşağıda verilmektedir. Görüldüğü üzere akım ve kaynak zamanı 2 parametre olarak belirlenmiş; akım 5 seviyeli, kaynak zamanı ise 4 seviyeli olarak seçilmiştir.

Çizelge 5.8 Tam Faktöriyel yöntemi için girilen parametre seviye ve değerleri

| t (Per.) | I (A) | Distorsiyon ( $10^{-6}$ mm) |
|----------|-------|-----------------------------|
| 6        | 6600  | 11000                       |
| 6        | 7100  | 10160                       |
| 6        | 7600  | 9600                        |
| 6        | 8100  | 21370                       |
| 6        | 8600  | 19060                       |
| 6,5      | 6600  | 11360                       |
| 6,5      | 7100  | 10530                       |
| 6,5      | 7600  | 12400                       |
| 6,5      | 8100  | 20350                       |
| 6,5      | 8600  | 19550                       |
| 7        | 6600  | 10700                       |
| 7        | 7100  | 11600                       |
| 7        | 7600  | 16200                       |
| 7        | 8100  | 19140                       |
| 7        | 8600  | 20520                       |
| 7,5      | 6600  | 10420                       |
| 7,5      | 7100  | 9819                        |
| 7,5      | 7600  | 11780                       |
| 7,5      | 8100  | 21320                       |
| 7,5      | 8600  | 18630                       |

*Kaynak zamanı olarak ondalıklı değerler gerçek uygulamada girilemeye de sadece sonuç görmek ve değer aralığını çok geniş tutmamak için bu çalışma için ondalıklı değerlere başvurulmuştur.*

#### 5.3.4.1 Sonuçlar

Bu çalışmanın sonuçlarına Minitab'te Two-Way Anova analizi uygulanarak aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

## **FULLFACTORIAL(C1:t; C2:I)**

### **Two-way ANOVA: C3 versus C1; C2**

| Source | DF | SS        | MS       | F     | P     |
|--------|----|-----------|----------|-------|-------|
| C1     | 3  | 5860498   | 1953499  | 0,96  | 0,441 |
| C2     | 4  | 374183716 | 93545929 | 46,17 | 0,000 |
| Error  | 12 | 24315793  | 2026316  |       |       |
| Total  | 19 | 404360007 |          |       |       |

S = 1423 R-Sq = 93,99% R-Sq(adj) = 90,48%

**Hesaplanan Etki Oranı:** t: % 1.449 I: %92.537

Yukarıda da ve daha önceki Taguchi analizinden de görüldüğü üzere uygulanan akımın distorsiyon sonucuna etkisi en büyüktür. Daha sonra etki sırası olarak etki büyüklüğüne göre elektrod kuvveti ve uygulanan kaynak zamanı sıralanabilir.

Yukarıda gerçekleştirilen analiz ve deney örnekleri çalışmaları (her ne kadar farklı bir malzeme St 316 için yapılmış da olsa) TOFAŞ'taki çalışmalar için bir ön izlenim özelliği taşımaktadır.

## **5.4 TOFAŞ Endüstriyel Uygulama Örneği**

### **5.4.1 Kaynak Uygulaması**

TOFAŞ'ta uygulanan kaynak aşaması sonucu yukarıda resim örneği verilen montaj grupları oluşturulmuştur.

### **5.4.2 3B Tarama İşlemleri**

Gerek tekil parçaların gerekse montaj parçalarının taranması sonucu CAD datasından sapmalar elde edilmiştir. Montaj parçalarının sapmalarından tekil parçaların sapmalarının aritmetik olarak çıkarılması sonucu distorsiyonlara ulaşılmaktadır. Bunun bir örneği tekil parçalardan Rinforzo için aşağıda gösterilmektedir. Tablolarda verilen noktaların numaraları Şekil 5.26'da verilmiştir.

Çizelge 5.9 Rinforzo için tekilde sapma miktarları

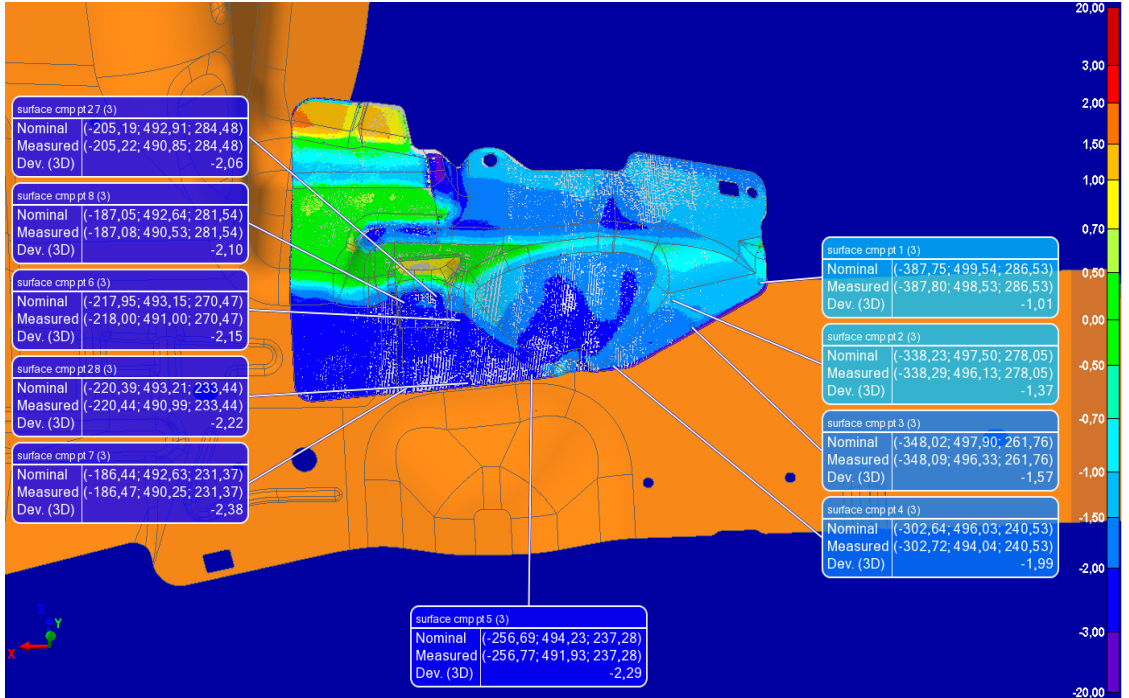
| Tekilde   | Deney No 1 | Deney No 2 | Deney No 3 | Deney No 4 | Deney No 5 | Deney No 6 | Deney No 7 | Deney No 8 | Deney No 9 | Deney No 10 | Deney No 11 | Deney No 12 | Deney No 13 | Deney No 14 | Deney No 15 | Deney No 16 | Deney No 17 | Deney No 18 | Deney No 19 | Deney No 20 |
|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Cmp Pt 3  | 0,07       | 0,09       | 0,08       | 0,09       | 0,05       | 0,07       | 0,07       | 0,11       | 0,13       | 0,09        | 0,09        | 0,09        | 0,07        | 0,11        | 0,09        | 0,07        | 0,09        | 0,06        | 0,08        | 0,1         |
| Cmp Pt 4  | 0,07       | 0,09       | 0,05       | 0,07       | 0,06       | 0,09       | 0,08       | 0,05       | 0,09       | 0,07        | 0,05        | 0,08        | 0,06        | 0,09        | 0,05        | 0,05        | 0,06        | 0,01        | 0,02        | 0,1         |
| Cmp Pt 5  | 0,15       | 0,15       | 0,12       | 0,13       | 0,16       | 0,18       | 0,16       | 0,11       | 0,13       | 0,12        | 0,13        | 0,15        | 0,13        | 0,19        | 0,09        | 0,16        | 0,13        | 0,1         | 0,1         | 0,18        |
| Cmp Pt 28 | -0,25      |            |            |            |            |            |            |            |            |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |
| Cmp Pt 7  | -0,2       | -0,18      | -0,18      | -0,19      | -0,21      | -0,17      | -0,15      | -0,22      | -0,19      | -0,23       | -0,24       | -0,2        | -0,22       | -0,17       | -0,2        | -0,19       | -0,2        | -0,22       | -0,18       | -0,19       |
| Cmp Pt 8  | 0,11       | 0,12       | 0,09       | 0,09       | 0,09       | 0,11       | 0,14       | 0,1        | 0,11       | 0,1         | 0,11        | 0,11        | 0,09        | 0,13        | 0,09        | 0,07        | 0,08        | 0,09        | 0,09        | 0,11        |
| Cmp Pt 27 | 0,02       |            |            |            |            |            |            |            |            |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |
| Cmp Pt 6  | 0,15       | 0,18       | 0,12       | 0,15       | 0,12       | 0,17       | 0,2        | 0,13       | 0,18       | 0,17        | 0,16        | 0,17        | 0,13        | 0,19        | 0,12        | 0,13        | 0,12        | 0,16        | 0,16        | 0,15        |
| Cmp Pt 2  | -0,16      | -0,11      | -0,15      | -0,15      | -0,14      | -0,15      | -0,09      | -0,12      | -0,12      | -0,11       | -0,16       | -0,06       | -0,14       | -0,12       | -0,13       | -0,1        | -0,13       | -0,17       | -0,12       | -0,12       |
| Cmp Pt 1  | -0,23      | -0,22      | -0,28      | -0,27      | -0,29      | -0,3       | -0,28      | -0,24      | -0,26      | -0,25       | -0,3        | -0,29       | -0,28       | -0,28       | -0,26       | -0,23       | -0,29       | -0,29       | -0,27       | -0,23       |

Çizelge 5.10 Rinforzo için montajda sapma miktarları

| Montajda  | Deney No 1 | Deney No 2 | Deney No 3 | Deney No 4 | Deney No 5 | Deney No 6 | Deney No 7 | Deney No 8 | Deney No 9 | Deney No 10 | Deney No 11 | Deney No 12 | Deney No 13 | Deney No 14 | Deney No 15 | Deney No 16 | Deney No 17 | Deney No 18 | Deney No 19 | Deney No 20 |
|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Cmp Pt 7  | -1,99      | -2,44      | -2,09      | -1,97      | -2,78      | -2,38      | -2,44      | 2,28       | -2,02      | -1,62       | -1,73       | -2,5        | -2,1        | -1,93       | -2,15       | -2,1        | -2,28       | -2,35       | -1,88       | -2,02       |
| Cmp Pt 28 | -1,75      | -2,13      | -1,84      | -1,8       | -2,57      | -2,22      | -2,27      | -2,06      | -1,77      | -1,46       | -1,61       | -2,34       | -1,99       | -1,76       | -1,97       | -1,96       | -2,12       | -2,3        | -1,67       | -1,84       |
| Cmp Pt 5  | -1,82      | -2,05      | -1,83      | -1,77      | -2,52      | -2,29      | -2,24      | -2,09      | -1,65      | -1,41       | -1,54       | -2,39       | -2          | -1,69       | -1,85       | -1,9        | -2,02       | -2,23       | -1,59       | -1,66       |
| Cmp Pt 4  | -1,61      | -1,77      | -1,34      | -1,56      | -2,17      | -1,99      | -2,01      | -1,91      | -1,14      | -1,15       | -1,37       | -1,99       | -1,75       | -1,56       | -1,62       | -1,66       | -1,82       | -1,88       | -1,4        | -1,41       |
| Cmp Pt 3  | -1,28      | -1,38      | -1,17      | -1,19      | -1,69      | -1,57      | -1,61      | -1,58      | -1,03      | -0,92       | -1,07       | -1,67       | -1,48       | -1,23       | -1,24       | -1,41       | -1,5        | -1,68       | -1,16       | -1,05       |
| Cmp Pt 1  | -1,08      | -1,08      | -1,01      | -0,82      | -1,15      | -1,01      | -1,19      | -1,08      | -0,7       | -0,69       | -0,78       | -1,32       | -1,13       | -0,9        | -0,89       | -1,07       | -1,22       | -1,56       | -0,79       | -0,74       |
| Cmp Pt 2  | -1,26      | -1,37      | -1,18      | -1,1       | -1,6       | -1,37      | -1,48      | -1,26      | -0,97      | -0,89       | -1,01       | -1,59       | -1,42       | -1,18       | -1,17       | -1,36       | -1,46       | -1,66       | -1,01       | -0,99       |
| Cmp Pt 6  | -1,85      | -2,28      | -1,93      | -1,9       | -2,57      | -2,15      | -2,19      | -2,04      | -1,88      | -1,47       | -1,71       | -2,39       | -2,05       | -1,82       | -2,01       | -1,99       | -2,15       | -2,27       | -1,71       | -1,88       |
| Cmp Pt 27 | -1,82      | -2,32      | -1,92      | -1,89      | -2,57      | -2,06      | -2,13      | -2,01      | -1,87      | -1,53       | -1,71       | -2,32       | -2,05       | -1,8        | -2,01       | -1,92       | -2,12       | -2,24       | -1,66       | -1,93       |
| Cmp Pt 8  | -1,9       | -2,37      | -2         | -1,99      | -2,66      | -2,1       | -2,2       | -2,07      | -2         | -1,59       | -1,78       | -2,43       | -2,09       | -1,87       | -2,08       | -2,02       | -2,2        | -2,29       | -1,76       | -2,04       |

Çizelge 5.11 Rinforzo için distorsiyon miktarları

| Sigma    | Deney No 1 | Deney No 2 | Deney No 3 | Deney No 4 | Deney No 5 | Deney No 6 | Deney No 7 | Deney No 8 | Deney No 9 | Deney No 10 | Deney No 11 | Deney No 12 | Deney No 13 | Deney No 14 | Deney No 15 | Deney No 16 | Deney No 17 | Deney No 18 | Deney No 19 | Deney No 20 |
|----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Cmp Pt 7 | -1,79      | -2,26      | -1,91      | -1,78      | -2,57      | -2,21      | -2,29      | 2,5        | -1,83      | -1,39       | -1,49       | -2,3        | -1,88       | -1,76       | -1,95       | -1,91       | -2,08       | -2,13       | -1,7        | -1,83       |
| Cmp Pt 5 | -1,97      | -2,2       | -1,95      | -1,9       | -2,68      | -2,47      | -2,4       | -2,2       | -1,78      | -1,53       | -1,67       | -2,54       | -2,13       | -1,88       | -1,94       | -2,06       | -2,15       | -2,33       | -1,69       | -1,84       |
| Cmp Pt 4 | -1,68      | -1,86      | -1,39      | -1,63      | -2,23      | -2,08      | -2,09      | -1,96      | -1,23      | -1,22       | -1,42       | -2,07       | -1,81       | -1,65       | -1,67       | -1,71       | -1,88       | -1,89       | -1,42       | -1,51       |
| Cmp Pt 3 | -1,35      | -1,47      | -1,25      | -1,28      | -1,74      | -1,64      | -1,68      | -1,69      | -1,16      | -1,01       | -1,16       | -1,76       | -1,55       | -1,33       | -1,33       | -1,48       | -1,59       | -1,74       | -1,24       | -1,15       |
| Cmp Pt 1 | -0,85      | -0,86      | -0,73      | -0,55      | -0,86      | -0,71      | -0,91      | -0,84      | -0,44      | -0,44       | -0,48       | -1,03       | -0,85       | -0,62       | -0,63       | -0,84       | -0,93       | -1,27       | -0,52       | -0,51       |
| Cmp Pt 2 | -1,1       | -1,26      | -1,03      | -0,95      | -1,46      | -1,22      | -1,39      | -1,14      | -0,85      | -0,78       | -0,85       | -1,53       | -1,28       | -1,06       | -1,04       | -1,26       | -1,33       | -1,49       | -0,89       | -0,87       |
| Cmp Pt 6 | -2         | -2,46      | -2,05      | -2,05      | -2,69      | -2,32      | -2,39      | -2,17      | -2,06      | -1,64       | -1,87       | -2,56       | -2,18       | -2,01       | -2,13       | -2,12       | -2,27       | -2,43       | -1,87       | -2,03       |
| Cmp Pt 8 | -2,01      | -2,49      | -2,09      | -2,08      | -2,75      | -2,21      | -2,34      | -2,17      | -2,11      | -1,69       | -1,88       | -2,54       | -2,18       | -2          | -2,17       | -2,09       | -2,28       | -2,38       | -1,85       | -2,15       |



Şekil 5.26 Rinforzo parçası için sonuç noktaları gösterimi

Bu çalışmaya paralel Şekil 5.26'da pt5 noktası için ANOVA analizi yapılmıştır. Pt 5 için Varyasyon Analizi Sonuçları verilmiştir. Buna göre sırasıyla I, t ve F için SS değerleri aşağıdaki gibidir.

Analysis of Variance

| Source         | DF | SS      | MS      | F    | P     |
|----------------|----|---------|---------|------|-------|
| Regression     | 3  | 0,65198 | 0,21733 | 5,59 | 0,023 |
| Residual Error | 8  | 0,31129 | 0,03891 |      |       |
| Total          | 11 | 0,96327 |         |      |       |

| Source | DF | Seq SS  |
|--------|----|---------|
| C7     | 1  | 0,01901 |
| C8     | 1  | 0,22963 |
| C9     | 1  | 0,40333 |

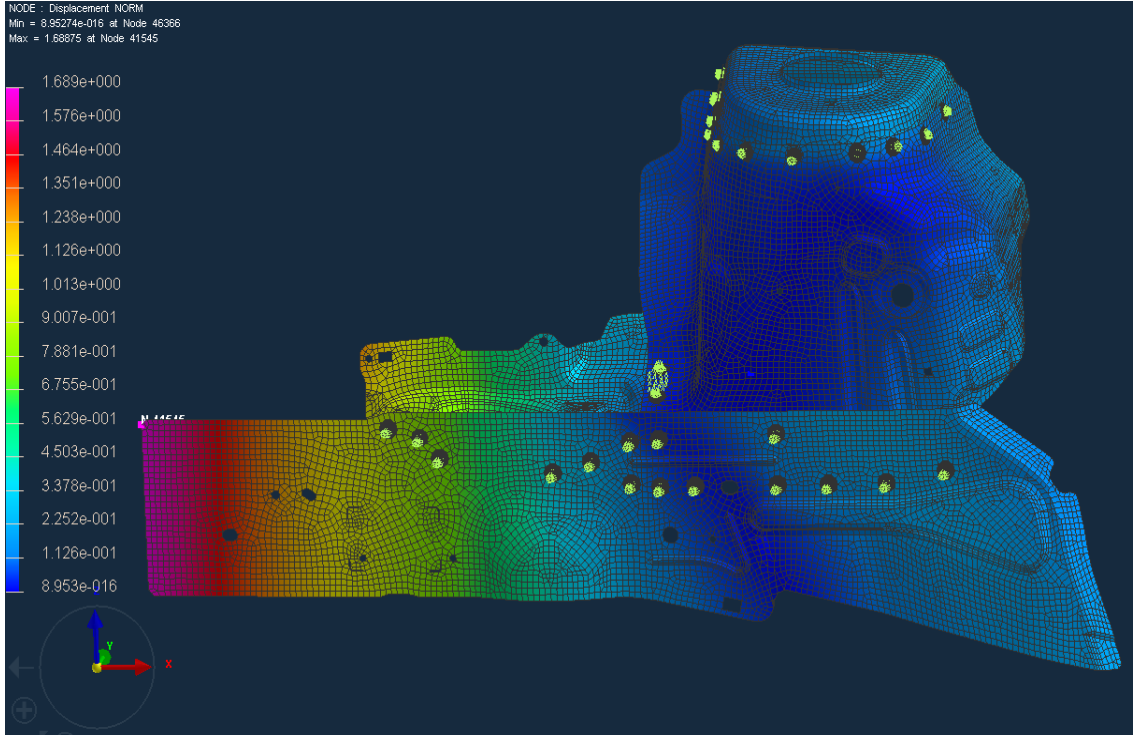
Buna göre hatayı da etki payı içine katarsak (Shah vd.'nin yayınına [78] benzer şekilde) etki oranları şu şekildedir:

Etki Oranı (I) =  $0,01901/0,9637 = \%1,9726$

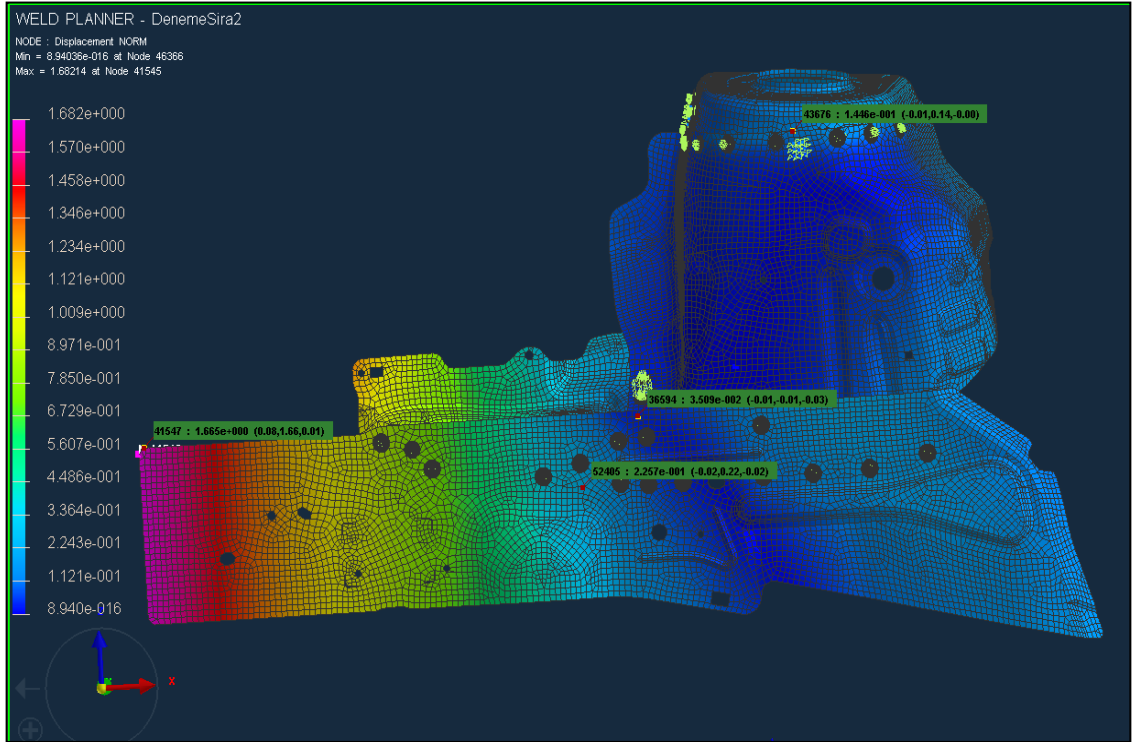
Etki Oranı (t) =  $0,22963/0,9637 = \%23,828$

Etki Oranı (F) =  $0,40333/0,9637 = \%41,8522$

### 5.4.3 Analiz Çalışması 1 Sonuçları



Şekil 5.27 1. Kaynak sırası için Distorsiyon Sonuçları



Şekil 5.28 2. Kaynak sırası için Distorsiyon Sonuçları

Yukarıdaki şekillerde gösterilmiş sapmalar soldan sağa doğru şu şekilde verilebilir:

Sıra 1:

1.670 0.2303 0.03565 0.1442

Sıra 2:

1.665 0.2257 0.03509 0.01446

Eğer en üst parçadaki stopp (tek taraftan dayama ve sınırlandırma) clamping'e çevirilir ise distorsiyonlar şu şekildedir:

Sıra 1:

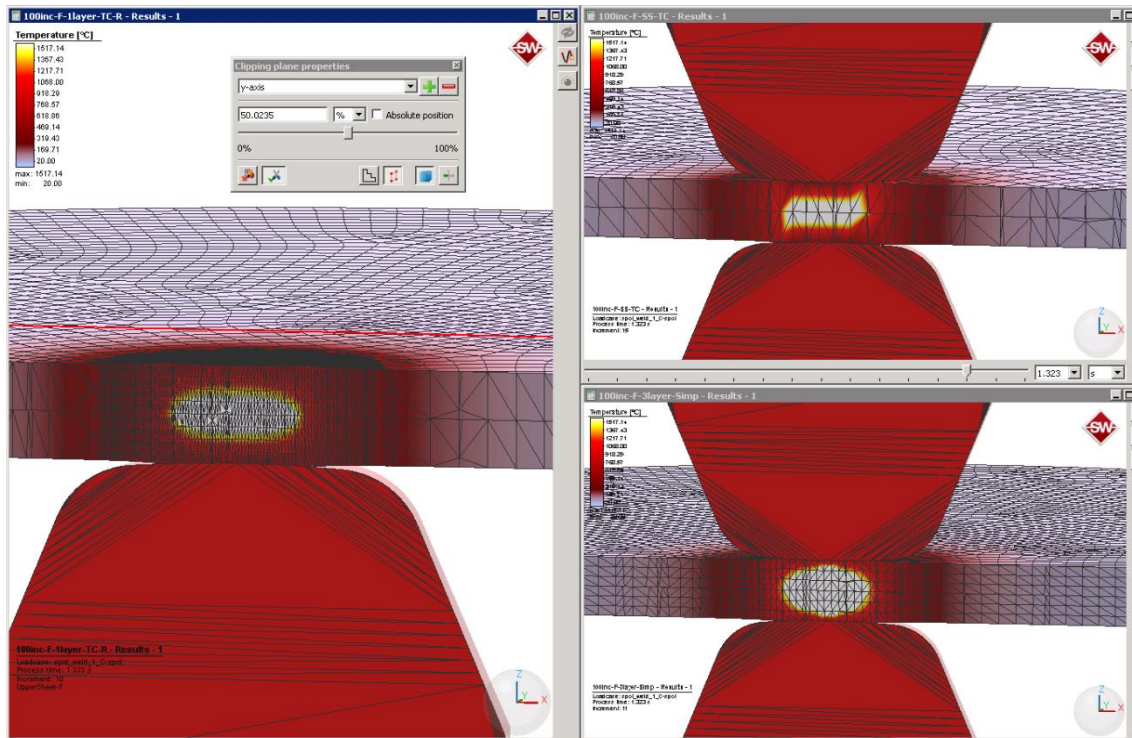
1.672 0.035 0.155

Sıra 2:

0.036 0.150

#### 5.4.4 Analiz Çalışması 2 Sonuçları

Yukarıda Simufact modeli verilen simülasyon koşturulmuştur. Bu simülasyon için tek sıra; üç sıra veya solid-shell gibi mesh yöntemleri mevcuttur. Aşağıda bu yöntemlerle elde edilmiş çekirdek görüntüleri verilmektedir.



