

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**HAVA PLATFORMLARINDA KARBON FİBER TAKVİYELİ  
KOMPOZİT YAPILARIN ÜRETİM SÜREÇLERİNDE ORTAYA  
ÇIKAN ÖLÇÜSEL SAPMALAR ÜZERİNDE BİR ÇALIŞMA:  
TAKIM TASARIM BAKIŞ AÇISI**

**HAZIRLAYAN**

**ALİ KARAMAN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ANKARA – 2025**



**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**HAVA PLATFORMLARINDA KARBON FİBER TAKVİYELİ  
KOMPOZİT YAPILARIN ÜRETİM SÜREÇLERİNDE ORTAYA  
ÇIKAN ÖLÇÜSEL SAPMALAR ÜZERİNDE BİR ÇALIŞMA:  
TAKIM TASARIM BAKIŞ AÇISI**

**HAZIRLAYAN**

**ALİ KARAMAN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**TEZ DANIŞMANI**

**PROF. DR. FARUK ELALDI**

**ANKARA – 2025**

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Tezli Yüksek Lisans Programı çerçevesinde Ali Karaman tarafından hazırlanan bu çalışma, aşağıdaki jüri tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: 05 / 05 / 2025

**Tez Adı:** Hava Platformlarında Karbon Fiber Takviyeli Kompozit Yapıların Üretim Süreçlerinde Ortaya Çıkan Ölçüsel Sapmalar Üzerinde Bir Çalışma: Takım Tasarım Bakış Açısı

**Tez Jüri Üyeleri**

**İmza**

Prof. Dr. Faruk Elaldı – Başkent Üniversitesi

.....

Dr. Behzat Bahadır Kentel – TED Üniversitesi

.....

Dr. Cenk Balçık – Başkent Üniversitesi

.....

**ONAY**

Prof. Dr. Dilek Çökeliler Serdaroğlu

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Tarih : ... / ... / .....

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ**  
**YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU**

Tarih: 24 / 06 / 2025

Öğrencinin Adı, Soyadı : Ali Karaman

Öğrencinin Numarası : 22120113

Anabilim Dalı : Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Programı : Makine Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

Danışmanın Unvanı/Adı, Soyadı : Prof. Dr. Faruk Elaldı

Tez Başlığı : Hava Platformlarında Karbon Fiber Takviyeli Kompozit Yapıların Üretim

Süreçlerinde Ortaya Çıkan Ölçüsel Sapmalar Üzerinde Bir Çalışma: Takım Tasarım Bakış  
Açısı

Yukarıda başlığı belirtilen Yüksek Lisans tez çalışmamın; Giriş, Ana Bölümler ve Sonuç Bölümünden oluşan, toplam 109 sayfalık kısmına ilişkin, 23 / 05 / 2025 tarihinde tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı %3'tür. Uygulanan filtrelemeler:

1. Kaynakça hariç
2. Alıntılar hariç
3. Beş (5) kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

“Başkent Üniversitesi Enstitüleri Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Usul ve Esaslarını” inceledim ve bu uygulama esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarına tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Öğrenci İmzası:.....

**ONAY**

Tarih: 24 / 06 / 2025

Öğrenci Danışmanı

Prof. Dr. Faruk ELALDI

*Bu tezi motivasyon kaynağım Ozan Karaman'a ithaf ediyorum.*

Ali KARAMAN

Ankara – 2025

## TEŞEKKÜR

Yazar, bu çalışmanın gerçekleşmesinde katkılarından dolayı, aşağıda adı geçen kişi ve kuruluşlara içtenlikle teşekkür eder.

Sayın Prof. Dr. Faruk ELALDI'ya (tez danışmanı), bilgi ve tecrübesi ile bu çalışmaya yön verdiği, derin deneyimleri ile yol gösterdiği, değerli yardımları ve tükenmez sabrı ile sağladığı destekleri için...

TUSAŞ Türk Havacılık ve Uzay Sanayii AŞ'ye sağladığı tüm imkanlar ve bu çalışmaya verdiği önem için...

Ailem, Burcu KARAMAN ve Ozan KARAMAN'a destekleri için...

# ÖZET

**Ali KARAMAN**

## **HAVA PLATFORMLARINDA KULLANILAN KARBON FİBER TAKVİYELİ KOMPOZİT YAPILARIN ÜRETİM SÜREÇLERİNDE ORTAYA ÇIKAN ÖLÇÜSEL SAPMALAR ÜZERİNDE BİR ÇALIŞMA: TAKIM TASARIM BAKIŞ AÇISI**

**Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**2025**

Havacılık endüstrisinde özellikle birincil yapılarda kullanılan karbon fiber takviyeli termoset matris yapısına sahip kompozit parçaların, üretim süreçleri sonrasında tasarım geometrilerinden farkları, yapısal montaj faaliyetlerinde yüksek maliyetli kayıplara, hava araçlarının kullanım aşamalarında ise uçuş güvenliğini tehdit eden sonuçlara neden olmaktadır. Literatürde, kompozit parça geometrilerine bağlı olarak gözlemlenen süreç kaynaklı ölçüsel sapmalar, türleri ve bu deformasyonlara etki eden iç ve dış faktörlerin sınıflandırılması incelenmiştir. Bu tez çalışmasında, termoset matris yapıları karbon fiber ile güçlendirilmiş AS4/8552 malzemeden 90° açı ile tek büküme ("L" şekle) sahip bir test parçası geometrisi için literatürde bulunan analitik çalışmalar ile deformasyon hesabı gerçekleştirilmiş ve iç faktörler nedeniyle ortaya çıkacak deformasyon öngörülmüştür. Deneysel çalışma kısmında ise bu test parçasının dış faktörler değiştirilerek üretimleri için farklı takım malzemeleri kullanılarak dört kalıp hazırlanmış, toplam 24 test parçası, iç faktörleri sabit tutularak bu kalıplarla üretilmiştir. Literatürde parça iç faktörleri ile analitik olarak hesaplanan süreç deformasyonlarına ek olarak, kalıp parametrelerinin etkisinin dahil edildiği toplam süreç deformasyonu analitik eşitlikleri bu çalışmada önerilmiştir. Aynı iç parametrelere sahip parçaların erkek-dişi kalıplarda üretilmesi farkları karşılaştırılmıştır. Parça tasarım geometrilerine yakınsama sağlamak üzere takımların tasarım aşamasında kullanılması gereken kalıp kompanzasyon faktörü hesaplama yöntemi önerilmiştir.

**ANAHTAR KELİMELELER:** Kompozit Üretim, Süreç Deformasyonları, Kompozit Serim Kalıbı, Geometrik Kararlılık, Flanş İç Kapanma Değerleri ve Takım Kompanzasyonu



## **ABSTRACT**

**Ali KARAMAN**

**A STUDY ON DIMENSIONAL DEVIATIONS IN THE MANUFACTURING  
PROCESS OF CARBON FIBER REINFORCED COMPOSITE STRUCTURES IN  
AERIAL PLATFORMS: A TOOL DESIGN PERSPECTIVE**

**Başkent University Institute of Science**

**Department of Mechanical Engineering**

**2025**

Composite parts with carbon fiber reinforced thermoset matrix structure, which are used especially in primary structures in the aviation industry, differ from the design geometries after the production processes, causing high-cost losses in structural assembly activities and consequences that threaten flight safety during the usage phases of aircraft. The types of divergence from design geometry observed in literature depending on part shape and the classification of intrinsic and extrinsic factors affecting these deformations were examined. In this thesis study, deformation calculations were carried out using analytical methods found in literature for an "L" shaped test piece geometry with a single bend at a 90° angle, made of AS4/8552 material and the deformation that would occur due to intrinsic factors was predicted. In the experimental study part, four molds were prepared using four different tool materials to produce 24 test specimens by keeping the intrinsic factors constant. In addition to the process induced deformations caused by intrinsic factors, the analytical formulation expanded to include mold parameters which are considered as an extrinsic factor. The deformation differentiations resulting from the production of parts with the same intrinsic parameters in male and female molds are compared. A mold compensation factor calculation method has been proposed to be used in the design phase of the tools in order to provide convergence to the part design geometries.

**KEYWORDS:** Composite Manufacturing, Process Induced Deformation, Lay-up Tool, Dimensional Stability, Spring-in and Mold Compensation

# İÇİNDEKİLER

|                                                                      |      |
|----------------------------------------------------------------------|------|
| TEŞEKKÜR.....                                                        | i    |
| ÖZET.....                                                            | ii   |
| ABSTRACT.....                                                        | iii  |
| İÇİNDEKİLER.....                                                     | iv   |
| ÖNSÖZ.....                                                           | vi   |
| TABLolar LİSTESİ.....                                                | vii  |
| ŞEKİLLER LİSTESİ.....                                                | ix   |
| SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....                                 | xiii |
| 1. GİRİŞ.....                                                        | 1    |
| 1.1. Havacılık Sektöründe Kullanılan Kompozit Malzeme Sınıfları..... | 2    |
| 1.2. Motivasyon.....                                                 | 4    |
| 1.3. Amaç.....                                                       | 5    |
| 1.4. Hedef.....                                                      | 6    |
| 2. LİTERATÜR TARAMASI.....                                           | 7    |
| 2.1. Süreç Kaynaklı Deformasyona Etki Eden İç Faktörler.....         | 9    |
| 2.1.1. Geometri.....                                                 | 9    |
| 2.1.2. Malzeme özellikleri.....                                      | 12   |
| 2.1.3. Serim yönü.....                                               | 14   |
| 2.1.4. Katman sayısı.....                                            | 15   |
| 2.2. Süreç Kaynaklı Deformasyona Etki Eden