Şekil 5.29 Çeşitli mesh yöntemleri için çekirdek görüntüleri



Şekil 5.29’da gerçek çekirdeğe en yakın sonuçlar sağ altta 3 tabaka mesh’te gerçekleşmiştir. Bunu solid-shell (solda) izlemektedir. Tek layer’da daha kötü çekirdek çapı oluşmuş olsa da bu yöntem ile simülasyonlar koşturulacaktır. Çünkü diğer yöntemlerde 5 güne varan koşma sürelerine ve kuvvetli donanımına ihtiyaç vardır. Bu tezde amaç bir metodoloji sunmak olduğu için çok hassas çözümlere de ihtiyaç yoktur.

Daha sonra DOE şartlarına göre punta sıyırma ve çekme testlerinden çıkan sonuçlara dayalı sınırlar içerisinde simülasyon deney parametreleri belirlenmiş ve koşturulmuştur. Burada cevap yüzey yöntemi ve merkezi kompozit parametre tasarım yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntem simülasyon yolu için tavsiye edilmektedir [16].

Buna göre sınırlar aşağıdaki şekilde seçilmiştir:

Birincisi:

$I_1=9000\text{ A}$   $I_2=11000\text{ A}$

$t_1=10\text{ Per.}$   $t_2=13\text{ Per.}$

$F_1=3200\text{ N}$   $F_2=3500\text{ N}$

İkincisi (Üçlü sac bölgeleri için):

$I_1=9100\text{ A}$   $I_2=10500\text{ A}$

$t_1=10\text{ Per.}$   $t_2=12\text{ Per.}$

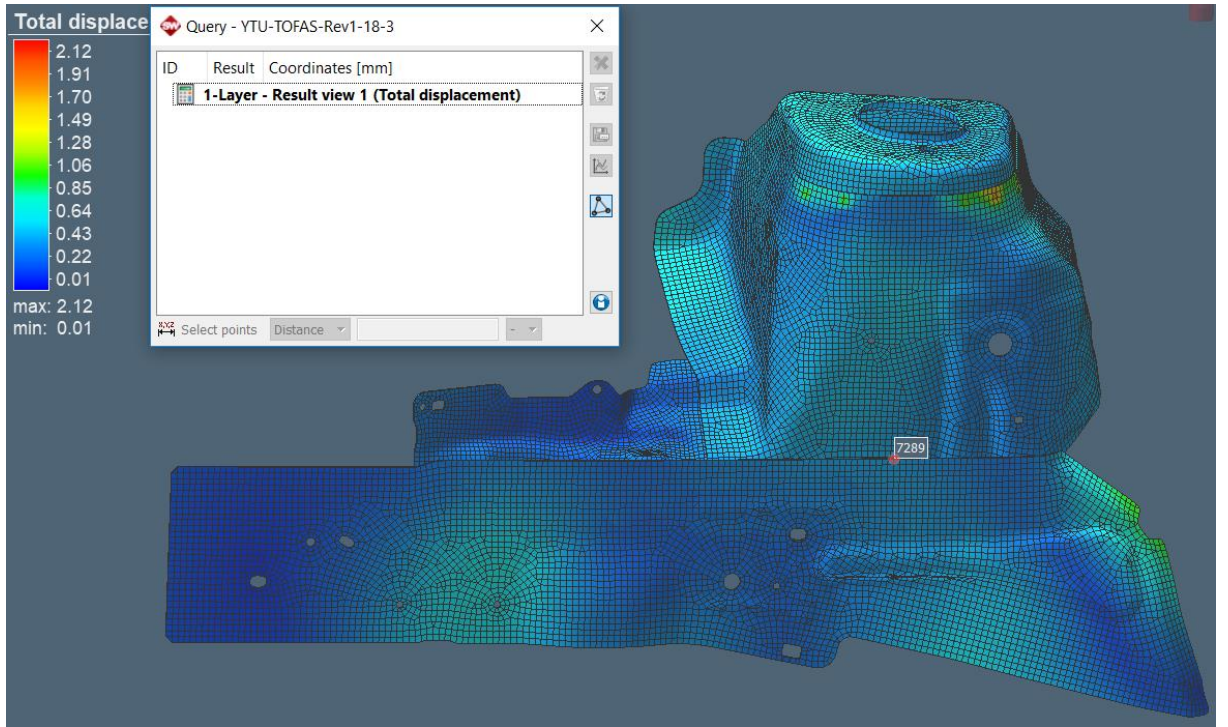
$F_1=3200\text{ N}$   $F_2=3500\text{ N}$

Burada her bir sac birleşme grubu için, punta sıyırma ve çekme testlerinden oluşturulan sınır parametre değerleri kullanılmamıştır. Gerçeğe (TOFAŞ uygulamasına) yakın bir model yaratmak için punta parametreleri ikili ve üçlü saca göre ayrılmıştır. Bütün parametre çiftleri ele alınsaydı; sonuçları derlerken hangi parametrelerin değerlendirileceği yönünde karışıklık meydana gelecekti. Aşağıda merkezi kompozit dizayna göre belirlenen parametreler ve simülasyon sonuçları verilmiştir. Merkezi kompozit dizayn taslağı Minitab’te oluşturulmuştur.

Çizelge 5.12 Merkezi Kompozit Parametre Tasarım Yöntemine göre parametre değerleri ve ilgili distorsiyon sonuçları

| I (A)   | t (Per.) | F (N)   | Dist. (mm) |
|---------|----------|---------|------------|
| 10000   | 11,5     | 3200    | 0,373266   |
| 10000   | 11,5     | 3350    | 0,371154   |
| 11000   | 11,5     | 3350    | 0,380175   |
| 10000   | 13       | 3350    | 0,381444   |
| 10000   | 11,5     | 3350    | 0,371154   |
| 10000   | 11,5     | 3500    | 0,378796   |
| 10000   | 10       | 3350    | 0,367591   |
| 9000    | 11,5     | 3350    | 0,340394   |
| 9387,63 | 12,42    | 3258,14 | 0,37507    |
| 10612,4 | 12,42    | 3258,14 | 0,391887   |
| 10000   | 11,5     | 3350    | 0,371154   |
| 10612,4 | 10,58    | 3441,86 | 0,372002   |
| 9387,63 | 12,42    | 3441,86 | 0,38242    |
| 10612,4 | 10,58    | 3258,14 | 0,367088   |
| 9387,63 | 10,58    | 3258,14 | 0,353174   |
| 10000   | 11,5     | 3350    | 0,371154   |
| 10612,4 | 12,42    | 3441,86 | 0,397728   |
| 10000   | 11,5     | 3350    | 0,371154   |
| 10000   | 11,5     | 3350    | 0,371154   |
| 9387,63 | 10,58    | 3441,86 | 0,359434   |

Sonuçlar Node 7289'dan alınmış olup yeri aşağıda verilmektedir. Bu noktanın seçilme nedeni bu noktanın tezin sonundaki Şekil 5.49 ve 5.50'deki Tolerans Analizi hesabında kullanılmasıdır.



Şekil 5.30 Distorsiyon sonuçlarının alındığı node gösterimi

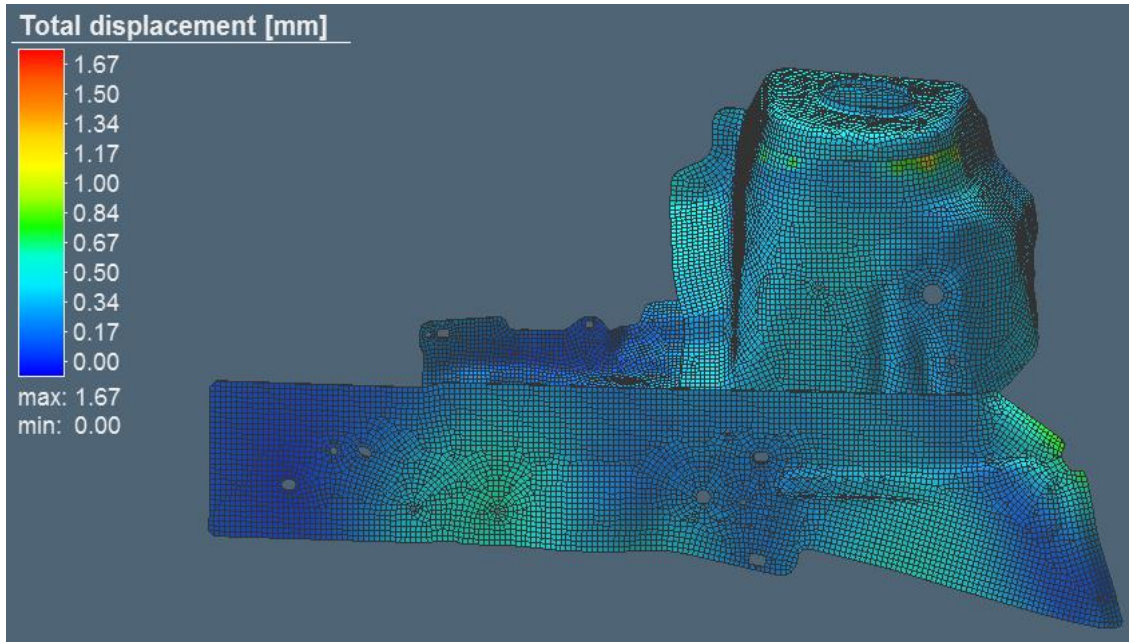
Yukarıdaki sonuç verisine Minitab yazılımında cevap yüzey metodu uygulanarak aşağıdaki sonuç elde edilmiştir:

R-Sq = 88,62% R-Sq(adj) = 78,38%

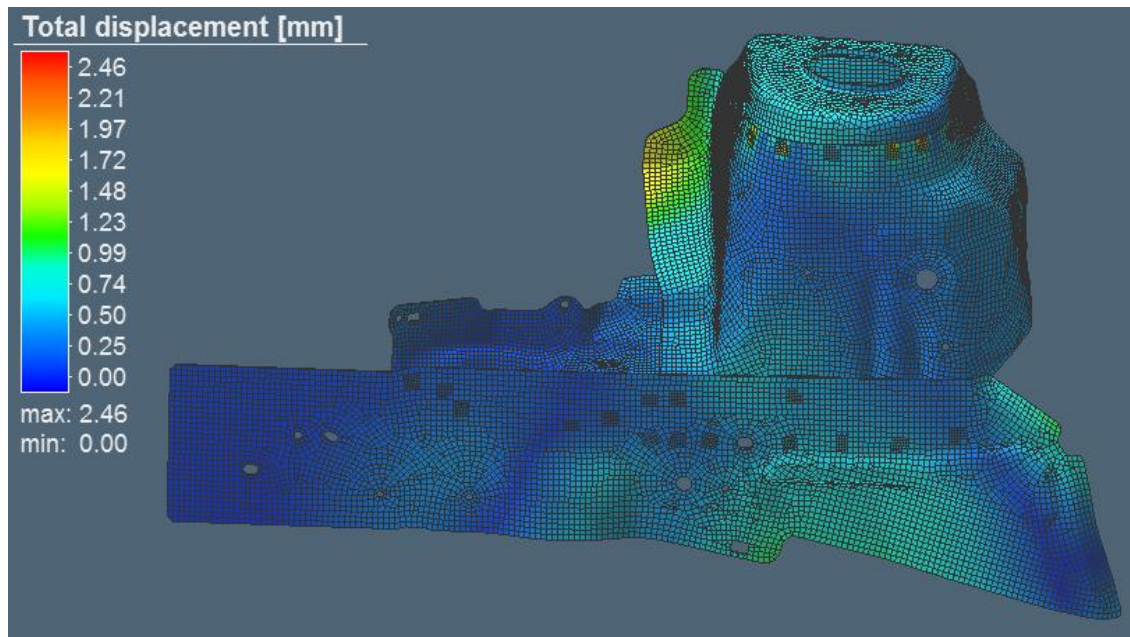
| Term     | Coef         |
|----------|--------------|
| Constant | 3,49968      |
| C9       | 0,000181831  |
| C10      | -0,0767621   |
| C11      | -0,00225272  |
| C9*C9    | -7,99227E-09 |
| C10*C10  | 0,00277729   |
| C11*C11  | 3,44645E-07  |
| C9*C10   | 1,25214E-06  |
| C9*C11   | -6,34379E-09 |
| C10*C11  | 2,98333E-06  |

Burada C9 akım (I); C10 kaynak zamanı (t); C11 ise elektrod kuvvetidir (F). Önlerindeki katsayılar yukarıdaki gibidir. Bu katsayılar kodlanmamış birimler içindir.

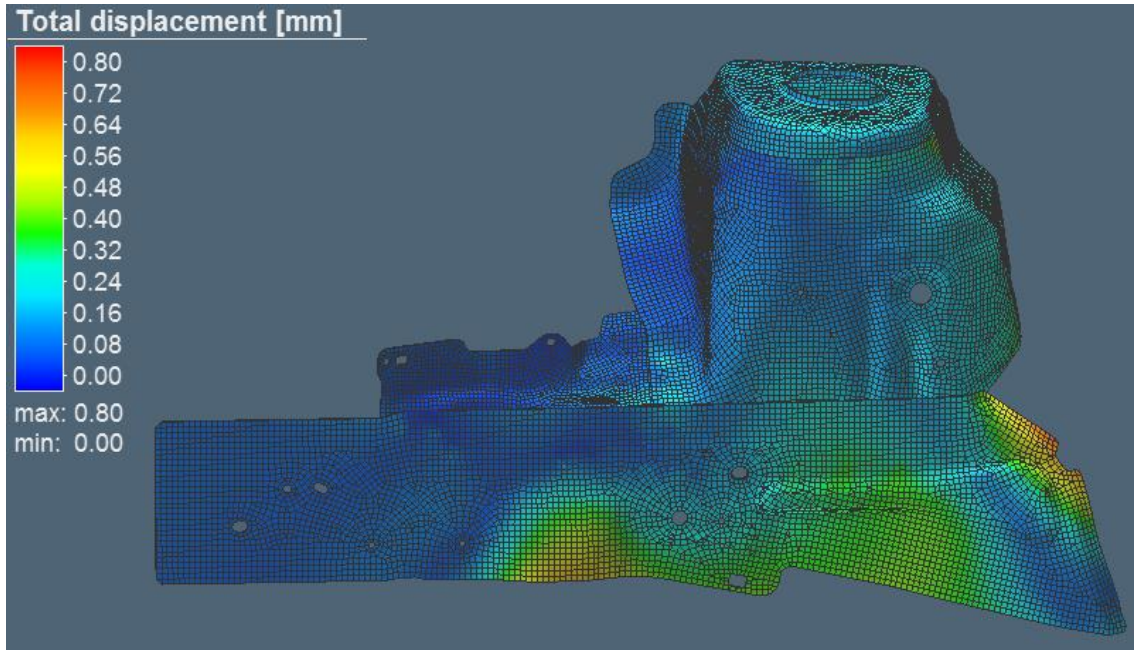
Aşağıda (Şekil5.31-5.32-5.33) tek tabakalı mesh, solid-shell mesh ve single-shot yöntemi ile ilgili sonuçlar verilmektedir. Solid-shell'de aralarda da olmak üzere toplam 8 integrasyon noktası vardır. Single-shot yönteminde ise puntalar aynı anda atılmaktadır.



Şekil 5.31 Tek katmanlı mesh sonucu



Şekil 5.32 Solid-shell mesh sonucu

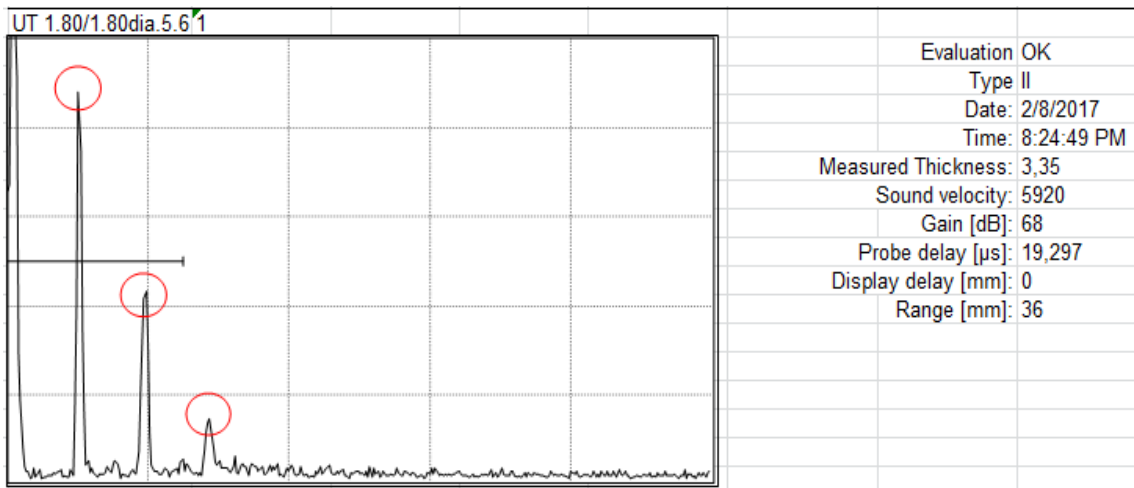


Şekil 5.33 Single-shot yöntemi sonucu

Yukarıdaki sonuçlardan da görüldüğü üzere değişik yöntemler ile değişik sonuçlara varılmaktadır. Şekil 5.30'daki yöntemde kaynak bölgeleri yazılım tarafından daha ince (hassas) hale (refinement) getirilmektedir.

#### 5.4.5 Ultrasonik Testlerin Sonuçları

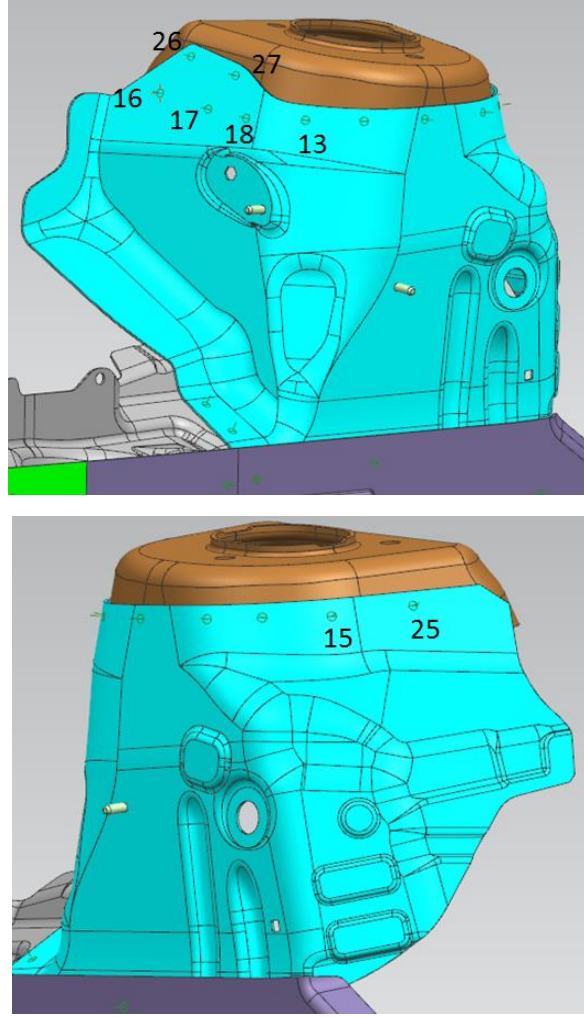
Bütün noktalardaki ultrason test sonuçları Şekil 2.19 ve Şekil 2.25'te verilen test sonucu verisine benzer şekilde değerlendirilerek verilmiştir.



Şekil 5.34 Ultrasonik Testte Good Weld Örneği



*Bu kısımdaki yorumlar Şekil 4.23'teki (Kaynak Sırası 1 için gösterilen) ve aşağıdaki Şekil 5.35'teki punta noktalarına göre yapılacaktır.*



Şekil 5.35 Uygulanan Kaynak sırası 1'e göre diğer punta nokta numaraları

*Aşağıdaki sonuçlarda Çizelge 4.2'deki deney basamakları numaraları ile gösterilmiştir.*

- **1, 19, 20, 2, 3 Noktaları:**  
Hepsi OK bütün komplelerde. Yalnız 17'de 1 Burnt.

1 ila 8 arasında da hepsi OK.

- **5, 4, 21, 22 Noktaları (Üçlü Sac Bölgesi):**  
9'da Hepsi Burnt.  
10'da Hepsi Burnt; 4 OK  
11'de Hepsi Burnt.

12'de Hepsi Burnt.

13'te Hepsi Burnt; 21 OK

14'ten 19'a kadar bütün komplelerin hepsi Burnt.

20'de Hepsi Burnt; 22 OK

1'de 21 ve 22 OK; 4 ve 5 Burnt

2 ve 3'te hepsi Burnt

4'te 21 ve 4 Burnt

5'te hepsi Burnt.

6'da 4 ve 5 Burnt.

7 ve 8'de hepsi Burnt.

- **28, 29 Noktaları:**

Hepsi OK bütün komplelerde. Yalnız 20'de 29 Burnt.

1 ila 8 arasında da hepsi OK.

- **10, 23, 6, 7, 8, 9 Noktaları:**

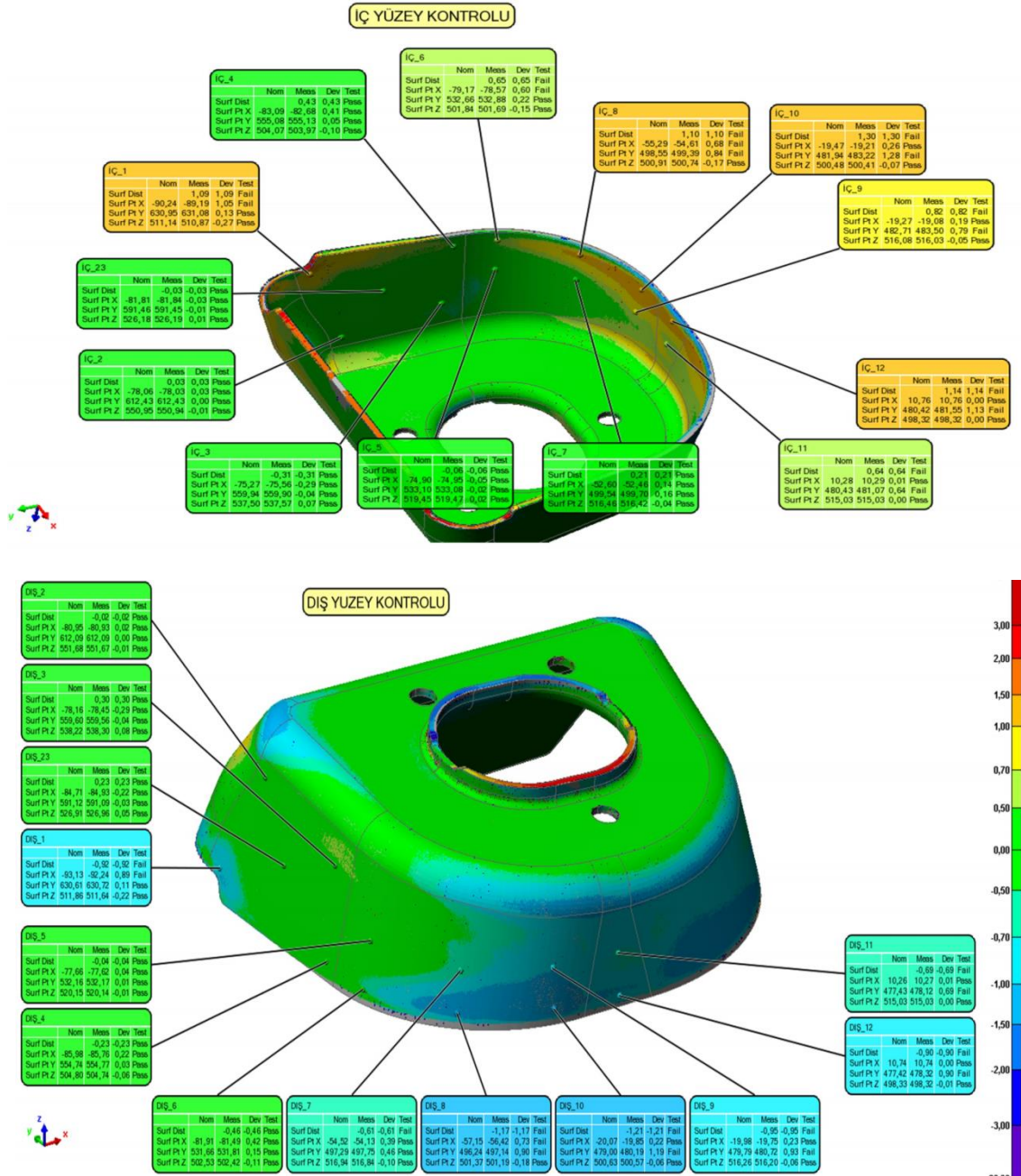
Hepsi OK bütün komplelerde bütün noktalar.

1 ila 8 arasında da hepsi OK bütün komplelerde bütün noktalar.

Bu sonuçlara göre uzun 'Scatolamento Puntone DX' parçasının sol tarafındaki ikili sac bölgesindeki 1,19,20,2,3 noktaları genelde OK; ortasındaki üçlü sac bölgesindeki 5, 4, 21 ve 22 noktaları genelde Burnt; eğik düzlemdeki 28 ve 29 noktaları OK; 10, 23, 6, 7, 8, 9 noktaları ise OK punta kaynak sonucu vermiştir.

11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 24, 25, 26 ve 27 noktaları ise kompleinin üst bölgesinde yer alan noktalar olup eğimli ve kalınlığı değişen Montante Attacco parçasının üzerinde yer aldıkları için ayrıca incelenmiştir. Kaynak planında parçalar sabit kalınlıkta kabul edilmektedir. Fakat gerçekte örneğin 3 mm kalınlığındaki Montante Attacco parçasında kalınlığın 2.7 ile 3.4 mm arasında değiştiği ultrasonik test sırasında gözlemlenmiştir. Bunun üzerine başta sadece yüzey tarandığı için Montante Attacco parçasının bir tane

örneğin her iki yüzeyi taranmış ve parçanın punta bölgesi yakınındaki kalınlık dağılımları raporlanmıştır (Şekil 5.35). Excel’de hesaplanan kalınlık sonuç örnekleri ise Çizelge 5.12’de verilmektedir.



Şekil 5.36 Montante Attacco Parçasının her iki Yüzeyinin Taranması



Çizelge 5.13 Montante Attacco Parçası Punta ve Raporlama Noktalarına Göre Kalınlık Sonuçları

| Nokta | X dış  | Y dış  | Z dış  | X iç   | Y iç   | Z iç   | Kalınlık (mm) |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------|
| 1     | -92,24 | 630,72 | 511,64 | -89,19 | 631,08 | 510,87 | 3,166228      |
| 2     | -80,93 | 612,09 | 551,67 | -78,03 | 612,43 | 550,94 | 3,009734      |
| 3     | -78,45 | 559,56 | 538,3  | -75,56 | 559,9  | 537,57 | 3,0001        |
| 4     | 85,76  | 554,77 | 504,74 | -82,68 | 555,13 | 503,97 | 168,4421      |
| 5     | -77,62 | 532,17 | 520,14 | -74,95 | 533,08 | 519,47 | 2,899293      |
| 6     | -81,49 | 531,81 | 502,42 | -78,57 | 532,88 | 501,69 | 3,194401      |
| 7     | -54,13 | 497,75 | 516,84 | -52,46 | 499,7  | 516,42 | 2,6015        |
| 8     | -56,42 | 497,14 | 501,19 | -54,61 | 499,39 | 500,74 | 2,922516      |
| 9     | -19,75 | 480,72 | 516,2  | -19,08 | 483,5  | 516,03 | 2,864647      |
| 10    | -19,85 | 480,19 | 500,57 | -19,21 | 483,22 | 500,41 | 3,100984      |
| 11    | 10,27  | 478,12 | 515,03 | 10,29  | 481,07 | 515,03 | 2,950068      |
| 12    | 10,74  | 478,32 | 498,32 | 10,76  | 481,55 | 498,32 | 3,230062      |
| 23    | -84,93 | 591,09 | 526,96 | -81,84 | 591,45 | 526,19 | 3,204778      |
| 13    | 48,67  | 481,37 | 498,48 | 47,94  | 484,33 | 498,29 | 3,054603      |
| 14    | 45,11  | 481,47 | 516,78 | 44,44  | 484,17 | 516,61 | 2,787077      |
| 15    | 74,83  | 495,6  | 517,1  | 73,31  | 497,7  | 516,71 | 2,621545      |
| 16    | 78,52  | 495,46 | 499,68 | 76,94  | 497,68 | 499,28 | 2,754052      |
| 17    | 106,69 | 540,6  | 520,7  | 104,04 | 541,42 | 520,03 | 2,853734      |
| 18    | 112    | 541,09 | 499,43 | 109,29 | 541,9  | 498,74 | 2,911409      |
| 19    | 113,47 | 580,52 | 525,02 | 110,72 | 581    | 524,33 | 2,875587      |
| 20    | 119,58 | 581,2  | 499,99 | 116,62 | 581,72 | 499,24 | 3,097499      |
| 21    | 121,06 | 628,43 | 529,02 | 118,21 | 628,93 | 528,3  | 2,981761      |
| 22    | 126,94 | 626,06 | 502,32 | 123,96 | 626,58 | 501,56 | 3,119038      |
| 57    | 96,38  | 514,94 | 508,48 | 94,29  | 516,47 | 507,95 | 2,643842      |

Yukarıda bazı örnek noktaları verilen işlemde 3,4 mm'ye kadar kalınlıkların çıktığı görülmüştür. Ultrasonik test aleti ile ölçülen kalınlığın 2,73 ile 3,47 mm arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Mikrometre ile yapılan ölçümlere göre ise kalınlıklar 2,77 ile 3,38 mm değerleri arasındadır. Farklı noktalar ve bölgeler taramada göz önüne alındığı ve ultrason ve mikrometre ile ölçülen noktalar da bunlardan farklı olduğu için ortalama bir yaklaşım yapılmış ve kalınlıklar belirlenip bunlar ileride görülecek dalma hesaplarına katılmıştır. Ayrıca kompledeki diğer 3 parça da ölçülmüş, bunlarda sonucu etkileyecek büyük kalınlık değişikliklerine rastlanmamıştır.

Toplam hesaplanan yeni dalma değerine göre eski ve yeni sonuçların karşılaştırmalı olarak incelendiği ve gösterildiği iki örnek tablo aşağıda verilmiştir.

Çizelge 5.14 Nokta 14 için Bilgiler ve Kalınlığa göre Ultrasonik Test Tablosu

| Komple No | Measured Thickness | Evaluation | CAD Kalınlığına Göre (4,37) | Hesaplanan ve Ölçülen Kalınlığa Göre (4,1325) | Yorumlar                                       |
|-----------|--------------------|------------|-----------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 9         | 4,28               | Burnt      | Burnt                       | Stick Weld                                    |                                                |
| 10        | 4,35               | OK         | OK                          | Stick Weld                                    |                                                |
| 11        | 4,16               | Burnt      | Burnt                       | Stick Weld ( <i>Belki Burnt Gibi</i> )        |                                                |
| 12        | 4,28               | Burnt      | Burnt                       | Stick Weld                                    |                                                |
| 13        | 4,28               | OK         | OK                          | Stick Weld                                    |                                                |
| 14        | 4,16               | Burnt      | Burnt                       | Stick Weld ( <i>Belki Burnt Gibi</i> )        |                                                |
| 15        | 4,22               | OK         | OK                          | Stick Weld ( <i>Ama Bakılması lazım</i> )     | Kalınlıkla bir 0.1 lik değişim her şey değişir |
| 16        | 4,28               | OK         | OK                          | Stick Weld                                    |                                                |
| 17        | 4,35               | OK         | OK                          | Stick Weld                                    |                                                |
| 18        | 4,28               | OK         | OK                          | Stick Weld                                    |                                                |

Çizelge 5.14 Nokta 14 için Bilgiler ve Kalınlığa göre Ultrasonik Test Tablosu (devamı)

|     |             |              |       |                                           |                                                |
|-----|-------------|--------------|-------|-------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 19  | 4,1         | OK           | OK    | OK                                        | Parametre en yüksek; sonuç yine iyi            |
| 20  | 4,41        | Small Nugget | -     | -                                         |                                                |
| 1   | 4,28        | Burnt        | Burnt | Stick Weld                                |                                                |
| 2   | 4,28        | Burnt        | Burnt | Stick Weld                                |                                                |
| 3   | 4,1         | OK           | OK    | OK                                        |                                                |
| 4   | 4,1         | OK           | OK    | OK                                        |                                                |
| 5   | 4,22        | OK           | OK    | Stick Weld ( <i>Ama Bakılması lazım</i> ) | Kalınlıkla bir 0.1 lik değişim her şey değişir |
| 6   | 4,22        | OK           | OK    | Stick Weld ( <i>Ama Bakılması lazım</i> ) | Kalınlıkla bir 0.1 lik değişim her şey değişir |
| 7   | 4,1         | OK           | OK    | OK                                        |                                                |
| 8   | 4,28        | Burnt        | Burnt | Stick Weld                                |                                                |
| N10 | <b>4,35</b> | <b>OK</b>    | OK    | Stick Weld                                |                                                |
| N11 | 4,28        | Burnt        | Burnt | Stick Weld                                |                                                |
| N13 | <b>4,16</b> | <b>Burnt</b> | Burnt | Stick Weld ( <i>Belki Burnt Gibi</i> )    |                                                |
| N17 | <b>4,35</b> | <b>OK</b>    | OK    | Stick Weld                                |                                                |
| N20 | -           | -            | -     | -                                         |                                                |

Bu noktada toplam kalınlık CAD datasındaki değerinden küçük ölçülmüştür. Bu yüzden OK veya Burnt olarak çıkan değerlerin Stick Weld olarak çıkma ihtimali vardır.

Çizelge 5.15 Nokta 17 için Bilgiler ve Kalınlığa göre Ultrasonik Test Tablosu

| Komple No | Measured Thickness | Evaluation   | CAD Kalınlığına Göre (4,37) | Hesaplanan ve Ölçülen Kalınlığa Göre (4,56) | Yorumlar                                 |
|-----------|--------------------|--------------|-----------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------------|
| 9         | 4,66               | Burnt        | Stick Weld                  | Stick Weld                                  |                                          |
| 10        | 4,54               | OK           | Stick Weld                  | OK; sınırdama OK gibi                       |                                          |
| 11        | 4,41               | Burnt        | Stick Weld                  | Burnt                                       |                                          |
| 12        | 4,54               | Small Nugget | -                           | -                                           |                                          |
| 13        | 4,54               | Burnt        | Stick Weld                  | Burnt; sınırdama Burnt gibi                 |                                          |
| 14        | 4,54               | Burnt        | Stick Weld                  | Burnt; sınırdama Burnt gibi                 |                                          |
| 15        | 4,41               | OK           | Stick Weld                  | OK                                          |                                          |
| 16        | 4,41               | Burnt        | Stick Weld                  | OK                                          |                                          |
| 17        | 4,54               | Burnt        | Stick Weld                  | OK; sınırdama OK gibi                       |                                          |
| 18        | 4,41               | Burnt        | Stick Weld                  | OK                                          |                                          |
| 19        | 4,41               | Burnt        | Stick Weld                  | OK                                          |                                          |
| 20        | 4,03               | OK           | OK                          | OK                                          |                                          |
| 1         | 4,54               | Burnt        | Stick Weld                  | Burnt; sınırdama Burnt gibi                 |                                          |
| 2         | 4,41               | Burnt        | Stick Weld                  | Burnt                                       |                                          |
| 3         | 4,28               | Burnt        | Burnt                       | Burnt                                       | Hepsine göre BURNT; diğerlerinden farklı |
| 4         | 4,41               | Burnt        | Stick Weld                  | Burnt                                       |                                          |

Çizelge 5.15 Nokta 17 için Bilgiler ve Kalınlığa göre Ultrasonik Test Tablosu (devamı)

|     |             |              |            |                               |  |
|-----|-------------|--------------|------------|-------------------------------|--|
| 5   | <b>4,66</b> | <b>Burnt</b> | Stick Weld | Stick Weld                    |  |
| 6   | <b>4,54</b> | <b>Burnt</b> | Stick Weld | Burnt; sınırda ama Burnt gibi |  |
| 7   | <b>4,41</b> | <b>Burnt</b> | Stick Weld | Burnt                         |  |
| 8   | 4,47        | OK           | Stick Weld | OK                            |  |
| N10 | 4,16        | Burnt        |            | Burnt                         |  |
| N11 | -           | -            | -          | -                             |  |
| N13 | -           | -            | -          | -                             |  |
| N17 | 4,54        | Stick Weld   |            | Stick Weld                    |  |
| N20 | 4,03        | OK           | OK         | OK                            |  |

Bu noktada toplam kalınlık CAD datasındaki değerinden büyük ölçülmüştür. Bu yüzden Stick Weld olarak çıkan değerlerin Burnt veya OK çıkma ihtimali vardır.

Bizim örneklerimiz için CAD datasından ince olan bölgelerde ultrason testinde iyi kaynak gibi gözüken noktalarda iyi kaynak yapılmadığı; CAD datasından kalın olan bölgelerde ise yetersiz kaynak gibi gözüken yerlerde aslında iyi bir kaynak çekirdeği oluşabileceği görülmüştür. Tabii ki bu, bu çalışmadaki kaynaklar ve kaynak planı için geçerlidir, irdeleme amaçlı konmuştur.

#### 5.4.6 Punta Sıyırma ve Çekme Testleri

##### 5.4.6.1 Kaynak Parametre Değerleri ve Sonuç Tablosu

Çizelge 5.16 Scatolamento ve Rinforzo Birleşim Bölgesini Temsil Sonucu

| I     | t (Per.50Hz) | F (N) | Basınç (Mpa) | Çekme Dayanımı (N) | Çekirdek Çapı (mm) | Ampirik Hesaplanan Dayanım | Sonuç |
|-------|--------------|-------|--------------|--------------------|--------------------|----------------------------|-------|
| 10000 | 14           | 3200  | 0,22         | 17658,56           | 8,095              | 16724,15667                | OK    |
| 12000 | 9            | 3500  | 0,25         | 19717,57           | 9,01               | 18614,53386                | OK    |
| 10000 | 9            | 3200  | 0,22         | 19945,42           | 9,91               | 20473,92126                |       |
| 8000  | 14           | 3500  | 0,25         | 15012,83           | göz alma yok       | #DEĞER!                    |       |
| 12000 | 9            | 3500  | 0,25         | 20380,75           | 11,65              | 24068,7369                 |       |
| 12000 | 14           | 3500  | 0,25         | 21673,76           | 11,64              | 24048,07704                |       |
| 8000  | 14           | 3200  | 0,22         | 16616,88           | göz alma yok       | #DEĞER!                    |       |
| 12000 | 14           | 3500  | 0,25         | 21717,06           | 12,1               | 24998,4306                 |       |
| 8000  | 14           | 3500  | 0,25         | 11135,43           | göz alma yok       | #DEĞER!                    |       |
| 10000 | 9            | 3500  | 0,25         | 18267,38           | 8,67               | 17912,09862                | OK    |
| 10000 | 9            | 3200  | 0,22         | 18111,9            | 8,62               | 17808,79932                | OK    |
| 10000 | 9            | 3500  | 0,25         | 18489,09           | 8,87               | 18325,29582                | OK    |
| 10000 | 14           | 3200  | 0,22         | 20451,51           | 11,71              | 24192,69606                |       |
| 10000 | 14           | 3500  | 0,25         | 19924,96           | 10,24              | 21155,69664                |       |
| 10000 | 14           | 3500  | 0,25         | 20688,65           | 11,98              | 24750,51228                |       |
| 12000 | 14           | 3200  | 0,22         | 21520,8            | 11,23              | 23201,02278                |       |
| 8000  | 14           | 3500  | 0,25         | 8054,97            | göz alma yok       | #DEĞER!                    |       |
| 8000  | 14           | 3200  | 0,22         | 7977,47            | göz alma yok       | #DEĞER!                    |       |
| 12000 | 9            | 3200  | 0,22         | 19865,42           | 9,74               | 20122,70364                |       |
| 10000 | 9            | 3500  | 0,25         | 16521,01           | göz alma yok       | #DEĞER!                    |       |
| 8000  | 9            | 3500  | 0,25         | 0,46               | göz alma yok       | #DEĞER!                    |       |
| 10000 | 9            | 3200  | 0,22         | 16516,9            | göz alma yok       | #DEĞER!                    |       |
| 8000  | 9            | 3200  | 0,22         | 1,01               | göz alma yok       | #DEĞER!                    |       |
| 12000 | 9            | 3200  | 0,22         | 20527,05           | 10,87              | 22457,26782                |       |
| 8000  | 14           | 3200  | 0,22         | 7889,55            | göz alma yok       | #DEĞER!                    |       |
| 8000  | 9            | 3500  | 0,25         | 0,83               | göz alma yok       | #DEĞER!                    |       |
| 12000 | 9            | 3200  | 0,22         | 19829,86           | 9,51               | 19647,52686                | OK    |
| 12000 | 14           | 3200  | 0,22         | 21534,24           | 11,42              | 23593,56012                |       |
| 12000 | 14           | 3200  | 0,22         | 21105,87           | 10,95              | 22622,5467                 |       |
| 10000 | 14           | 3500  | 0,25         | 20176,82           | 11,93              | 24647,21298                |       |
| 8000  | 9            | 3500  | 0,25         | 11902,62           | göz alma yok       | #DEĞER!                    |       |
| 8000  | 9            | 3200  | 0,22         | 1,04               | göz alma yok       | #DEĞER!                    |       |
| 12000 | 9            | 3500  | 0,25         | 20378,66           | 9,97               | 20597,88042                |       |
| 10000 | 14           | 3200  | 0,22         | 20338,09           | 10,65              | 22002,7509                 |       |
| 12000 | 14           | 3500  | 0,25         | 21384,11           | 11,5               | 23758,839                  |       |
| 8000  | 9            | 3200  | 0,22         | 12623,73           | göz alma yok       | #DEĞER!                    |       |

Yukarıdaki tabloda gösterilen ‘Ampirik Hesaplanan Dayanım’ değeri aşağıdaki DIN EN ISO 14373 Standardına [17] dayanan formüle göre hesaplanmıştır.

$$P_s = 2,6 \cdot t \cdot d_w \cdot R_m \quad (5.1)$$

$d_w$ : Kaynak çekirdek çapı (mm)

$P_s$ : Kaynak birleşim bölgesinin Sıyırma Çekme dayanımı (N)

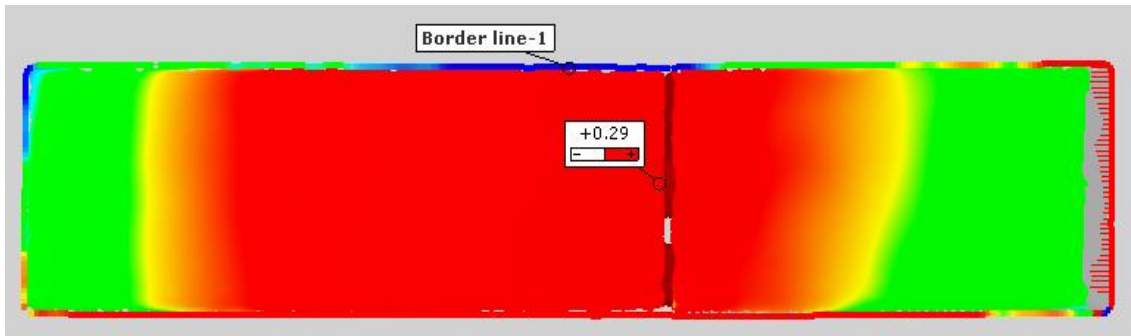
$R_m$ : Çeliğin Çekme dayanımı (Mpa)

t: Sac kalınlığı (mm)

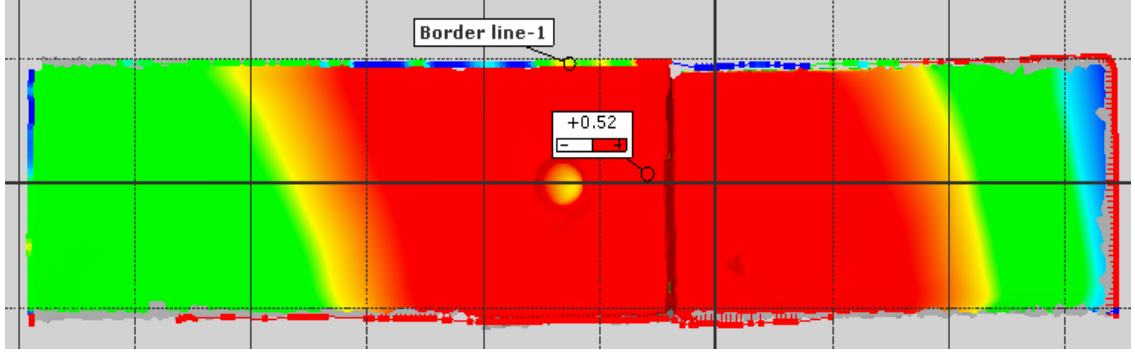
Yukarıdaki tabloda görüldüğü gibi çekme testi sonucu elde edilen çekme dayanımının Ampirik olarak hesaplanan dayanımdan büyük olduğu deney basamaklarında kaynak bölgesinin dayanımının sağlıklı olduğunu belirten OK ifadesi yazılmıştır. Yukarıda anılan standartta [17] verilen formül %20'lik bir toleransla verilmektedir. Zaten tam olarak bu örneği içerecek şekilde aynı kalınlık ve kaplamadaki numunelere dayanan bir formül bulunması imkansızdır. Buna göre göz alma dışındaki diğer deney basamakları da kabul edilebilir değerdedirler. Görüldüğü gibi özellikle 8000 A'lık akım değerinde göz alma yok sonucuna ulaşılmıştır, yani bu adımlarda çekirdek oluşmamış veya zayıf oluşmuştur. Ayrıca bazı 10000 A'lık değerlerde de göz alma görülmemiştir. Özellikle deney setinin sonuna doğru oluşan bu sonucun nedeni zamanla elektrod ucunun aşınımına uğrayıp elektrod uç çapı zamanla arttığından direncin düşmesidir; dolayısıyla ısı enerjisi girdisi de düşük olmuştur. Bütün sonuçlar toparlanıp derlenip gerekli kabuller ve hesaplamalar yapıp Simufact yazılımına girilecek sınır değerler belirlenecektir. Bu çalışmalarda geçen 9 ve 10 Periyodluk kaynak zamanı değerleri 3 darbeli (Pulse'lı) şekildedir. Diğer bölgeler için de aynı sonuç tabloları mevcuttur.

#### 5.4.6.2 Numunelerin Taranması

Numunelerin özellikle bindirme bölgelerindeki uçlarındaki deformasyonu (kalkmayı) görmek için parçalar ATOS cihazında taranmıştır. Buna göre bazı örneklerde parametre verileri ile birlikte deformasyon sonuçları aşağıdaki gibidir (Şekil 5.37 ve 5.38).



Şekil 5.37 (8000A; 9 Per; 3200 N) Parametre Değerleri için Numune Tarama Sonucu



Şekil 5.38 (12000A; 14 Per; 3200 N) Parametre Değerleri için Numune Tarama Sonucu

Yukarıdaki tarama sonuçlarından da görüldüğü üzere akım ve zaman değerleri arttığında uçtaki sapma değerleri de artacaktır.

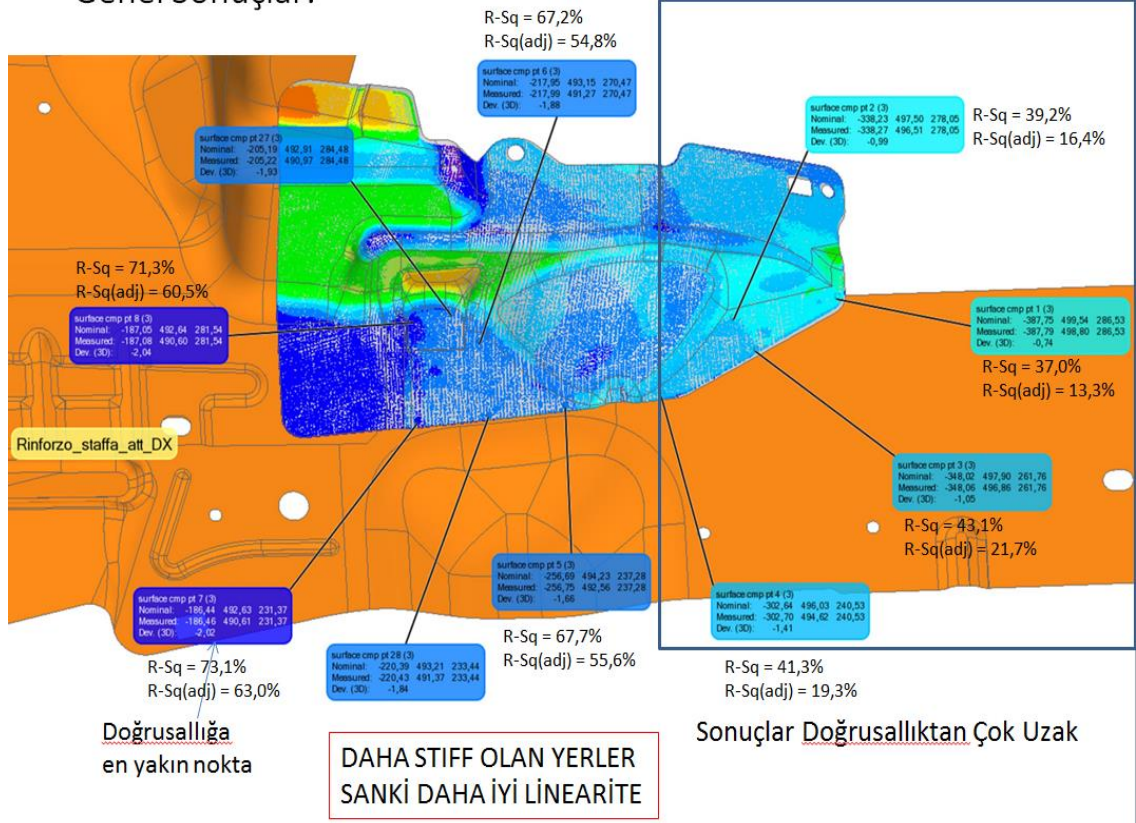
## 5.5 Uygulanan İstatistiksel Analiz ve Regresyon Sonuçları

### 5.5.1 Lineer Regresyon Analiz Sonuçları

Her noktada sapmalar belirlendikten sonra bu noktalarda regresyon ve Taguchi analizleri yapılmış ve her nokta için raporlanmıştır. Bunlardan örnekler aşağıda verilmektedir. Şekil 5.39’da Rinforzo parçasına ait lineer regresyon analiz sonuçları verilmektedir. Çeşitli noktalarda R-sq değerleri verilen noktalar şekil üzerinde yorumlanmıştır. Bu analizler Minitab programında gerçekleştirilmiştir.

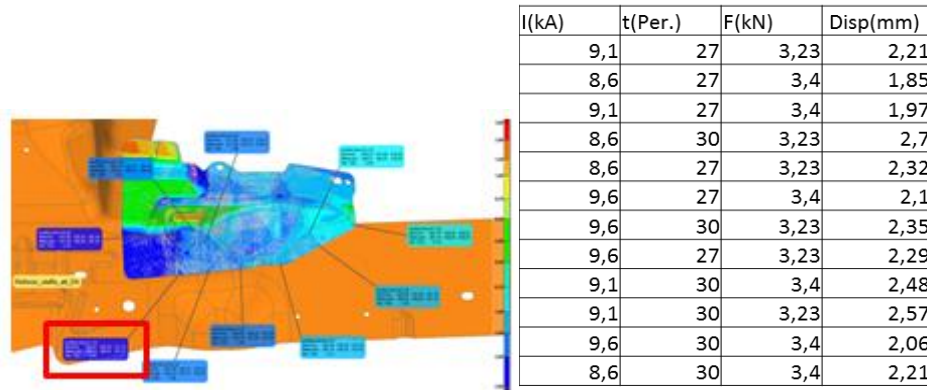


## Genel Sonuçlar:



Şekil 5.39 Rinforzo'ya Göre Lineer Regresyon Analizi Sonuçları

Bu şekilden de görüldüğü üzere en yüksek R-sq değerine ait 'pt 7' noktası için analiz detayları aşağıda verilmiştir.



Şekil 5.40 Rinforzo 'pt7' noktası ve sonuçlar

The regression equation is

$$\text{Dist (Pt7)} = 6,07 - 0,070 I + 0,0906 t - 1,74 F$$

$$S = 0,150503 \quad R\text{-Sq} = 73,1\% \quad R\text{-Sq(adj)} = 63,0\% \quad p=0,011$$

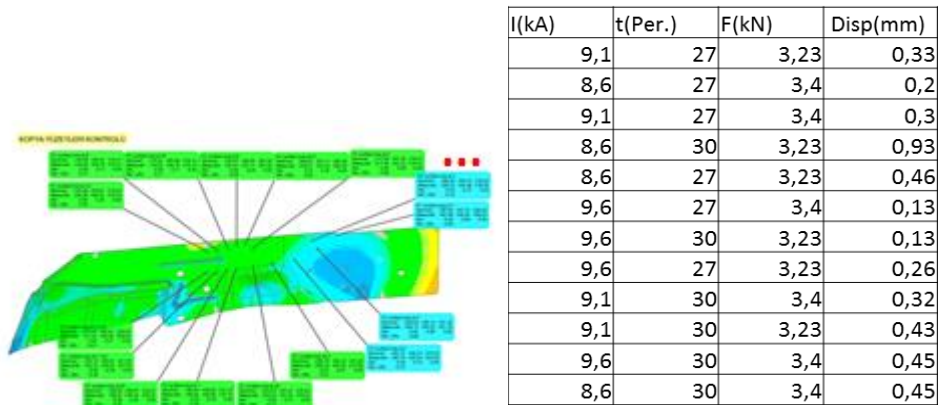
Etkileşimler ve karesel değerler de ele alınarak bakıldığında ve bunlar da birer terim olarak eklendiğinde aşağıdaki daha sağlıklı sonuçlara ulaşılmaktadır.

The regression equation is

$$\text{Dist} = -6,4 + 3,95 I + 3,55 t - 14,6 F - 0,360 I*t + 1,41 I*F - 0,290 I^2$$

$$S = 0,121319 \quad R\text{-Sq} = 89,1\% \quad R\text{-Sq}(\text{adj}) = 76,0\% \quad p=0,026$$

Scatolamento Parçasına ait kırmızı ile işaretlenmiş (Şekil 5.41) noktaya ait örnek regresyon sonucu da aşağıdaki gibidir.



Şekil 5.41 Scatolamento 'pt2' noktası ve sonuçlar

The regression equation is

$$\text{Dist} = 63,0 - 6,82 I + 2,58 t - 25,6 F - 0,265 I*t + 2,74 I*F$$

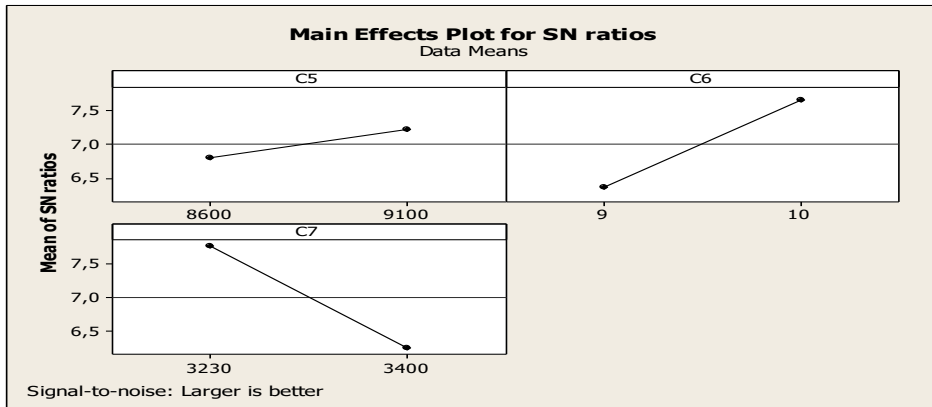
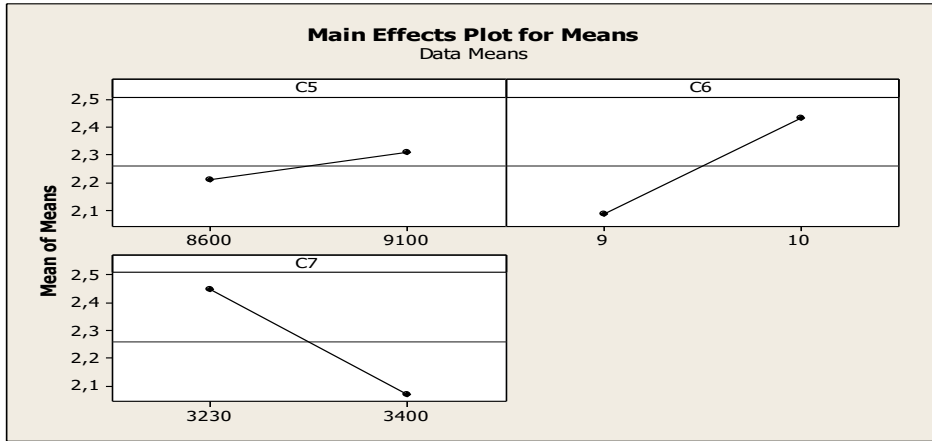
$$S = 0,121567 \quad R\text{-Sq} = 82,4\% \quad R\text{-Sq}(\text{adj}) = 67,7\% \quad p=0,029$$

### 5.5.2 Taguchi Analiz Sonuçları ve Yorumları

Yukarıdaki Rinforzo'ya ait pt 7noktası için Taguchi sonuçları aşağıdaki gibidir. Burada üç akım değerinden dolayı (akım seviyesi 3) 2'şerli kombinasyondan 2 tane Taguchi tablosu ve analizi çıkmıştır.

## LEVEL1

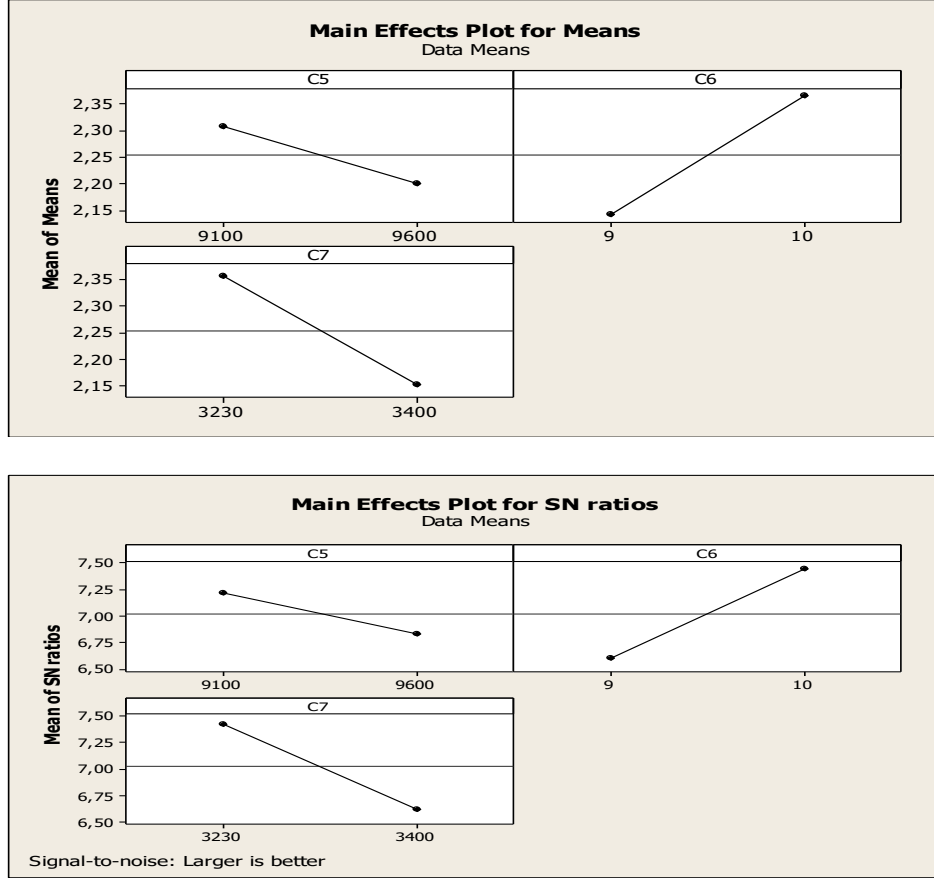
| I(kA) | t(Per.) | F(kN) | Disp(mm) |
|-------|---------|-------|----------|
| 8600  | 9       | 3230  | 2,32     |
| 8600  | 9       | 3400  | 1,85     |
| 8600  | 10      | 3230  | 2,7      |
| 8600  | 10      | 3400  | 1,97     |
| 9100  | 9       | 3230  | 2,21     |
| 9100  | 9       | 3400  | 1,97     |
| 9100  | 10      | 3230  | 2,57     |
| 9100  | 10      | 3400  | 2,48     |



Şekil 5.42 Rinforzo 'pt7' noktası için Level 1 Taguchi Sonuç Tablosu ve Analiz Grafikleri

## LEVEL 2

| I(kA) | t(Per.) | F(kN) | Disp(mm) |
|-------|---------|-------|----------|
| 9100  | 9       | 3230  | 2,21     |
| 9100  | 9       | 3400  | 1,97     |
| 9100  | 10      | 3230  | 2,57     |
| 9100  | 10      | 3400  | 2,48     |
| 9600  | 9       | 3230  | 2,29     |
| 9600  | 9       | 3400  | 2,1      |
| 9600  | 10      | 3230  | 2,35     |
| 9600  | 10      | 3400  | 2,06     |



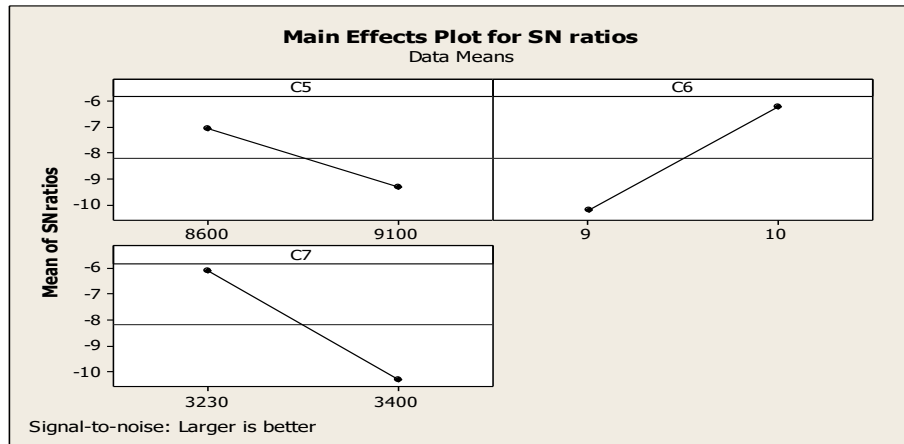
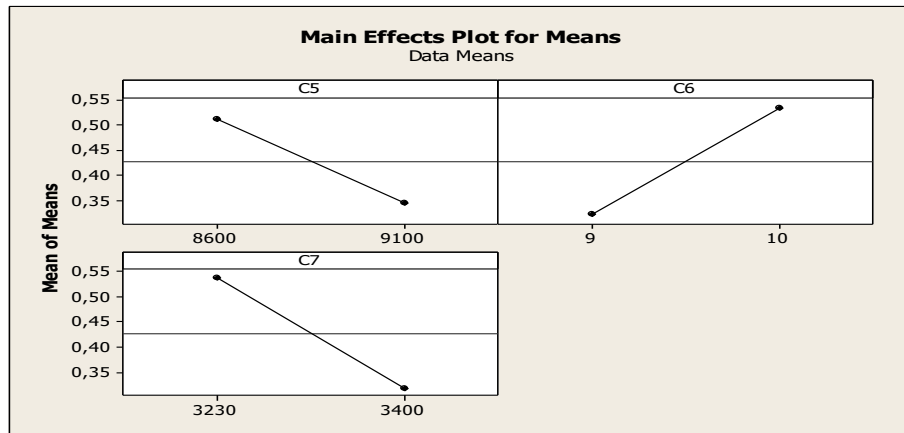
Şekil 5.43 Rinforzo 'pt7' noktası için Level 2 Taguchi Sonuç Tablosu ve Analiz Grafikleri

'Larger is Better' hedefi ile gerçekleştirilen Taguchi analizleri sonucunda ilgili nokta için hem Level 1 hem Level 2'de gösterilen sonuçlarda elektrod kuvveti arttıkça distorsiyonun düştüğü, kaynak zamanının arttığında ise distorsiyonun arttığı gözlemlenmiştir. Bunlar beklenen ve bizim başka çalışma ve analizlerde de gözlemleyebildiğimiz bir sonuç verisidir. Kaynak akımı için ise arttığında distorsiyonu da arttıracak yönünde bir beklenti var ise de bu tamamen gerçekleşmemiştir. Akım ortalama değer 9100 A'e kadar arttığında distorsiyon artmıştır. 9100 A'den sonraki artışta ise distorsiyon küçülmüştür. Bu, yukarıdaki ilgili denklemdeki ' $3,95 I - 0,290 I^2$ ' terimlerinden de gözlemlenmektedir. Bu denklemin türevi alınırsa, belli bir akım değerinde distorsiyonun maksimum değerine ulaşacağı görülecektir. Bu, birleştirilen parçaların şekilsel etkileri ve punta sıraları gibi faktörlere direkt bağlıdır. Başka şekilde bir etki de aşağıdaki Scatolamento parçası üzerindeki nokta için yapılan Taguchi ve regresyon analizinde görülecektir.

Yukarıdaki Scatolamento'ya ait 'pt 2' noktası için Taguchi sonuçları aşağıdaki gibidir.

#### LEVEL 1

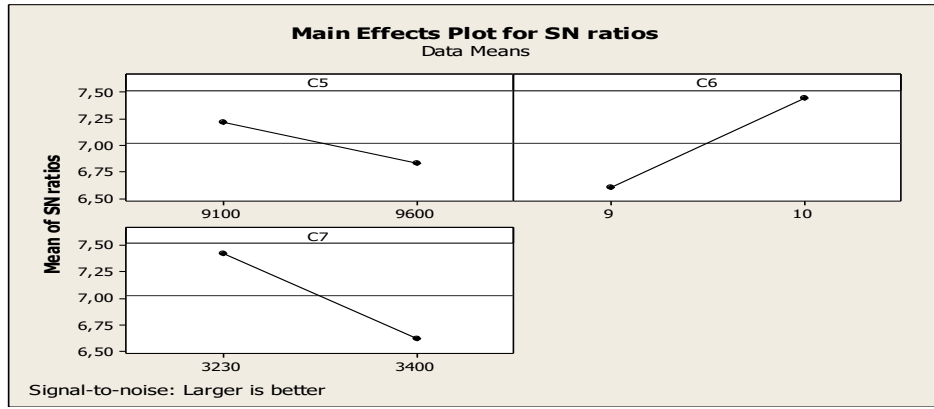
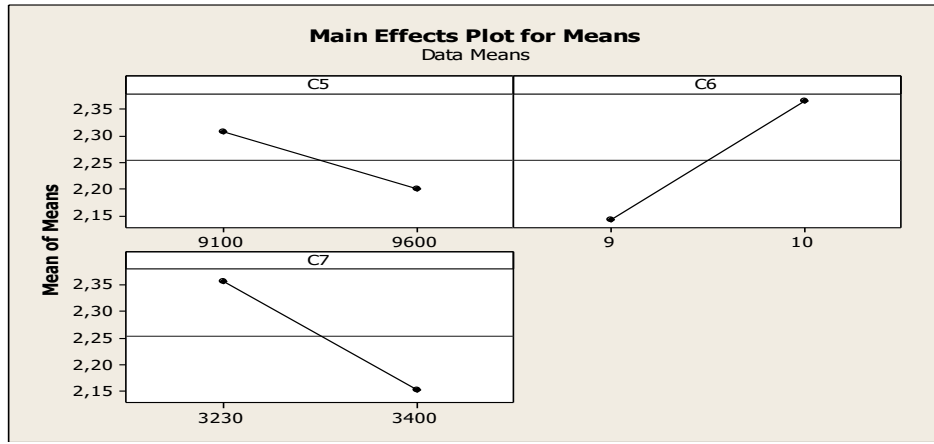
| I(kA) | t(Per.) | F(kN) | Disp(mm) |
|-------|---------|-------|----------|
| 8600  | 9       | 3230  | 0,46     |
| 8600  | 9       | 3400  | 0,2      |
| 8600  | 10      | 3230  | 0,93     |
| 8600  | 10      | 3400  | 0,45     |
| 9100  | 9       | 3230  | 0,33     |
| 9100  | 9       | 3400  | 0,3      |
| 9100  | 10      | 3230  | 0,43     |
| 9100  | 10      | 3400  | 0,32     |



Şekil 5.44 Scatolamento 'pt2' noktası için Level 1 Taguchi Sonuç Tablosu ve Analiz Grafikleri

## LEVEL 2

| I(kA) | t(Per.) | F(kN) | Disp(mm) |
|-------|---------|-------|----------|
| 9100  | 9       | 3230  | 2,21     |
| 9100  | 9       | 3400  | 1,97     |
| 9100  | 10      | 3230  | 2,57     |
| 9100  | 10      | 3400  | 2,48     |
| 9600  | 9       | 3230  | 2,29     |
| 9600  | 9       | 3400  | 2,1      |
| 9600  | 10      | 3230  | 2,35     |
| 9600  | 10      | 3400  | 2,06     |

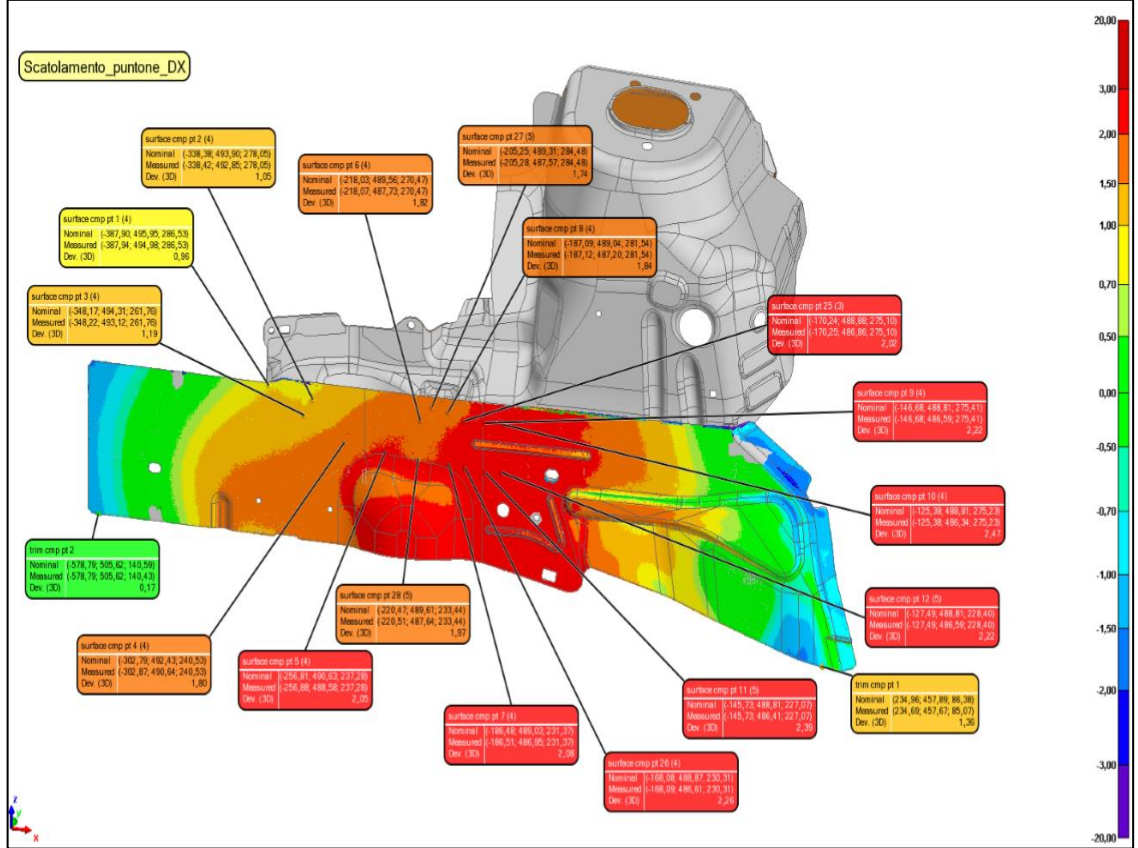


Şekil 5.45 Scatolamento 'pt2' noktası için Level 2 Taguchi Sonuç Tablosu ve Analiz Grafikleri

Burada ise ilgili denklemdeki '-I'ya sahip denklem terimleri nedeni ile yine şekilsel ve sırasal faktörler sebebi ile bu sefer akım arttığında distorsiyonun düştüğü gözlemlenmiştir. Yine bu örnekte de akım zamanı arttıkça ve elektrod kuvveti azaldıkça distorsiyonun arttığı gözlemlenmiştir.

### 5.5.3 Kaynak Sırasına Göre İstatistiksel Analiz

Şekil 5.45'ten de görüldüğü üzere önceden belirlenmiş noktalar için tarama sonuçları belirlenmişti. Bunu takiben uygulanan 2 değişik sırayı göz önüne alarak her bir sıra için 5 montaj grubu incelenmiştir. Uzun Scatolamento parçası için belirli noktalar için distorsiyon değerleri Çizelge 5.17'de gösterilmektedir. 2. kaynak sırasında daha büyük distorsiyon değerleri görülmüştür.



Şekil 5.46 Scatolamento Parçası için Tarama Sonuç Örneği

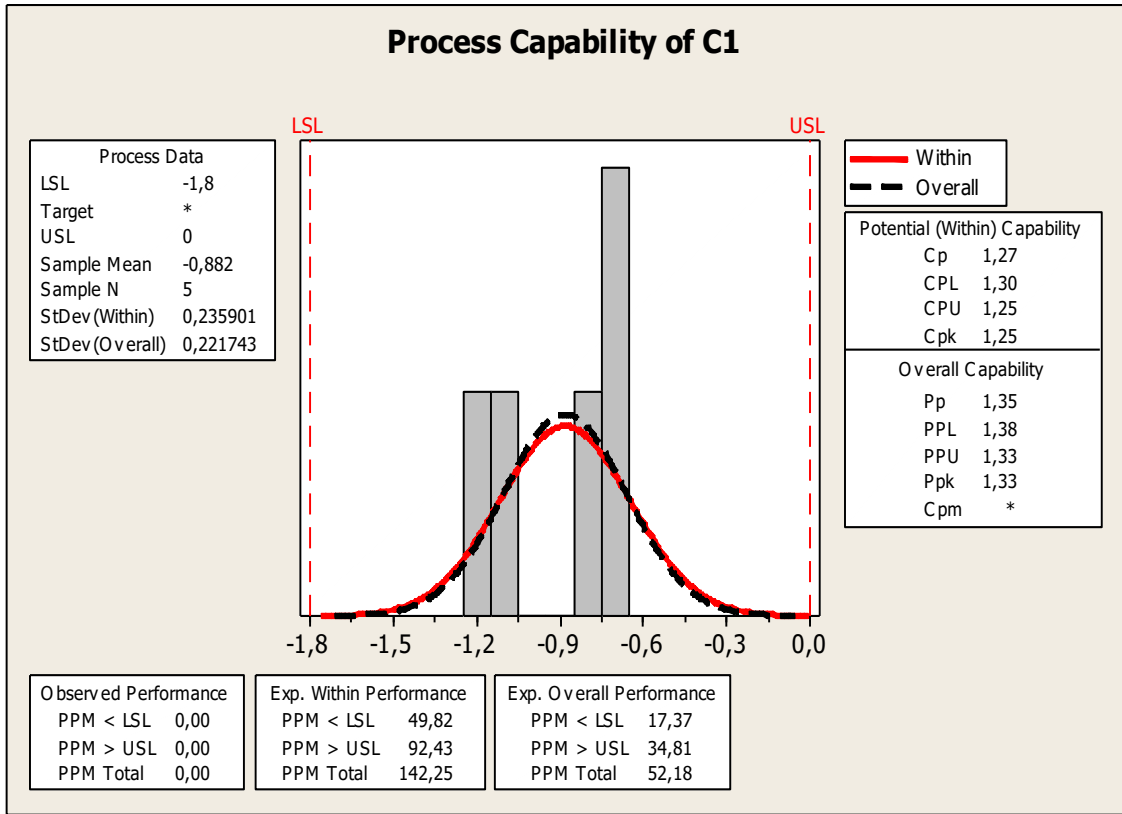
Çizelge 5.17 Önceden belirlenmiş noktalardaki her iki kaynak sırası için önceden belirlenmiş noktalardaki distorsiyon sonuçları

| Deviation | Exp No 1 | Exp No 2 | Exp No 3 | Exp No 4 | Exp No 5 | Exp No 6 | Exp No 7 | Exp No 8 | Exp No 9 | Exp No 10 |
|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| Cmp Pt 4  | -0,81    | -1,16    | -0,71    | -1,07    | -0,66    | -1,53    | -1,38    | -1,27    | -1,2     | -1,34     |
| Cmp Pt 5  | -1,56    | -2,03    | -1,61    | -1,63    | -1,41    | -2,24    | -2,01    | -1,89    | -1,83    | -1,99     |
| Cmp Pt 28 | -1,78    | -2,32    | -1,81    | -1,82    | -1,62    | -2,46    | -2,14    | -2,09    | -1,96    | -2,16     |
| Cmp Pt 7  | -1,97    | -2,56    | -1,97    | -1,88    | -1,81    | -2,67    | -2,25    | -2,26    | -2,17    | -2,34     |
| Cmp Pt 26 | -1,93    | -2,58    | -2       | -1,96    | -1,85    | -2,73    | -2,29    | -2,27    | -2,2     | -2,37     |
| Cmp Pt 11 | -2,08    | -2,67    | -2,07    | -2,01    | -1,87    | -2,85    | -2,32    | -2,36    | -2,28    | -2,45     |
| Cmp Pt 12 | -2,07    | -2,54    | -2,01    | -1,95    | -1,84    | -2,9     | -2,29    | -2,4     | -2,26    | -2,46     |
| Cmp Pt 10 | -2,61    | -3,3     | -2,67    | -2,69    | -2,51    | -3,43    | -2,78    | -2,92    | -2,82    | -2,99     |
| Cmp Pt 9  | -2,31    | -2,95    | -2,33    | -2,33    | -2,22    | -3,11    | -2,43    | -2,56    | -2,44    | -2,63     |
| Cmp Pt 25 | -2,01    | -2,67    | -2,09    | -2,12    | -1,97    | -2,79    | -2,19    | -2,28    | -2,16    | -2,36     |
| Cmp Pt 8  | -2,01    | -2,61    | -2,03    | -2,12    | -2,01    | -2,74    | -2,21    | -2,28    | -2,13    | -2,34     |
| Cmp Pt 27 | -2,02    | -2,57    | -2,07    | -2,04    | -1,96    | -2,66    | -2,16    | -2,23    | -2,07    | -2,28     |
| Cmp Pt 6  | -1,89    | -2,43    | -1,91    | -1,92    | -1,8     | -2,51    | -2,1     | -2,12    | -1,97    | -2,18     |
| Cmp Pt 2  | -0,43    | -0,81    | -0,32    | -0,24    | -0,32    | -0,7     | -0,59    | -0,55    | -0,49    | -0,58     |
| Cmp Pt 3  | -0,35    | -0,69    | -0,19    | -0,3     | -0,22    | -0,67    | -0,61    | -0,5     | -0,49    | -0,57     |
| Cmp Pt 1  | -0,14    | -0,53    | -0,02    | -0,18    | -0,02    | -0,3     | -0,28    | -0,3     | -0,23    | -0,28     |

Her nokta için ilk 5 distorsiyon değeri Sıra 1 için distorsiyon değerlerini; son 5 değer ise Sıra 2 için sapma değerlerini göstermektedir. Nokta 4 ve Sıra 1 için distorsiyon değerlerine göre proses ve performans yeterlilik sonuçları aşağıdaki gibidir. Bu değerler (DIN ISO 22514-2) [79] standardına göre hesaplanmaktadır.

Normal dağılım analizine göre, USL ve LSL sınır değerleri popülasyonun %99.7'lik kısmını kapsayacak şekilde bir alan belirler (normal dağılım eğrisinin altında). Normal dağılımın simetrikliğinden ötürü USL ve LSL çizgilerinin dışındaki popülasyon kısımları aynıdır. Cp ve Cpk değerlerine göre proses yeterlidir (Şekil 5.47).





Şekil 5.47 Proses yeterlilik istatistiği

## 5.6 Eşleme Yazılımı

Bileşik toleranslandırmada, analizlere ilaveten bir de eşleme prosesinin önerildiği görülmüştü. Söz konusu yöntem, tezin uluslararası yenilikçilik taşıyan ve patent başvurusu yapılan önemli bir bölümünü kapsamaktadır. Bunun için özel bir eşleme yazılımı ile robotik eşleme donatımı tasarlanıp imal edilmiştir. Kaynak parametrelerini göz önüne almadan yapılan ilk eşleme yazılımı aşağıdaki gibidir (Şekil 5.48). Burada eşleşmeler yapılmıştır. Burada input olarak programa verilen parça toleransları virgül, gruplar ise | işareti ile ayrılmıştır. Sonuçta gözüken ve 0 değeri atanan parçalar ilk parçalardır.

**Parça Tolerans Analizi**

Parçaları Giriniz(Aynı parçaları "," ile, grupları "|" ile ayırınız)

Tekil Tolerans Değerlerini Giriniz(Değerleri "," ile ayırınız)

Analize Başla

4 grup bulundu:

1.grup: 0 , 0 ,

2.grup: 1 , 2 ,

3.grup: 2 , 1 ,

4.grup: 3 , 3 ,

Şekil 5.48 İlk Yazılım Örneği

#### İzlenilen Algoritma:

1. İlk kutudan bir parça al örneğin 2 alınsın
2. Alınan parçanın ilk grup için atanan tekil tolerans değerine uygun mu kontrol et. Yani 2 değeri 6 dan küçük mü ve -6 dan büyük mü kontrol et. Bu aralıktaysa al.
3. 2.kutudan ilk parçayı al, 2. Adımı bu parça için de tekrarla. Aynı zamanda 1.parça ile ikinci parçanın hata miktarlarını topla ve bunu grubun tolerans değerlerinin karelerinin toplamının karekökü olan X değerinden küçük mü ve -X değerinden büyük mü kontrol et. Yani  $2+2=4$  alınan 2 parçanın toplam hata değeri. Bu değer  $\sqrt{6^2+5^2}$  değeri yani 7.61 değerinden küçük mü ve -7.61 değerinden büyük mü kontrol et.
4. Alınan toplam parça sayısı grup sayısına eşit olduğunda ilk deneme için geriye alınacak parça kalmamış demektir. O halde artık  $2+2=4$  değeri olan toplam hata değerinin genel tolerans aralığında olup olmadığını hesaplayabiliriz.
5. Genel tolerans değeri  $\sqrt{t_1^2+t_2^2+\dots+t_n^2}$  formülü ile hesaplanır. N toplam grup sayısıdır. Yani tekil toleransların tümünün karelerinin toplamının karekökü genel toleransı verir. 4. Adımda elde edilen sonuç değeri bu genel toleranstan küçük mü ve bu genel toleransın negatif değerinden büyük mü kontrol edilir.
6. Eğer bu koşul da sağlanıyorsa almış olduğumuz parçalar uygun parçalardır.
7. Tüm uygun parça gruplarını tespit et.
8. Edilen gruplardan en fazla verimliliği sağlayacak uygun grupları tespit et (toplam toleranslar 0'a yakın olacak şekilde).
9. Ekranı yazdır.

#### 5.6.1 Geliştirilmiş Yazılım

Her iki program da Java yazılım dili ile Java Development Kit 8 kullanılarak Netbeans IDE' si üzerinde geliştirilmiştir. Arayüz tasarımı için JavaFX teknolojisi kullanılmıştır. Geliştirilmiş yazılım bir örnek ile Şekil 5.49'da gösterilmiştir.

Bu yazılımın algoritma prensibi yukarıdaki algoritma ile aynıdır. Buradaki fark programın bize dört tane tolerans analiz yöntemi bize sunması ve kullanıcının bunu seçme özgürlüğüdür. Bu 4 yöntem şöyledir:

- Worst-Case
- Kuadratik
- Probabilist
- Adjusted

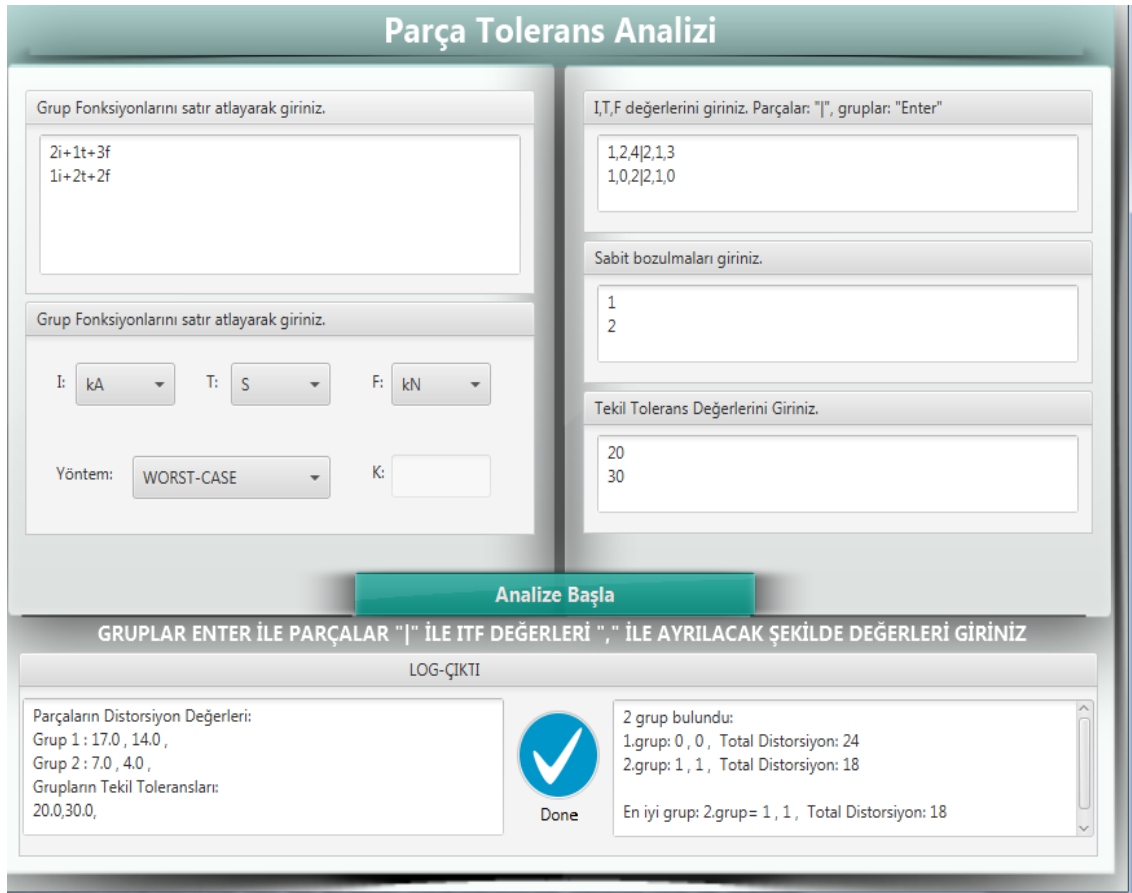
WORST-CASE:  $t_1+t_2+t_3+....t_n$

KUADRATİK: 'karekök( $t_1^2+t_2^2+...t_n^2$ )'

PROBABİLİST:  $\sqrt{3} * \text{'karekök}(t_1^2+t_2^2+...t_n^2)$ '

ADJUSTED:  $k * \text{'karekök}(t_1^2+t_2^2+...t_n^2)$ '

(k katsayısı genelde 1.5 olarak alınıyor ama bu uygulamada kullanıcıya sorulmaktadır.)



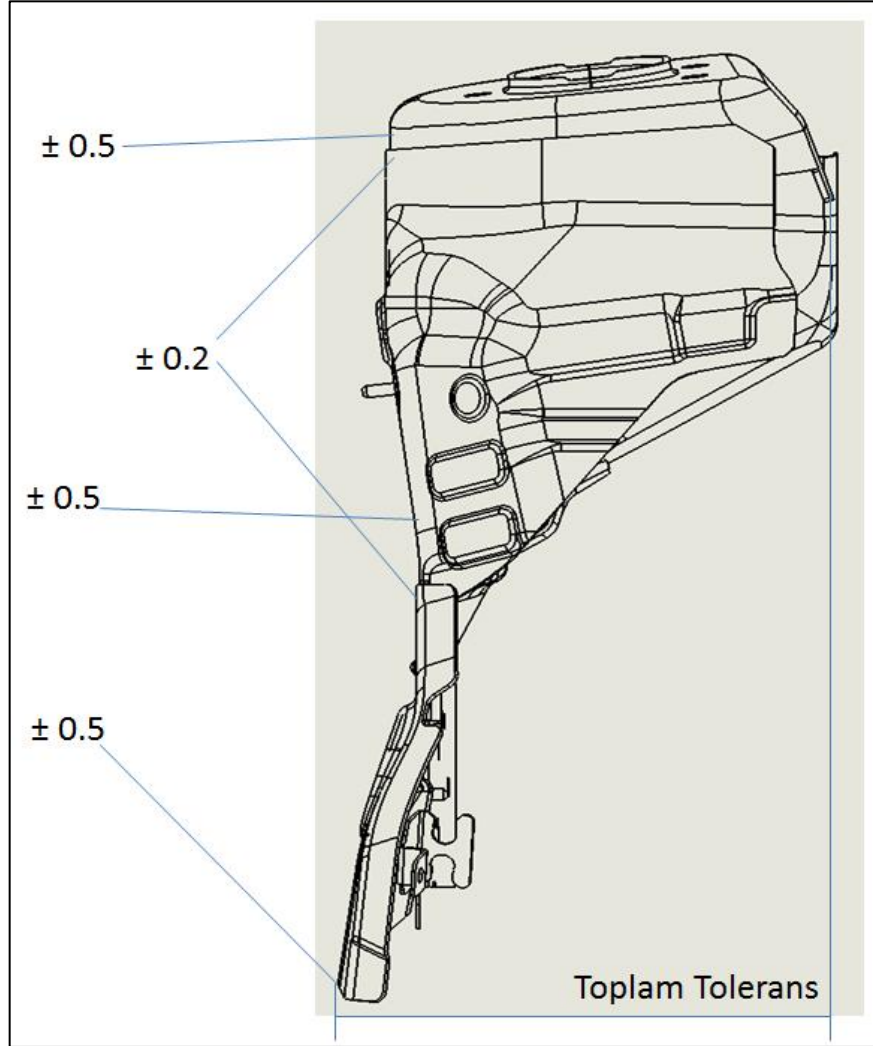
Şekil 5.49 Kaynak parametrelerinin de göz önüne alındığı ikinci Yazılım

İkinci fark ise sapmanın kaynak parametreleri ile distorsiyonlar arasındaki ilişkisini belirleyen matematiksel fonksiyonun da sisteme dahil edilmesidir. Sapma hem bir sabit sapmadan hem de bu sapmanın toplamından oluşacaktır. Sabit sapma diye belirlenen sapma şekillendirme sonucu oluşan belirli noktalardaki şekillendirme sonrası sapmadır. Bu sapma görüntü işleme ile belirlenebileceği gibi analiz programından da alınabilir. İkinci sapma için ise buradaki yol, bulunan regresyon denklemlerini kullanmaktır.

Kaynak parametrelerine bağılı bu denklemlere istenen l, t, F değerleri girildiğinde 2. sapma bileşeni ortaya çıkacaktır. Program eşlemeyi artık bu toplam sapmaya göre yapacaktır.

### 5.7 Tolerans Analizi Örnekleri

Ele alınan sağ ön şase kolunda yandan görünüşe, sağ ön şase kolunun buradan belirli ölçüde bir yere sığabileceği düşüncesi ile, tolerans analizi uygulanmıştır (Şekil 5.50). Burada ele alınan  $\pm 0.5$ 'lik tolerans değerleri sac parçaların yüzey toleransları olup direkt Fiat normundan alınmışlardır.  $\pm 0.2$ 'lik değer ise genel olarak atılan punta kaynakları için atanmıştır. Hesapta ele alınan  $\pm 0.1$ 'lik tolerans ise perno ve tasellodan kaynaklanan aparat toleransıdır.

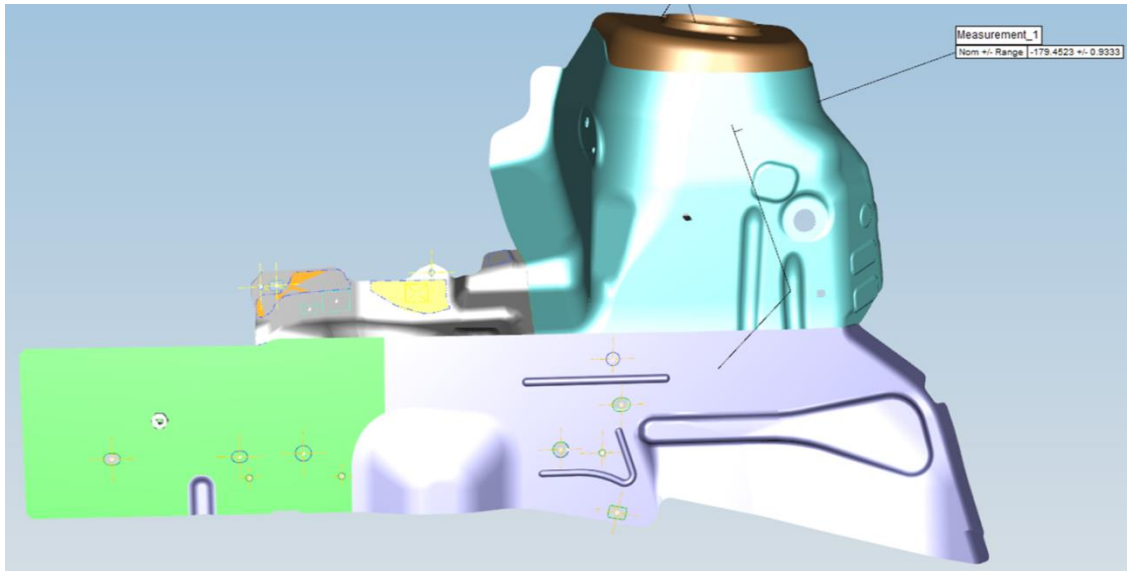


Şekil 5.50 Sağ ön şasi koluna Tolerans Analizi uygulanması

$$\text{Toplam Tolerans} = \sqrt{0,5^2 + 0,5^2 + 0,5^2 + 0,2^2 + 0,2^2 + 3(0,1^2 + 0,1^2)} = \sqrt{0,89} = 0.92$$

Yukarıdaki hesaplamada parantez içindeki kısmın 3 ile çarpılma nedeni zaten küçük olan bu değerin çarpım olmadan karesi alınınca iyice küçüleceği ve hesaba katkısının olmayacağıdır. Kuadratik tolerans hesap yöntemi ile bulunan değer ise braketin Y yönünde sahip olması gereken toleranstır.

Yukarıdaki model için Teamcenter Visualization Mockup programında bir örnek Tolerans Analiz çalışması yapılmıştır. Program çizimin default toleranslarını kullanmıştır.



Şekil 5.51 Tolerans Analizi hesabının program ile gerçekleştirilmesi

Burada iki nokta arası tolerans 0.93 olarak bulunmuştur. Bu da bizim bulduğumuz tolerans değerine yakındır.

3 Yöndeki Distorsiyon Büyüklükleri için Lineer Regresyon Çalışmalarının Sonuç gösterimi:

$$\begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 \\ \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 \\ \gamma_1 & \gamma_2 & \gamma_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I \\ t \\ F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Dist_x \\ Dist_y \\ Dist_z \end{bmatrix}$$

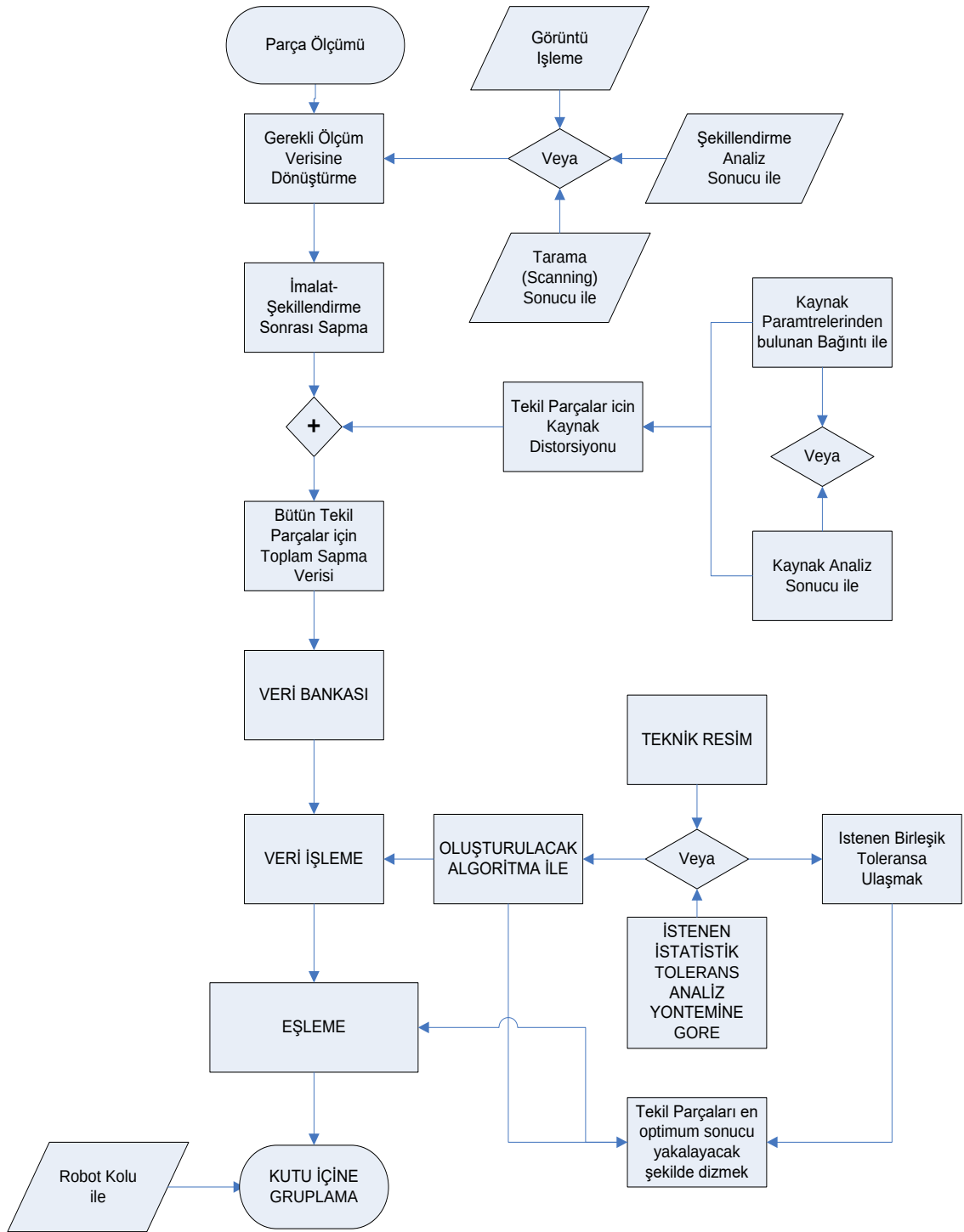
$$Dist_x = \alpha_1 I + \alpha_2 t + \alpha_3 F$$

$$Dist_y = \beta_1 I + \beta_2 t + \beta_3 F$$

$$Dist_z = \gamma_1 I + \gamma_2 t + \gamma_3 F$$

## 5.8 Eşleme Mekanizasyonu

Bölüm 5.6’da verilen algoritmaya dayalı mekanizasyon oluşturulacaktır. Burada mekanizasyon iki alt bölümden oluşmaktadır. Birinci kısımda tekil parçaların ölçümleri proba veya kamera ile gerçekleştirilmektedir. Burada kritik ölçüler gerekli görüntü işleme algoritması yardımıyla elde edilir veya şekillendirme analizi sonucunda geri esnemelere de ulaşılabilir. Bu sapmalara kaynak sonrası distorsiyonlar eklenmektedir. Bu distorsiyonlar punta kaynağı parametreleri ile oluşan matematiksel bağıntıdan bulunabilir. Böylelikle her tekil parça için bir toplam sapma elde edilmektedir. Bu tekil sapmalar toplamda parçalarda optimum birleşik tolerans sağlanacak şekilde toplanacaklar ve eşleme algoritması yardımıyla parçalar eşlenecektir. Tarama sonucu, bir matris üzerinde tekil parçaların konumları ile birlikte toplam sapmaları da atanır. Eşleme sonucu birleştirilecek tekil parçalar bir grupta kutusunun bölmelerine yerleştirilir. Sistemin çalışma şeması Şekil 5.52’de verilmektedir.



Şekil 5.52 Otomatik sistemin çalışma prensibi

Bu çalışmaya yönelik gerçekleştirilen simülasyonlardan biri aşağıda verilmektedir (Şekil 5.53).



Şekil 5.53 Eşleme Simülasyon Gösterimi

Ayrıca simülasyonun yanında mekanizasyon için otomatik bir sistem geliştirilmeye çalışılmış; ilgili robotlar seçilmiştir (Şekil 5.54). Bu sistem için patent başvurusu yapılmıştır (Patent Başvuru Numarası: 2017/16877; Patent Başvuru Tarihi: 31.10.2017).



Şekil 5.54 Tasarlanan otomatik mekanizasyon için bir robot kolu seçimi



### SONUÇ VE ÖNERİLER

#### Genel Metodolojik Sonuçlar

Tezin amacı, tasarımların yapılması esnasında parça boyutlandırma ve toleransları belirleme açısından tasarımcıya yardımcı olmaktır. Bunun için de, montaj halindeki varsayımlardan gidilerek, tasarımcıya bir tahmin metodolojisi önerilmektedir. Tez çalışmaları söz konusu metodolojinin belirli bir doğruluk derecesine kadar yararlı olabileceğini kanıtlamış bulunmaktadır. Bununla birlikte, söz konusu yaklaşımların ardışık olarak sürdürülmesi ile daha yüksek doğruluk derecelerine ulaşılması da mümkün görünmektedir.

Metodolojik çalışmada, grubu meydana getiren elemanların bir araya gelmesiyle ortaya çıkacak toplam sapma iki ayrı bölümden oluşmaktadır. Bunlardan ilki tekil şekillendirmelerin yarattığı sapma, ikincisi ise punta kaynağının meydana getirdiği distorsiyonlardır. Şekillendirme sonrası sapmaların büyük bir bölümünü geri esnemeler oluşturmaktadır. Bu gibi sapmalar analizlerin veya taramaların uygulanmasıyla elde edilebilmektedir. Yani ilk yolda matematiksel modelden ikinci yolda ise imal edilmiş tekil parçaların işleme tabi tutulmasından (taranmasından) faydalanılmaktadır.

Punta kaynakları sonrası oluşan distorsiyonlar için de, kurulmuş olan parametre-distorsiyon fonksiyonları kullanılmaktadır. Analizlerden ve deney serilerinden elde edilen veri tabanlarının birlikte değerlendirilmesinden yola çıkılmaktadır. Burada, sadece tez konusu paralelinde odaklanılarak sapma kontrolünün sağlanması hedeflenmemekte; bir taraftan da gerekli olan asgari mukavemet değerlerinden ödün verilmemeye çalışılmaktadır. Biçimsel açıdan hat sonunda tamamlanmış bir araçta

ortaya çıkabilecek sapma kadar; bir kaza sonucu ikiye e bölünen araçlar da önemlidir. Dolayısıyla çalışmaların başından beri sağlıklı puntalama temel koşul olarak alınmak suretiyle, gerek parametrik tespitler gerekse analizler bunun üzerine kurulmuştur. Söz konusu fonksiyonlar, DOE esaslarına göre farklı kaynak yazılımları üzerinde çeşitli kaynak parametreleri denemeleri yapılarak veya direkt olarak kaynak deneyleri (kaynak + tekil parça ve montaj grupları taranması şeklinde) uygulanarak elde edilmektedir.

CAD datası veya İstatistiksel Tolerans Analiz Yöntemleri ile belirlenmiş olan bileşik toleransa göre tekil parçalar bir optimum eşleme algoritması ve gruplama mekanizması ile birleştirilecektir. Yani tasarımcıya hem imalattan önce tahmin açısından, hem de imalattan sonra yardımcı olunmaktadır. Örneğin sanayide sac parça konstrüksiyonlarında montaja katılan son parçaya kasti deformasyon vererek çakışmayı sağlayan birleşik toleransın tutturulduğu grlmektedir. Pratik bir m olarak kabul gören bu uygulamanın teknolojik açıklaması yapılamaz. Bunun uygulanamadığı haller de olabilir. Örneğin tez kapsamındaki kalın saclar ile bu tezin kapsamı dahilinde olmayan (Patent başvurusu bunları da kapsamaktadır) hacimsel şekillendirmelerden ıkmiş kütlesel parçalarda böyle bir uygulamaya gitmek imkansızdır. Tez ile sunulmuş olan metodolojinin hedefi bunu tamamen ortadan kaldırmaktır. Bunu sağlayan yazılım ve donanımı içeren sistem ve mekanizasyonu, tekil parçaların sapmalarından yola çıkarak montajın toplamında doğruya ulaşma ilkesine dayanmaktadır. Bu konuda benzer hiçbir sistem ve yayın bulunmamaktadır. Gerek fikir ve gerekse yazılım ve donanım olarak tamamen orijinaldir. Dolayısıyla, söz konusu eşleme yazılım ve mekanizasyonunu içeren sistem için 31.10.2017 tarih ve 2017/16877 patent başvuru numarası ile patent başvurusu yapılmış bulunmaktadır. Bu başvuru yukarıda bahsi geçen kütlesel parçaları da kapsamaktadır.

Bu tezin asıl amaçlarından biri punta kaynağı parametreleri ile distorsiyonlar arasında matematiksel bağıntı kurmaktır. Buna yönelik olarak TOFAş'tan alınan komplede değişik noktalardan değişik kaynak parametreleri uygulanarak kaynak distorsiyonları elde edilmiştir. Kurulan matematiksel bağıntılarda linearitenin ve kolerasyon katsayısı  $r$  değerlerinin düşük,  $p$  değerlerinin ise yüksek olduğu grlmştur. Buradan da grldğu üzere distorsiyonları yönlendiren etkenler sadece ele alınan punta kaynak

parametreleri; yani kaynak akımı, kaynak zamanı ve elektrod kuvveti değildir. Ayrıca etkili olan gürültü faktörlerinin de var olduğu saptanmıştır. Bu faktörlerden bazıları kaynak sırası, fişörlerin yerleri, açılma kapanma zamanları ve kuvvetleri olarak sayılabilir.

Önerilen metodoloji yöntem itibarıyla genelleştirilebilir. Aslında, her grup konstrüksiyonun kendine has bir uygulanma tarzı vardır. Örnek olarak alınacak herhangi bir montajlı konstrüksiyondan globale geçmek mümkün değildir. Daha açık bir ifade ile, herhangi bir puntalama noktasından şu kadar uzaklıkta şu kadar distorsiyon gerçekleşir diye tahminde bulunmak olanak dışıdır. Her konstrüksiyonun kendisine göre geometrik ve teknolojik özellikleri vardır. Birleşik tolerans tahmini için çözüm önerilerinin buna göre geliştirilmesi gerekmektedir.

Sanayi uygulamalarında, birleşik toleransı tutturmak için çeşitli konstrüktif modifikasyonların denendiği veya tekil parçaların toleransları üzerinde sonradan değişikliğe gidilebildiği görülmüştür. Bu tezin sonuçlarından söz konusu uygulamalara katkı yapan birisi de, birleşik toleransı sağlamada imalat proses parametreleri üzerinde değişiklik yapmak suretiyle de sonuca gidilebileceğini göstermesidir. Tabii bu sırada, kaynak parametrelerinin daha önceden gerçekleştirilmiş dayanım testlerinden elde edilen değer aralıklarının dışına çıkmamasına özen göstermek gerekmektedir.

Otomotivde, hatların en sonunda dahi görsel ve manuel kontrollerin uygulandığı görülmektedir. Telafisi mümkün olmadığı takdirde, burada hata maliyetinin ne ölçüde büyük olacağı açıktır. Ağır trafik kazalarında, zaman zaman araçların parçalanması karşılaşılabilen ülke gerçekleri arasındadır. Bu bakımdan, distorsiyonları kontrol ederken nokta kaynaklarının mukavemetinden ödün vermemek de esastır.

Çıkarılan parametre-distorsiyon bağıntıları direkt olarak kaynak sonrası distorsiyonlar olarak şekillendirme sapmasına toplanarak, Tolerans Analiz Hesaplamaları kapsamında kullanılabilir. Eşitliği, istenen toleransa eşit alıp oradan ilgili parametre değeri çekilebilir. Bu sırada yine çıkan değerlerin istenen sınırlar içinde kalıp kalmadığı kontrol edilmelidir.

## **Kaynak Distorsiyonları ile Parametreleri Arasındaki Bağlılıklar**

Kaynak distorsiyonlarını belirleyen her türlü etken ve sapmalar arasındaki ilişki aşağıdaki gibi numaralandırılarak verilebilir:

- 1- Temrinlik çalışmalarda sunulan formüller asıl parçalara uygulanamamıştır. Çünkü kaynaktan sonra parçaların uçları gül gibi açılmıştır. Tarama sonuçları ile ortaya çıkan kaynak distorsiyonları da bunu kanıtlamıştır.
- 2- Bu çalışmada, tarama ve simülasyon sonuçları arasında büyük farkların olduğu görülmüştür. Simülasyonlarda sadece serbest pensler (free clamp) denilen bir fikstür özelliği eklendiği için simülasyon sonuçları çok küçük çıkmıştır.
- 3- Kaynak noktaları arttığında distorsiyonlar da artmıştır. Kaynak sırasının çok büyük bir etkisi görülmemiştir.
- 4- Söz konusu gözlemler, farklı sac parça biçim ve konstrüksiyonları için değişecektir.
- 5- Öngörüldüğü gibi punta çapı artınca distorsiyonlar yine artma eğilimi göstermiştir.
- 6- TOFAŞ projesinde (TOFAŞ Proje No: T1.1705.4.8), uygulanan ikinci kaynak sırasında distorsiyonun arttığı gözlemlenmiştir. Bunun kesin bir açıklaması yoktur. Bununla birlikte bazı yorumlamalarda bulunmak mümkündür. İkinci sıradaki kaynak noktaları sıra gözetilmeden birbirinden kopuk atılmıştır. Bu yüzden, atılan ilk nokta kaynakları bir tür fikstür gibi rol oynayabilmektedir. Bunlar fazladan uygulanan fikstürler olarak düşünüldüğünde, ekstra kalıntı gerilme yaratarak daha büyük deformasyona sebep olabilmektedir.
- 7- Sapmaların ikinci nedeni ise şönt etkisidir. İlk kaynak sırasında şönt noktalarında daha fazla kaçak akım yaratılmış; bu da daha az ısı girdisine sebebiyet vermiş olabilir.
- 8- Analizler sırasında çeşitli sonuçlar gözlemlenmiştir. Şekil 5.23 ve 5.24'e göre Kaynak Sırası 2 için distorsiyonlar azalmıştır. Bununla birlikte, üstteki eğimli parça için distorsiyon artmıştır. Kaynak sırası veya parçanın bağlama pensleri ile

dayamaları (clamping-stopp) değiştirildiğinde, oluşan distorsiyonlar arasında çok küçük farklar meydana gelmektedir.

- 9- Çeşitli kaynak sıralarına göre analiz sonuçları arasındaki farklar çok küçük olsa da önemli olan değişim eğilimini görmektir. Bu kaynak sırasının etkisi hakkında fikir verecektir. Tarama ve analiz arasında distorsiyon büyüklüğü açısından direkt bir ilişki kurulamamaktadır.
- 10- Ele alınan montaj grubunda uzun parçanın ortası elektrod kuvvetine maruz kalmaktadır (Şekil 4.37). Fakat Weld Planner yazılımında elektrod baskı kuvvetleri modellenememektedir. Bu yüzden –Y yönünde oluşan deformasyon bu yazılımda görülememektedir. Parçalar birleşik oldukları için montaj grubunun bütün deformasyonları da birbirine bağlı olmakta ve grubun içerisindeki bütün bölgelerde birbirlerini etkilemektedirler.
- 11- Söz konusu proses kompleks bir yapıya sahip olup, kaynak parametreleri, kaynak noktaları konumları, büyüklükleri, parça geometrisi, parça boyutları ve şönt etkisi gibi etkenlere bağlıdır. Bu yüzden kaynak sırasının distorsiyonlar üzerindeki etkileri için kesin ve genel bir açıklama bulmak imkansızdır.
- 12- Anılan etkenler ve araştırılan kaynak sırası birleşik bir biçimde birbirlerini ve bu sırada prosesi etkilemektedirler. Aynı şey kaynak parametreleri için de geçerlidir. Onlar da birbirleri ile etkileşim altındadırlar.
- 13- Ayrıca doğru kaynak sırası atama ile kaynak öncesi sapmalar (örneğin bükme sonrası geri esnemeler) telafi edilebilir.
- 14- Punta kaynağında kaynak akımı, kaynak zamanı ve elektrod kuvveti ile distorsiyonlar arasında direkt genel bir ilişki yoktur. Akım ve zaman arttığında elektrod kuvveti düştüğünde ise distorsiyonun artması beklense de bu her zaman böyle gerçekleşmemektedir. Bu da kaynak sırası, fikstür konumları, şönt etkisi ve punta konumları ile değişim göstermektedir.
- 15- Çeşitli noktalarda yapılan ANOVA çalışmalarında kaynak parametrelerinin etki derecelerinin çok farklı çıktığı görülmüştür. Yine burada da toplamda bütün

parametrelerin etkileşiminin önemi ve konstrüktif özellikler gibi etkenlerin payı da gözlemlenmektedir.

### **Genel Sonuçlar ve Kazanımlar**

#### **A- Tezde kurulmuş olan metodoloji sayesinde,**

- Sac parça grubu için başkaları tarafından belirlenmiş olan kaynak planı ve parametrelerini baz alarak, **ölçü ve biçim sapmalarının toplamı,**
- Sac parça grubunda, kritik noktalar için verilmiş olan optimum ölçü ve biçim sapmalarını sağlayabilecek **kaynak planı ve parametreleri,**

belirlenmektedir.

#### **B- Tez kapsamında tasarlanıp imal edilmiş olan eşleme sistemi ve yazılımı sayesinde,**

- Sac parça grubunu oluşturan **elemanların** ölçü ve biçim sapmalarını baz alarak kaynaklı montaj öncesi **optimal eşlenmeleri,**

sağlanmaktadır. Kısaca belirtmek gerekirse, **yanlışlıkların toplamından optimuma en yakın dizilimleri** ortaya çıkarılmaktadır.

### **İleriye Yönelik Çalışma Hedefleri**

Doktora tez çalışmaları dahilinde kazanılan deneyimler ile kaynak simülasyonu yazılımlarının daha etkin kullanımı bakımından alt programlar geliştirilmesi planlanmaktadır. Sunulan sistemde, daha fazla sayıdaki değişkenin fonksiyonlara dahil edilmesiyle geniş veri tabanları yaratılması ve böylelikle akıllı sistemlere dönüşümlerin gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir. Söz konusu çalışmalardan çıkarılacak sonuçların da, akıllı punta kaynak makinaları ve hatlarının projelendirilmesinde değerlendirilmesi ilaveten düşünülen robotik projeler arasındadır. Bütün bu çalışmalar, sanayimizin halen yoğun hazırlıklar içinde bulunduğu Endüstri 4.0 uygulamalarına temel teşkil edecek öncü modelleri de ortaya çıkarabilecektir.

## KAYNAKLAR

---

- [1] ISO 1101, (2015) Geometrical Product Specifications (GPS) – Geometric tolerancing – Tolerances of form, orientation, location and run-out, German and English version.
- [2] Cogorno, G.R., Geometric Dimensioning and Tolerancing for Mechanical Design, (2011), 2nd ed., Mc Graw-Hill Book Co., United States of America.
- [3] Thimm, G., Rui, W. ve Yongsheng, M., (2006). “Tolerance Transfer in Sheet Metal Forming”, International Journal of Production Research, 2 (5): 3289-3309.
- [4] Govik, A., Nilsson, L. ve Moshfegh, R., (2012). “Finite Element Simulation of the Manufacturing Process Chain of a Sheet Metal Assembly”, Journal of Materials Processing Technology, 212: 1453-1462.
- [5] Souza, de, T. ve Rolfe, B., (2008). “Multivariate Modelling of Variability in Sheet Metal Forming”, Journal of Materials Processing Technology, 203: 1-12.
- [6] Firat, M., Kaftanoglu, B. ve Eser O., (2008). “Sheet Metal Forming Analyses with an Emphasis on the Springback Deformation”, Journal of Materials Processing Technology, 196: 135-148.
- [7] Manarvi, I, A. ve Juster N, P., (2004). “Framework of an Integrated Tolerance Synthesis Model and Using FE Simulation as a Virtual Tool for Tolerance Allocation in Assembly Design”, Journal of Materials Processing Technology, 150: 182-193.
- [8] Kazan, R., Firat M. ve Tiryaki, A, E., (2009). “Prediction of Springback in Wipe-Bending Process of Sheet Metal Using Neural Network”, Materials and Design, 30: 418-423.
- [9] Firat, M., (2007). “Computer Aided Analysis and Design of Sheet Metal Forming Processes: Part I – The Finite Element Modeling Concepts”, Materials and Design, 28: 1298-1303.
- [10] Firat, M., (2007). “Computer Aided Analysis and Design of Sheet Metal Forming Processes: Part II – Deformation Response Modeling”, Materials and Design, 28: 1304-1310.

- [11] Dahlström, S., Lindkvist, L. ve Söderberg, R., (2007). "Practical Implications in Tolerance Analysis of Sheet Metal Assemblies: Experiences from an Automotive Application", *Models for Computer Aided Tolerancing in Design and Manufacturing*, 311-320.
- [12] Shaoyun, C., Zhongqin L., Yizhu, Z. ve Yongbing, L., (2006). "A Parametric Study of Sheet Metal Joints for Dimensional Integrity", *Int J Adv Manuf Technol*, 29: 446-452.
- [13] Koutecky, T., Palousek, D. ve Brandejs, J., (2013). "Method of Photogrammetric Measurement Automation Using TRITOP System and Industrial Robot", *Optik*.
- [14] Liu, W., Qu X., Ouyang, J. ve Wang Z., (2008). "Design and CAD-Directed Inspection Planning of Laser-Guided Measuring Robot", *Computer & Graphics*, 32: 617-623.
- [15] D'Acquisto, L. ve Fratini, L., (2001). "An Optical Technique for Springback Measurement in Axisymmetrical Deep Drawing Operations", *Journal of Manufacturing Processes*, 3 (1): 29-37.
- [16] Zhang, H. ve Senkara, J., (2012). *Resistance Welding Fundamentals and Applications*, CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton.
- [17] Bi, J., Song, J., Wei, Q., Zhang, Y., Li, Y. ve Luo, Z., (2016). "Characteristics of shunting in resistance spot welding for dissimilar unequal-thickness aluminum alloys under large thickness ratio", *Materials and Design*, 101: 226-235.
- [18] ISO 14373, (2015) *Resistance welding – Procedure for spot welding of uncoated and coated low carbon steels*; German version.
- [19] Doyen, O., Rizzo, N., Forest, L., Tosi, J., Thomas, N. ve Zmitko, M., (2017). "Assessment of HCLL-TBM optimum welding sequence scenario to minimize welding distortions", *Fusion Engineering Design*, 121: 80-86.
- [20] Fu, G., Lourenço, M.L., Duan, M. ve Estefen, S.F., (2016). "Influence of the welding sequence on residual stress and distortion of fillet welded structures", *Marine Structures*, 46: 30-55.
- [21] Chen, Z., Chen, Z. ve Sheno, R.A., (2015). "Influence of welding sequence on welding deformation and residual stress of a stiffened plate structure", *Ocean Engineering*, 106: 271-280.
- [22] Catana, D., (2010). "Traction behaviour simulation of spot welded", *DAAAM International Scientific Book*. DAAAM International, 978-3-901509-74-2, Vienna, Chapter 50: 575-582.
- [23] Sulaiman, M.S., Manurung, Y.H., Haruman, E., Rahim, M.R.A., Redza, M. R., Lidam, R.N.A., Abas, S.K., Tham, G. ve Chau, C.Y., (2011). "Simulation and experimental study on distortion of butt and T-joints using Weld Planner", *Journal of Mechanical Science and Technology*, 25 (10): 2641-2646.



- [24] Folchi, F., (2014). "Weld distortion prediction with virtual analysis for practical applications", M. Sc. Degree, Department of Mechanical, Automotive and Material Engineering, University of Windsor, Ontario, Canada.
- [25] Jackson, K. ve Darlington, R., "Advanced Engineering Methods of Assessing Welding Distortion in Aero- Engine Assemblies", Trends in Aerospace Manufacturing 2009 International Conference, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 26: 1-20.
- [26] Moos, S. ve Vezzetti, E., (2015). "Resistance spot welding process simulation for variational analysis on compliant assemblies", Journal of Manufacturing System, 12: 44-71.
- [27] Mrvar, P., Medved, J. ve Kastelic, S., (2011). "Welding sequence definition using numerical calculation", Welding Journal, 90: 148-151.
- [28] Neumann, H., Moravec, J. ve Bradac, J., (2010). "The welding process effect on the iron aluminide Fe<sub>3</sub>Al", Metal 2010, Ceska Republica.
- [29] Shanmugam, N.S., Buvanashakaran, G.; Sankaranarayananasamy, K. ve Kumar, S.R., (2010). "A transient finite element simulation of the temperature and bead profiles of T-joint laser welds", Materials and Design, 31 (9): 528-4542.
- [30] Francis, J.D., (2002). "Welding Simulation of aluminum alloy joints by finite element analysis", M. Sc. Degree, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute, Virginia State University, Virginia, USA.
- [31] Eşme, U., (2009). "Application of Taguchi Method for the Optimization of Resistance Spot Welding Process", The Arabian Journal for Science and Engineering, 34: 519-528.
- [32] Tian, L., Luo, Y., Wang Y. ve Wu, X., (2014). "Prediction of transverse and angular distortions of gas tungsten arc bead-on-plate welding using artificial neural network", Materials and Design, 54: 458-472.
- [33] Deng, D. Ve Murakawa, H., (2008). "FEM prediction of buckling distortion induced by welding in thin plate panel structures", Computational Materials Science, 43: 591-607.
- [34] Wang, J., Ma, N. ve Murakawa, H., (2015). "An efficient FE vomputation for predicting welding induced buckling in production of ship panel structure", Marine Structures, 41: 20-52.
- [35] Moos, S., Vezzetti, E. ve Zompi, A., (2011). "Assembly analysis for spot-welded compliant assembly: Gudelines for formalizing the plasticity contribution to tolerance analysis", Proceedingsof the ImproV2 2011, International Conference on Innovative Methods in Product Design, 15-17 June 2011, Venice, 539-549.
- [36] Mali, M. P. ve Inamdar K. H., (2012). "Effect of spot weld position variation on quality of automobile sheet metal parts", International Journal of Applied Research in Mechanical Engineering, 2 (2): 23-27.

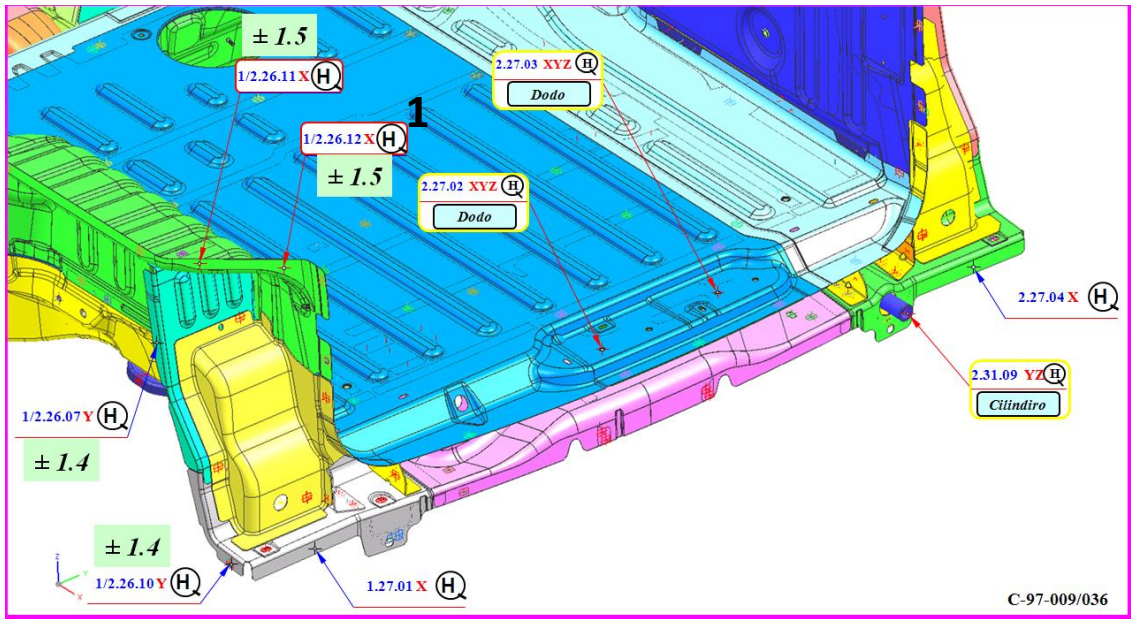
- [37] Deng, D., (2009). "FEM prediction of welding residual stress and distortion in carbon steel considering phase transformation effects", Materials and Design, 30: 359-366.
- [38] Chen, H., Jin, S., Li, Z. ve Lai, X., (2014). "A comprehensive study of three dimensional tolerance analysis methods", Computer-Aided Design, 53: 1-13.
- [39] Yan, H., Wu, X. ve Yang, J., (2015). "Application of Monte Carlo Method in Tolerance Analysis", Procedia CIRP, 27: 281-285.
- [40] Corrado, A., Polini, W., Moroni, G. ve Petro, S., (2016). "3D Tolerance Analysis with manufacturing signature and operating conditions", Procedia CIRP, 43: 130-135.
- [41] Douflou, J.R., Vancza, J. ve Aerens R., (2005). "Computer aided process planning for sheet metal bending: A state of the art", 56: 747-771.
- [42] Doruk, E., Pakdil M., Çam, G., Durgun İ. ve Kumru, U.C., Otomotiv Sektöründe Direnç Nokta Kaynağı: TOFAŞ Uygulamaları, [https://www.researchgate.net/profile/Ismail\\_Durgun2/publication/287193697\\_RESISTANCE\\_SPOT\\_WELDING\\_APPLICATIONS\\_IN\\_AUTOMOTIVE\\_INDUSTRY/links/5671c8be08ae3aa2fcedbc07/RESISTANCE-SPOT-WELDING-APPLICATIONS-IN-AUTOMOTIVE-INDUSTRY.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Ismail_Durgun2/publication/287193697_RESISTANCE_SPOT_WELDING_APPLICATIONS_IN_AUTOMOTIVE_INDUSTRY/links/5671c8be08ae3aa2fcedbc07/RESISTANCE-SPOT-WELDING-APPLICATIONS-IN-AUTOMOTIVE-INDUSTRY.pdf), 30 Ekim 2017.
- [43] Schreiber, S., Zak, P. ve Wilhelm, T., (2016). "Unsere Welt ohne Widerstandsschweißen - da würde uns etwas fehlen", DVS-Berichte, 23. DVS\_Sondertagung, 29-30 June 2016 Duisburg, 1-6.
- [44] Bielenin, M., Konstantin, S., Bergmann, J. P. ve Neudel, C., (2016). "Einseitiges Widerstandsfügeverfahren für metallische Mischverbindungen sowie Hybridverbindungen aus thermoplastischen Kunststoffen und Metallen", DVS Berichte, 23. DVS\_Sondertagung, 29-30 June 2016, Duisburg, 7-15.
- [45] Ruukki - Resistance Welding Manual, 2016.
- [46] Direnç Nokta Kaynağı (Punta Kaynağı), <http://www.neleryokki.org/egitim/kaynak/>, 31 Ekim 2017.
- [47] Mistaş Firması Katalogları, 2016.
- [48] Aslanlar, S., Elektrik Nokta Direnç Kaynağı, <http://content.lms.sabis.sakarya.edu.tr/Uploads/71097/42987/1.ednkay.pdf>, 31 Ekim 2017.
- [49] Albaksan Firması Katalogları, 2016.
- [50] ISO 5182, (2008) Resistance welding – Materials for electrodes and ancillary equipment; German version.
- [51] ISO 5821, (2009) Resistance welding – Spot welding electrode caps; German version.
- [52] Wei, P.S. ve Wu, T.H., (2012). "Electrical contact resistance effect on resistance spot welding", International Journal of Heat and Mass Transfer, 55: 3316-3324.

- [53] Wang, S.C. ve Wei P.S., (2001). "Modeling dynamic resistance during resistance spot welding", Journal of Heat Transfer, 576-585.
- [54] Tsai, C.L., Dai, W.L., Dickinson, D.W. ve Papritan, J.C., (1991). "Analysis and Development of a Real-Time Control Methodology in Resistance Spot Welding", Welding Research Supplement, 339-352.
- [55] Moshayedi, H. ve Sattari-Far, I., (2014). "Resistance spot welding and the effects of welding time and current on residual stresses", Journal of Materials Processing Technology, 214: 2545-2552.
- [56] Eryürek, İ.B., (1976). Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Temas Direncinin Etüdü, İTÜ, İstanbul.
- [57] ISO 14329, (2003) Resistance welding – Destructive of welds – Failure types and geometric measurements for resistance spot, seam and projection welds; German version.
- [58] ISO 14273, (2016) Resistance welding – Destructive testing of welds – Specimen dimensions and procedure for tensile shear testing resistance spot and embossed projection welds; German version.
- [59] ISO 14272, (2016) Resistance welding – Destructive testing of welds – Specimen dimensions and procedure for cross tension testing of resistance spot and embossed projection welds; German version.
- [60] Buckley, J. ve Servent R., (2008). "Improvements in Ultrasonic Inspection of Resistance Spot Welds", The 2<sup>nd</sup> International Conference on Technical Inspection and NDT (TINDT2008), October 2008, Tehran.
- [61] Doyum A.B. ve Sonat M., (2003). "Ultrasonic Examination of Resistance Spot Welds", DGZfP-Jahrestagung 2003.
- [62] Krautkramer Test Katalogu, Ultrasonic Testing of Spot Welds in the Automotive Industry.
- [63] Martin, O., Pereda M., Santos J.I. ve Galan J.M., (2014). "Assessment of resistance spot welding quality based on ultrasonic testing and tree-based techniques", Journal of Materials Processing Technology, 214: 2478-2487.
- [64] Mathisizik, C., Zschetzsche, J. Ve Füßel, U., (2016). "Zerstörungsfreie Bewertung des Linsendurchmessers beim Widerstandspunktschweißen durch bildgebende Analyse der Remanenzflussdichte", DVS-Berichte, 23. DVS\_Sondertagung, 29-30 June 2016, Duisburg.
- [65] İmal Usulleri, Kaynak Teknolojisi, <http://slideplayer.biz.tr/slide/10738409/>, 31 Ekim 2017.
- [66] Goldak, J.A. ve Akhlaghi, M., Computational Welding Mechanics, 2017, Springer, New York.
- [67] Yurci, M.E., (1992). Kalıp İmal Tekniği, Yıldız Teknik Üniversitesi, Yayın No.: 251.

- [68] Marciniak, Z., Duncan, J.L. ve Hu, S.J. (2002). Mechanics of Sheet Metal Forming, Second Edition, Butterworth Heinemann, London.
- [69] Yurci, M.E., (1992). Talaşsız Şekil Verme, Yıldız Teknik Üniversitesi, Yayın No.: 248.
- [70] Altan, T. (1998). Metal Forming Handbook, Springer-Verlag, Berlin.
- [71] Şekil ve Konum Toleransları, [http://makina.beun.edu.tr/eskisite/dersler/MAK349 Imalat Teknolojileri/Notlar/Teknik%20Resimde%20Geometrik Toleranslar 01.pdf](http://makina.beun.edu.tr/eskisite/dersler/MAK349%20Imalat%20Teknolojileri/Notlar/Teknik%20Resimde%20Geometrik%20Toleranslar%2001.pdf), 31 Ekim 2017.
- [72] Fischer, B.R., (2004). Mechanical Tolerance Stackup and Analysis, Marcel Dekker, New York.
- [73] Durakbasa, M.N., (2003). Geometrical Product Specifications and Verification for the Analytical Description of Technical and Non-Technical Structures, Abteilung Austauschbau und Messtechnik, Wien.
- [74] Renault Firması, Kot Zincirleri Eğitimi Notları, 2013.
- [75] Montgomery, D.C., (2009). Design and Analysis of Experiments, John Wiley & Sons, Hoboken.
- [76] Keleş, Ö., İTÜ Deneysel Tasarım Ders Notları, 2016.
- [77] Erdemir Grubu Ürün Katalogu, 2017.
- [78] Shah, D. ve Patel D.P., (2014). “Prediction of weld strength of resistance spot welding using artificial neural network”, Journal of Engineering Research and Applications, 3: 1486-1491.
- [79] ISO 22514-2, (2009) Statistical methods in process management - Capability and performance - Part 2: Process capability and performance of time-dependent process models.

## TOFAŞ FİRMASI İLE HAZIRLANMIŞ OLAN TOLERANS ANALİZİ PROBLEM ÖRNEKLERİ

1. Arka davlumbaz ile arka yan iskelet arasında X yönünde boşluğun tolerans analizi



Şekil A.1 Şaside Tekerlek Toleransı



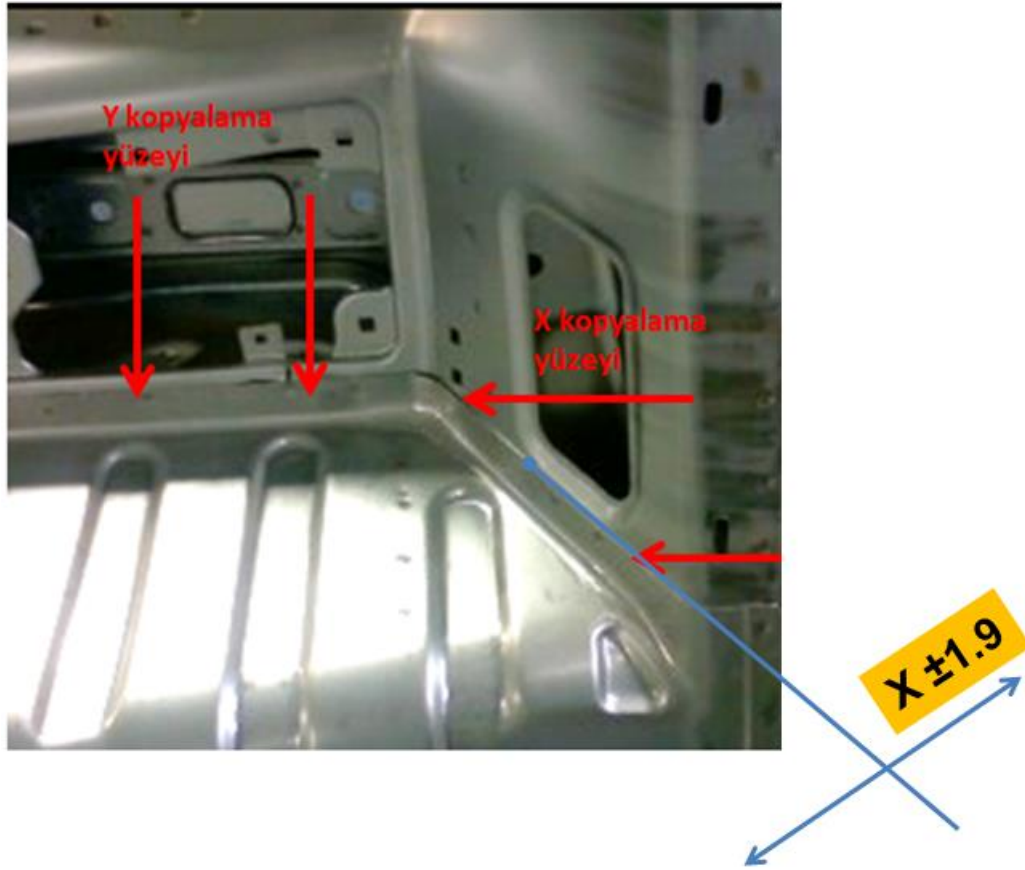
Şekil A.2 Yan çerçeve kompleksine göre yan braketin toleransı

Tolerans Analizi:

- 1- X yönünde şaside tekerler toleransı:  $\pm 1.5$
- 2- Yan çerçeve için tolerans:  $\pm 1$
- 3- Referanslama pernosunun toleransı:  $\pm 0.1$
- 4- Perno ile delik arası boşluk:  $\pm 0.11$
- 5- Sistemin şasi ile birleştirilirken yükleme toleransı  $\pm 0.2$
- 6- Yan çerçeve kompleksinde delik ile perno arası boşluk:  $\pm 0.13$

**İstatistiksel Tolerans Analizi-Kuadratik Yönteme göre Birleşik Tolerans:  $\pm 1.9$  mm**

**Worst-case Yöntemine Göre:  $\pm 3.04$  mm**

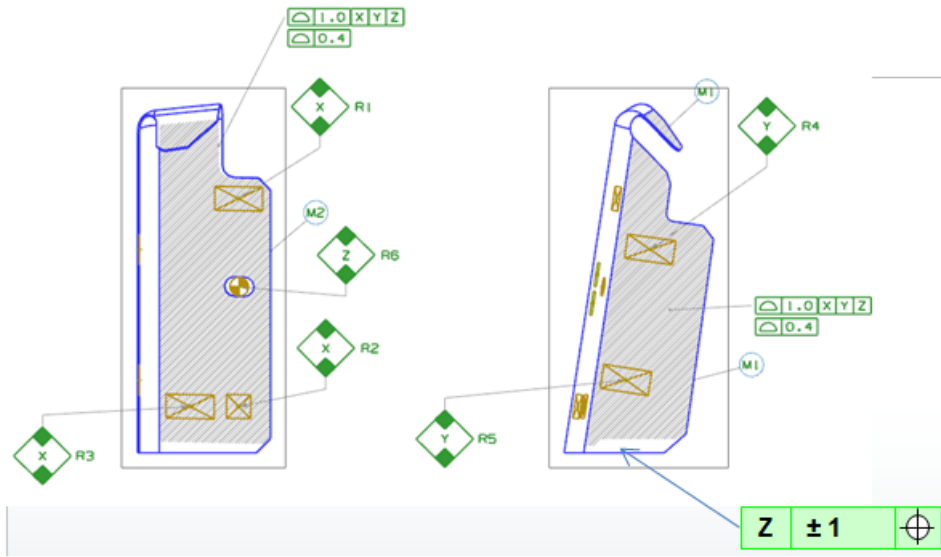


Şekil A.3 Sonuç Gösterimi

Analiz sonucunda şasi üzerindeki arka davlumbaz ile yan çerçeve kompleksi üzerindeki iç iskelet parçaları arasındaki kopyalama yüzeylerinin x yönünde  $\pm 1.9$  mm hareket edebileceği bulunmuştur. Bu sonuca göre yan çerçeve kompleksi iç iskelet sacı ile davlumbaz arasında 1.9 mm'ye kadar boşluk oluşabilecek veya 1.9 mm'ye kadar da girişim olabilecektir. Boşluk olduğunda bunu sistemin tolere etmesi mümkün görünmüyor. Boşuk olduğunda macun uygulaması zor bir hale gelecektir. Girişim durumu olduğunda yüzeyin X ve Y yönünde açılı olmasından dolayı Y'de yan çerçeve kompleksi hatalı konumlandırılarak bir miktar hata tolere edilebilir. Tabii ki bu doğru bir uygulama olmayacaktır, bir taraf düzeltilirken diğer tarafın geometrisi bozulacaktır. Ayrıca girişim olduğunda yan çerçevesine yüklenmesinde yerine yerleştirilmesinde sorun çıkacaktır.

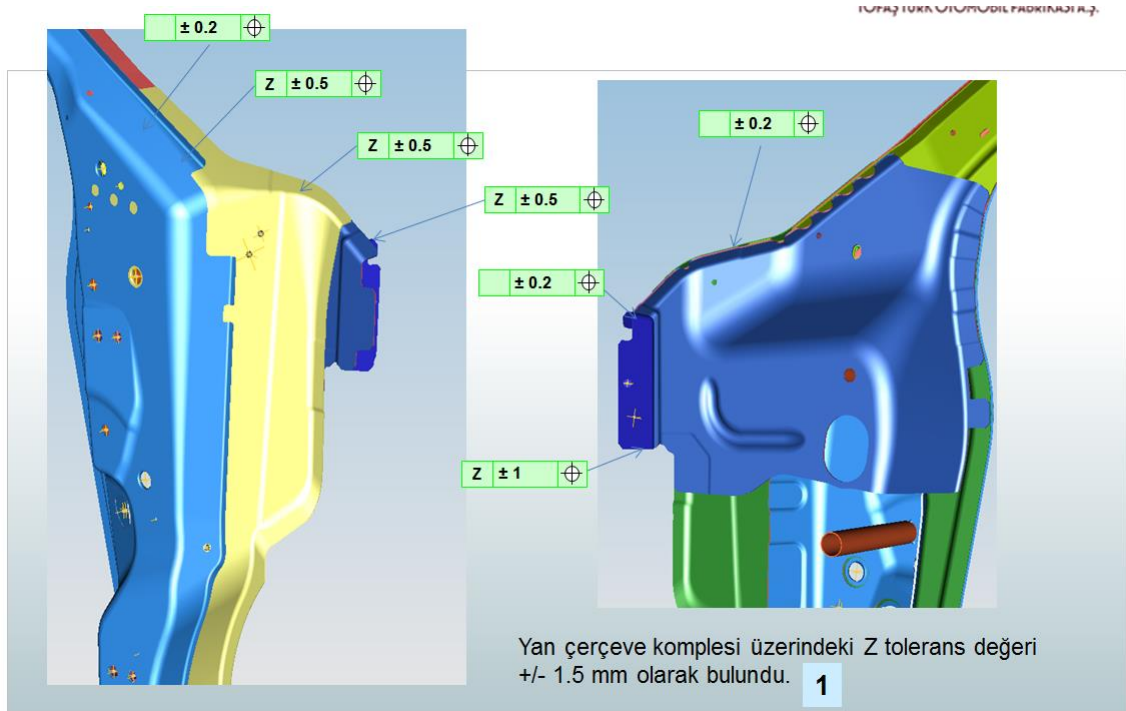
## 2. Ön cam yan direk ve iç yan parçaları arasındaki boşluğun tolerans analizi

Fiat normundan serbest kesim hattının toleransı aşağıda gösterildiği gibi  $\pm 1$  mm'dir.



Şekil A.4 Serbest Kesim Hattı Toleransı

Bu tolerans yalın olup yan çerçeve kompleksinin üzerinde ve dış sac ile evlendirilirken perno boşluk toleransı, perno, yandaki delikten boşluk toleransı, punta kaynağı etkisi gibi nedenlerle  $\pm 1.5$  mm'ye çıkmaktadır.



Şekil A.5 Yan çerçeve kompleksi üzerindeki değerler

Aşağıda Vasca Presa Aria Su Atotelaio için tolerans değeri direk parçanın kontrol planından alınmıştır. Bu değer de 1.5 mm'dir.

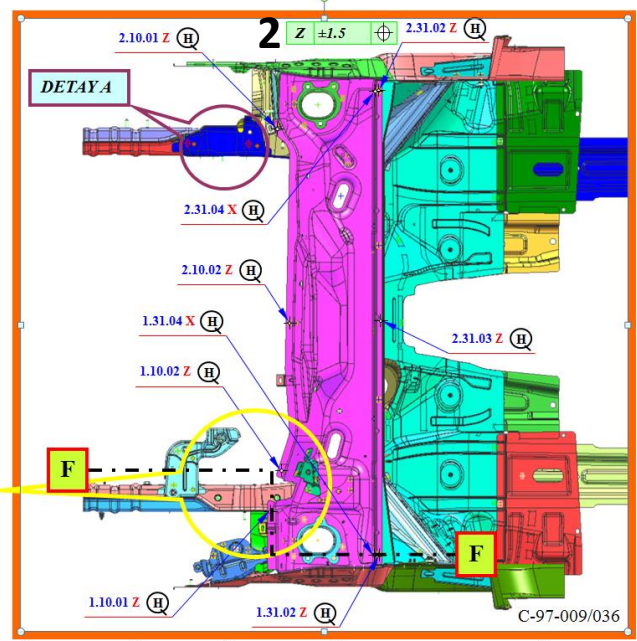
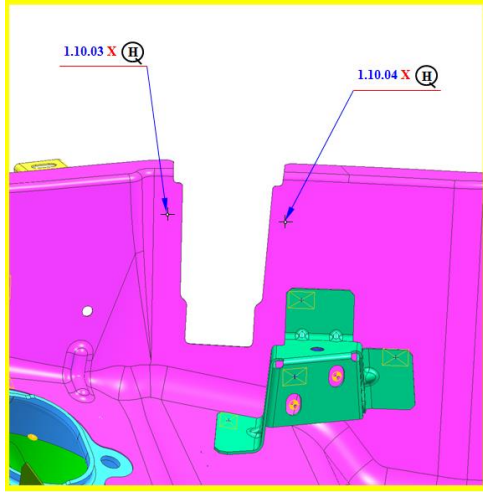


|          |                           |
|----------|---------------------------|
| Processo | Autotelaio Cs             |
| Disegno  | 51812471_FJR09837_Rev:008 |
| Codifica |                           |

## PIANO DI CONTROLLO PROCESSO

**Control Plan**  
Controllo dimensionale  
Caratteristiche chiave

|              |            |
|--------------|------------|
| Modello      | 263        |
| Stabilimento | Bursa      |
| Area         | Lastratura |



|             |          |              |           |              |            |           |            |                                 |
|-------------|----------|--------------|-----------|--------------|------------|-----------|------------|---------------------------------|
| Compilatore | S.HASRET | Approvazione | E.ÜNLÜKAL | Compilazione | 30.05.2008 | Data agg. | 26.06.2010 | Presenza in carico Stabilimento |
|-------------|----------|--------------|-----------|--------------|------------|-----------|------------|---------------------------------|

Şekil A.6 Kontrol Planı

Sonuç:

### Z yönünde Staffa Sostegno ve Vasca Presa Aria Parçaları Tolerans Analizi

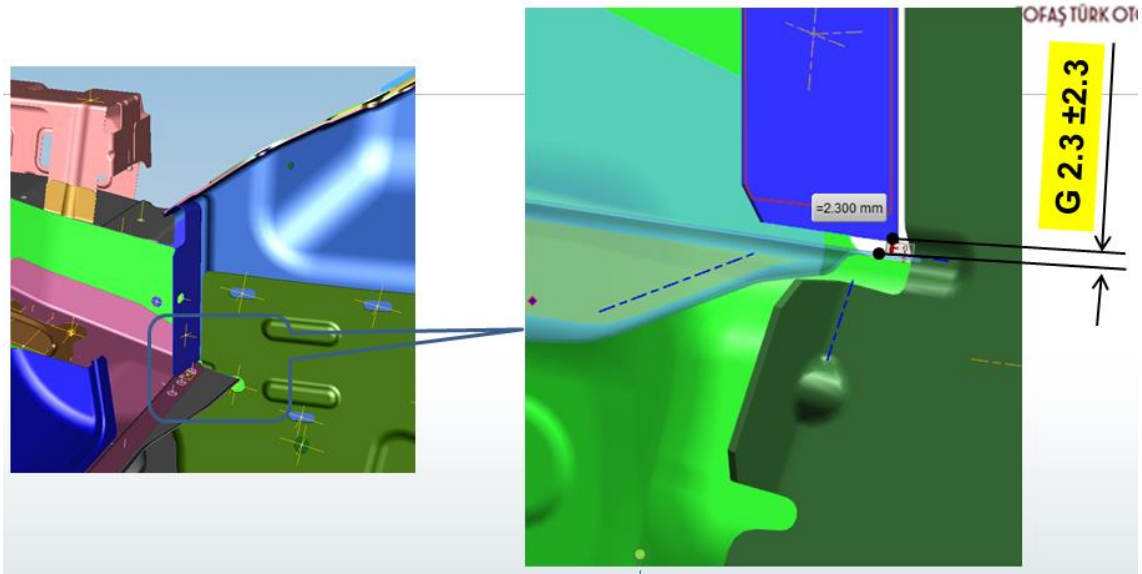
- 1- Yan Çerçeve Kompleksi üzerinde Staffa Sostegno Toleransı: +/- 1.5
- 2- Şasi üzerinde Vasca Presa Aria toleransı: +/- 1.5
- 3- Şasi Aparat Toleransı: +/- 0.1
- 4- Yan Çerçeve Kompleksi Aparat Toleransı: +/- 0.2
- 5- Yan Çerçeve Kompleksi'nin Perno Delik Boşluğu Toleransı: +/- 0.13

### **İstatistiksel Tolerans Analizi-Kuadratik Yönteme göre Birleşik Tolerans:**

+/-2.17+0.13 (ölçüm cihazının üreteceği belirsizlik toleransı) = +/-2.3 mm

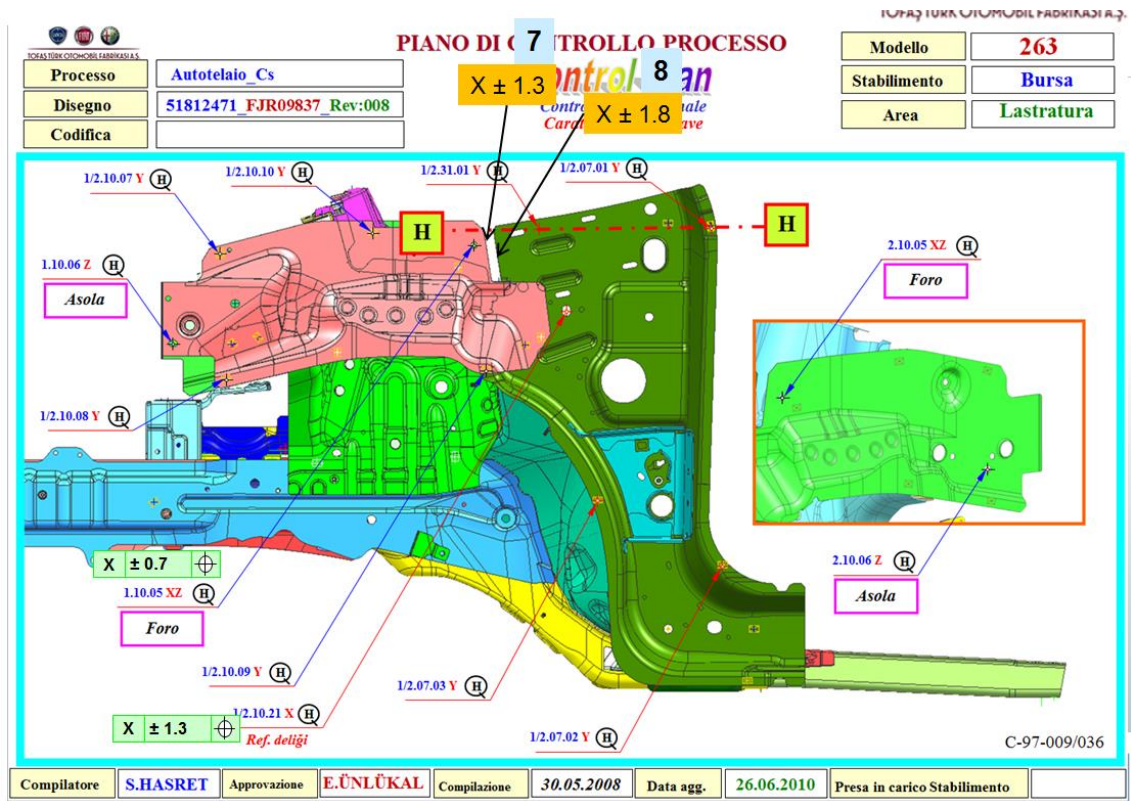
**Worst-case Yöntemine Göre:** +/- ~ 6 mm

Görüldüğü gibi worst-case yöntemine göre alınan değer oldukça büyüktür. Bunun nedeni yalın toleransı yan çerçeve kompleksinin üzerine taşırken bütün faktörlerin yeniden toplama olarak eklenme gereksinimidir.



Şekil A.7 Sonuç Gösterimi

Aşağıda Scatolamento Superiore ve Fiancata Interna parçaları için kontrol planı verilmektedir.



Şekil A.8 Kontrol Planı

Buna göre yeni sonuçlar aşağıdaki gibidir:

X yönünde Staffa Sostegno ve Scatolamento Superiore Parçaları Tolerans Analizi

6- Fiancata üzerinde Staffa Sostegno Toleransı:  $\pm 0.8$

7- Scatolamento superiore Toleransı:  $\pm 1.3$

3- Şasi Aparat Toleransı:  $\pm 0.1$

4- Yan Çerçeve Komplexi Aparat Toleransı:  $\pm 0.2$

5- Yan Çerçeve Komplexi Delik Perno Toleransı:  $\pm 0.13$

9- Şasi Delik Perno Toleransı:  $\pm 0.13$

**İstatistiksel Tolerans Analizi-Kuadratik Yönteme göre Birleşik Tolerans:**  $\pm 1.6 \pm 0.1$

(ölçüm cihazının üreteceği belirsizlik toleransı) =  $\pm 1.7$  mm

**Worst-case Yöntemine Göre:**  $\pm \sim 4$  mm

X yönünde Staffa Sostegno ve Fiancata Interna Parçaları Tolerans Analizi

6- Fiancata üzerinde Staffa Sostegno Toleransı:  $\pm 0.8$

8- Fiancata Interna Toleransı:  $\pm 1.8$

3- Şasi Aparat Toleransı:  $\pm 0.1$

4- Yan Çerçeve Komplexi Aparat Toleransı:  $\pm 0.2$

5- Yan Çerçeve Komplexi Delik Perno Toleransı:  $\pm 0.13$

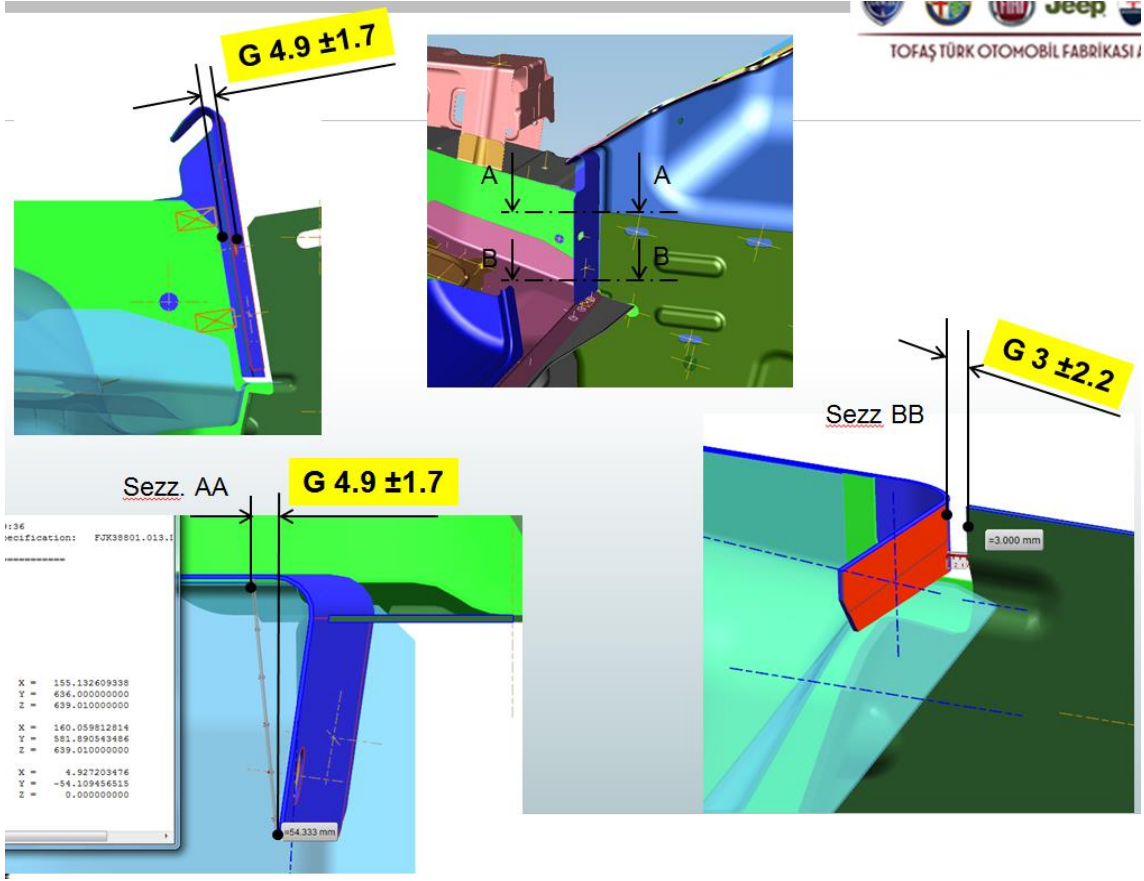
9- Şasi Delik Perno Toleransı:  $\pm 0.13$

**İstatistiksel Tolerans Analizi-Kuadratik Yönteme göre Birleşik Tolerans:**  $\pm 2.03 \pm 0.17$

(ölçüm cihazının üreteceği belirsizlik toleransı) =  $\pm 2.2$  mm

**Worst-case Yöntemine Göre:**  $\pm \sim 5$  mm

Sonuçların Gösterimi:



Şekil A.9 Sonuçların Gösterimi

Yorum:

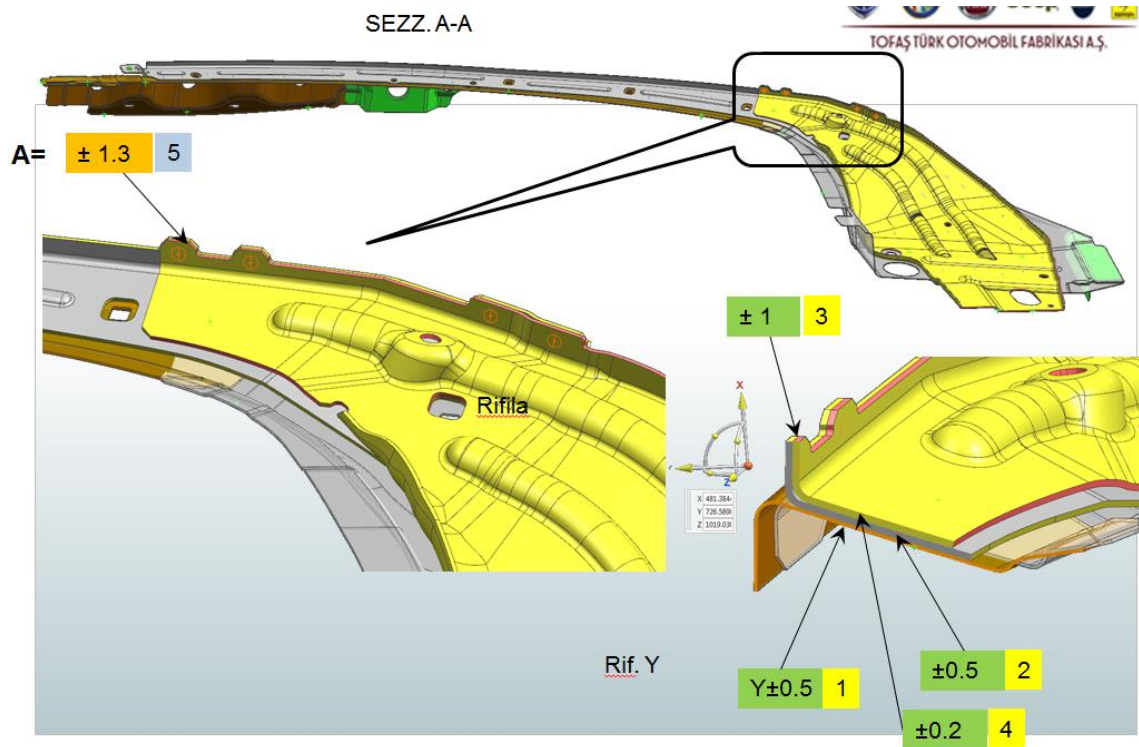
İlk tolerans analizi Vasca presa aria ile staffa sostegno parçasının kesim hattı arasındaki 2.3 mm'lik boşluk için yapılmıştır. Analiz sonucu  $\pm 2.3$  mm olarak bulunmuştur. Aslında bu sonuç üzerine fiancata üzerindeki referans deliğinin boşluk toleransını fiancatanın ağırlığı sebebiyle aşağıda konumlandığından dolayı  $+2.3/-2.43$  mm olarak düşünmek daha doğru olacaktır. Bu duruma göre projede 2.3 mm boşluk olduğundan dolayı sonuç olarak  $2.3-2.43=0.13$  mm kadar girişim olabilecektir. Durumun bir miktar worst-case doğru çalışması durumunda bu girişim miktarı dahada artacaktır. Bu durumda fiancatanın Autotelaio ile birleşme prosesinde sorun yaşanılması kaçınılmaz olacaktır. Bu sonuçlara göre 2.3 mm olan bu boşluğun emniyetli bir aralığa çıkarılması uygun olacaktır.

Diğer yapılan tolerans analizlerinde Scatolamento sup. Parçası ile Staffa sostegno parçası arasındaki 4.9 mm'lik boşluk için  $\pm 1.7$  mm analiz sonucu bulunmuştur. Farkına baktığımızda  $4.9-1.7=3.2$  mm daha emniyet payı kalmaktadır. Normal şartlarda bu

aralık için çakışma tehlikesi görülmemektedir. Tabiki üretim proseslerinin garanti altında tutulması ve parçaların taşıma sırasında çarpılmaması önem arz etmektedir.

Diğer tolerans analizi ise Fiancata interna parçası ile Staffa Sostegno parçası arasındaki 3 mm'lik mesafe için yapılmış ve  $\pm 2.2$  mm olarak bulunmuştur. Burda Fiancata kompleksi ilk yükleme esnasında bu mesafeye daha uzak olduğundan sorun yaşanmayacaktır. Son yükleme durumundan sonra ise mesafe istatistikte  $3 - 2.2 = 0.8$  mm'ye kadar düşebilecektir. Bu durumun bir miktar worst case'a çalışması durumunda temas yaparak ses oluşturma riski ortaya çıkabilir.

### 3. Ön cam direk kapağının kesim hattı ile ön cam yardımcı takviye parçası arasındaki boşluğun tolerans analizi



Şekil A.10 Rifila Parçası üzerinde toleranslar

#### A- Y yönünde Rifila Di Longh. Ve Montante Parabrezza Parçalarının Tolerans Analizi

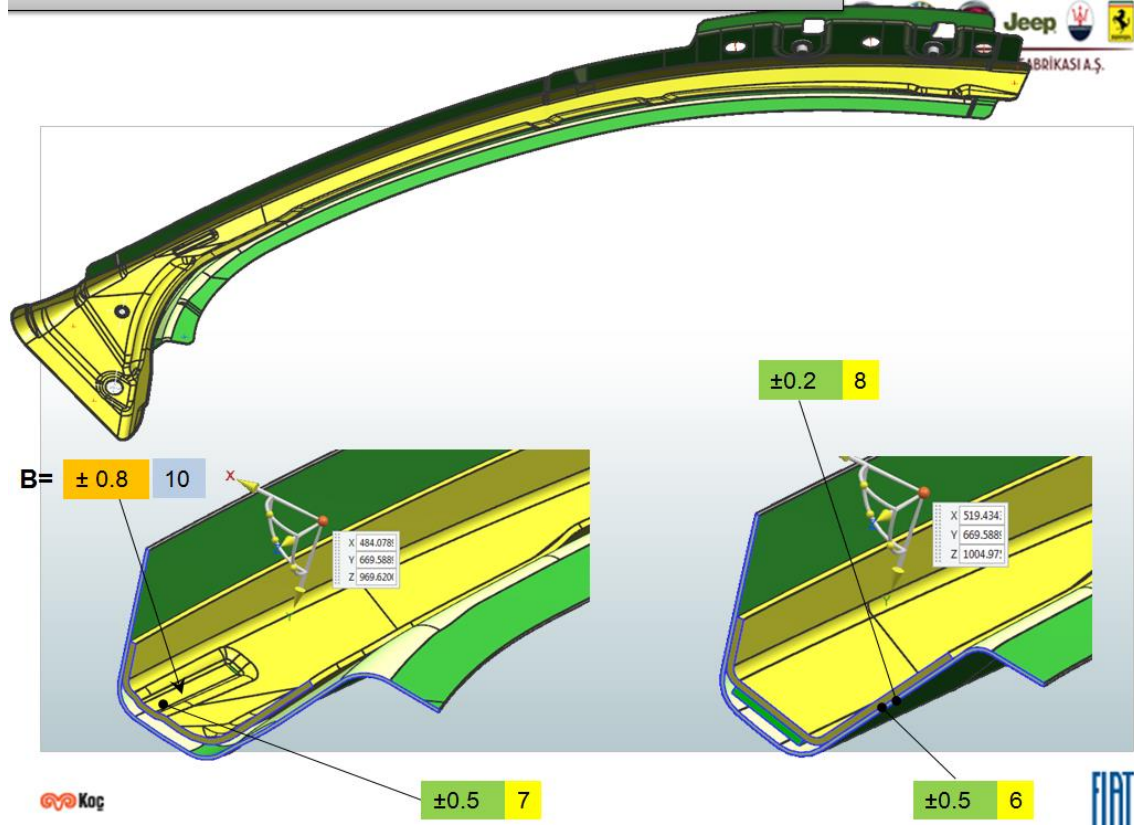
- 1- Scatolamento long. Mont. Parabrezza'nın Toleransı  $\pm 0.5$
- 2- Rinforzo longh. Parabrezza'nın Toleransı  $\pm 0.5$
- 3- Rifila di rinforzo inf. Longh. Parabrezza'nın Toleransı  $\pm 1$
- 4- Punta Kaynak Toleransı:  $\pm 0.2$



**İstatistiksel Tolerans Analizi-Kuadratik Yönteme göre Birleşik Tolerans:**  $\pm 1.24$

0,06 (ölçüm cihazının üreteceği belirsizlik toleransı) =  $\pm 1.3$ mm

**Worst-case Yöntemine Göre:**  $\pm 2.2$



Şekil A.11 Rinforzo long. Mont. Parabrezza ve Riporto int. longh. Parabrezza'nın Toleransları

**B- Y yönünde Piano di Riporto Int. Longh. Parabrezza parçalarının Tolerans Analizi**

6- Rinforzo long. Mont. Parabrezza'nın Toleransı:  $\pm 0.5$

7- Riporto int. longh. Parabrezza'nın Toleransı:  $\pm 0.5$

8- Punta Kaynak Toleransı:  $\pm 0.2$

9- Aparat Toleransı:  $\pm 0.1$

**İstatistiksel Tolerans Analizi-Kuadratik Yönteme göre Birleşik Tolerans:**  $\pm 0.76$

0,04 (ölçüm cihazının üreteceği belirsizlik toleransı) =  $\pm 0.8$  mm

**Worst-case Yöntemine Göre:**  $\pm 1.3$  mm

Y yönünde Rifila Di Long. Mont. Parabrezza ve Riporto Int. Long. Parabrezza Parçaları Tolerans Analizi

A- Y yönünde RIFILA DI LONGH. CS. MONTANTE PARABREZZA Parçaları Tolerans Analiz

Sonucu  $\pm 1.3$

B- Y yönünde PIANO DI RIPORTO INT. LONGH. PARABREZZA Parçaları Tolerans Analiz

Sonucu  $\pm 0.8$

11- Punta Kaynak Toleransı:  $\pm 0.2$

12- Aparat Toleransı:  $\pm 0.1$

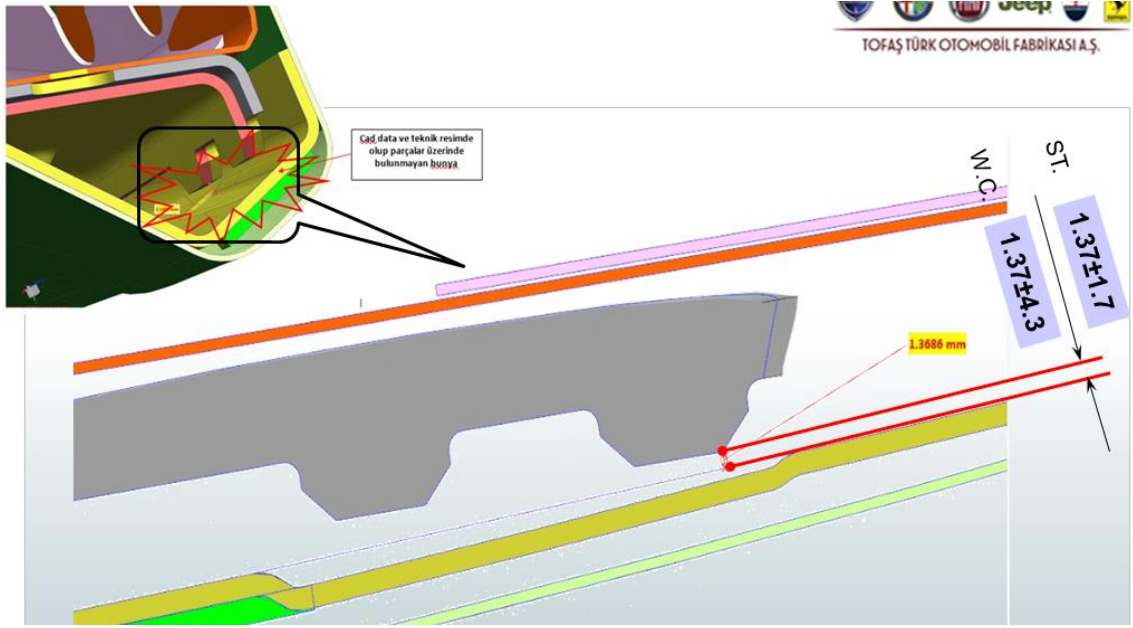
13- Yan Çerçeve Komplexi üzerine Long. Mont. Parabrezza'nın yükleme toleransı:  $\pm 0.5$

**İstatistiksel Tolerans Analizi-Kuadratik Yönteme göre Birleşik Tolerans:**  $\pm 1.63+$

0,07 (ölçüm cihazının üreteceği belirsizlik toleransı) =  $\pm 1.7$  mm

**Worst-case Yöntemine Göre:**  $\pm 4.3$  mm

### Sonuç (Analiz 1):



Şekil A.12 Sonuç Gösterimi

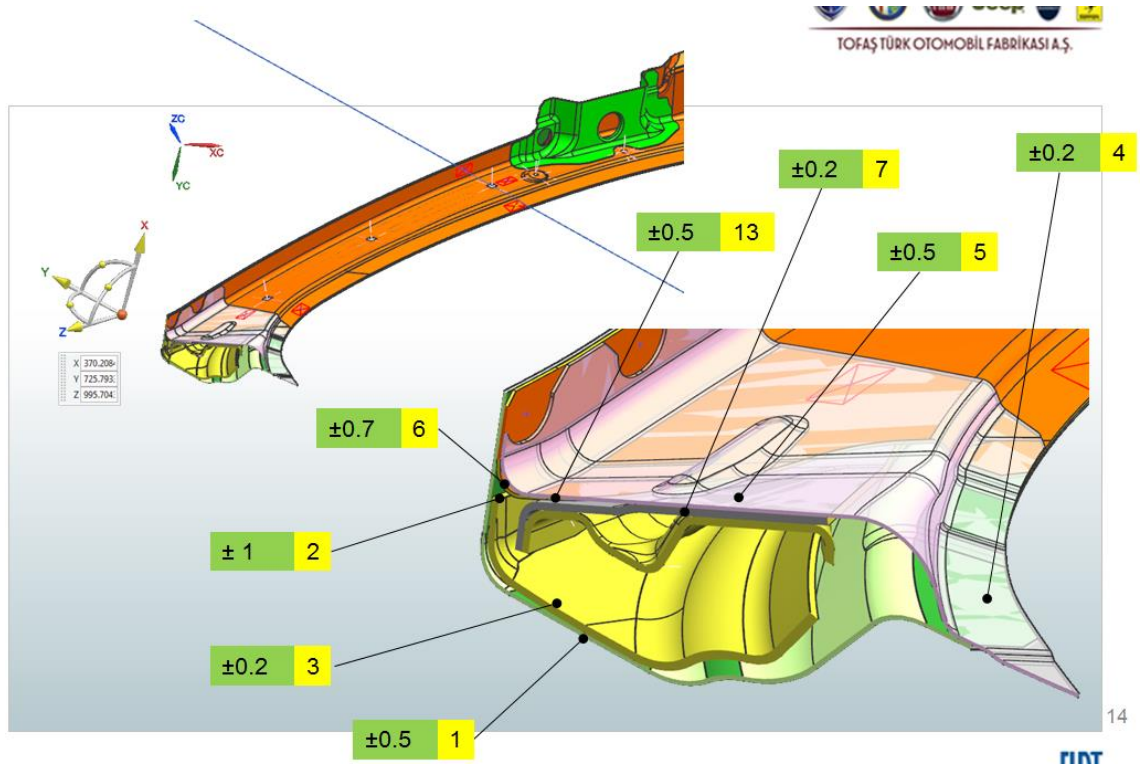
### Yorum:

1.37 mm lik boşluk için yapılan tolerans analizinde istatistiksel  $\pm 1.7$  mm lik bir sonuç bulunmuştur. Bu sonuca göre  $1.7 - 1.37 = 0.33$  mm lik bir girişim iki parça arasında olabilecektir.

Worst-case ise  $\pm 4.3$  mm olarak bulunmuştur. Bu sonuca göre de  $4.3 - 1.37 = 2.93$  mm lik bir girişim oluşabilecektir. Bu sonuçlara göre 1.37 mm lik mesafenin 4 mm ye çıkartılması uygun olacaktır.



## Analiz 2:



Şekil A.13 Tekil parçalar üzerinde toleranslar

## Sonuç:

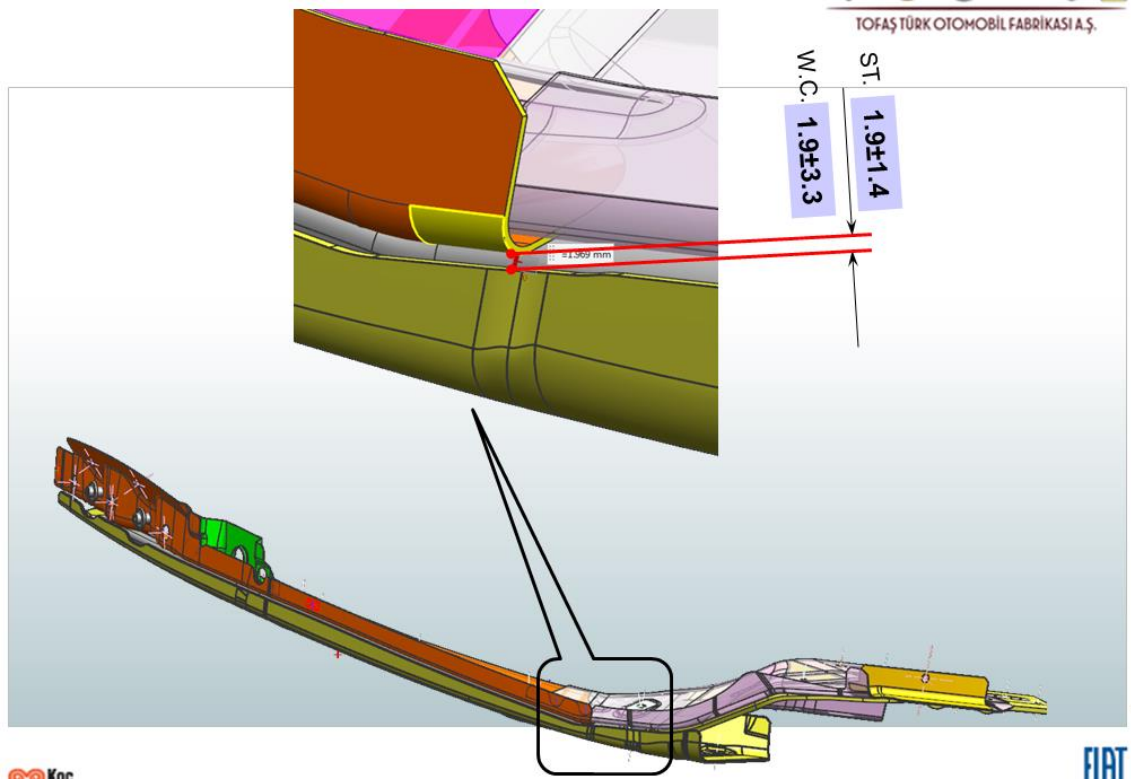
- 1- Rinforzo long. Mont. Parabrezza'nın Toleransı  $\pm 0.5$
- 2- Riporto int. longh. Parabrezza'nın Toleransı  $\pm 1$
- 3- Punta Kaynak Toleransı:  $\pm 0.2$
- 4- Punta Kaynak Toleransı:  $\pm 0.2$
- 5- Scatolamento long. Mont. parabrezza'nın Toleransı  $\pm 0.5$
- 6- Rinforzo longh. Parabrezza'nın Toleransı  $\pm 0.7$
- 7- Punta Kaynak Toleransı:  $\pm 0.2$
- 12- Aparat Toleransı:  $\pm 0.1$
- 13- Yan Çerçeve Kompleksi üzerine Long. Mont. Parabrezza'nın yükleme toleransı:  $\pm 0.5$

**İstatistiksel Tolerans Analizi-Kuadratik Yönteme göre Birleşik Tolerans:**  $\pm 1.54$

0,1 macc. ...  $\pm 1.64$  mm

**Worst-case Yöntemine Göre:**

$\pm 3.3$  mm



Şekil A.14 Analiz 2 için sonuç gösterimi

Yorum:

1.9 mm lik boşluk için yapılan tolerans analizinde istatistiksel  $\pm 1.64$  mm lik bir sonuç bulunmuştur. Bu sonuca göre  $1.9 - 1.64 = 0.26$  mm lik bir boşluk olabilecektir.

Worst-case ise  $\pm 3.4$  mm olarak bulunmuştur. Bu sonuca göre de  $3.4 - 1.64 = 1.66$  mm lik bir girişim oluşabilecektir. Bu sonuçlara göre 1.9 mm lik mesafenin min. 3.4 mm ye çıkartılması uygun olacaktır.

## ÖZGEÇMİŞ

---

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** : Cem YURCİ  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 01.10.1982, İstanbul  
**Yabancı Dili** : Almanca, İngilizce  
**E-posta** : yurci\_cem@yahoo.com

### ÖĞRENİM DURUMU

| Derece    | Alan          | Okul/Üniversite     | Mezuniyet Yılı |
|-----------|---------------|---------------------|----------------|
| Y. Lisans | Makina Müh.   | Yıldız Tek. Üniv.   | 2012           |
| Lisans    | Makina Müh.   | İstanbul Tek. Üniv. | 2005           |
| Lise      | Fen-Matematik | İstanbul Lisesi     | 2001           |

### İŞ TECRÜBESİ

| Yıl       | Firma/Kurum                                         | Görevi          |
|-----------|-----------------------------------------------------|-----------------|
| 2005-2006 | RWTH Aachen Şekillendirme Enstitüsü<br>Dövme Bölümü | Öğrenci Asistan |

## **YAYINLARI**

### **Makale**

1. Yurci, C., Akdogan A., Durakbasa, N.M., (2016). "Investigation of Effects (Welding Sequence, Fixturing, Welding Points) on Distortions after Spot Welding for Determining Individual and Cumulative Tolerances", IFAC PapersOnLine, 49-29: 30-35.
2. Yurci, C., Gunay, A., Durakbasa, N.M., (2012). "Performance Determination and Calibration of CMMs on the Basis of GPS Standards", Quality, 13: 291-295.

### **Bildiri**

1. Yurci, C., Akdogan A., Durakbasa, N. M., (2016). "Investigation of Effects (Welding Sequence, Fixturing, Welding Points) on Distortions after Spot Welding for Determining Individual and Cumulative Tolerances", IFAC International Conference on International Stability, Technology and Culture TECIS 2016, 26-28 October 2016, Durrës, Albania.
2. Durakbaşı, N. M., Demircioğlu, P., Günay, A., Yurci, C., (2012). "The Optimization of Measurement Calibration Procedure with a Heuristic Approach", International Doctoral Seminar, 20-22 May 2012, Smolenice, Slovakia.

### **Kitap**

1. Yurci, C., Akdogan A., Durakbasa, N. M., (2016). "A Case Study – Resistance Spot Welding Distortions according to Several Welding Sequences", DAAAM International Scientific Book, 2017, 13: 155-172, DAAAM International, Vienna (Kitap Bölümü).

### **Proje**

1. YTÜ BAP 2014-06-01-DOP04 Nolu Projesi
2. TOFAŞ 'TI.1705.4.8' Proje No.lu Araştırma Projesi

## **ÖDÜLLERİ**

1. TÜBİTAK 2211-A Yurtiçi Doktora Burs Programı Bursiyerliği
2. İTÜ Makina Mühendisliği Lisans 3.'lüğü
3. "Montaj Parçası Ölçme ve Gruplandırma Mekanizması" isimli, 31.10.2017 başvuru tarihli "2017/16877" No.lu Patent Başvurusu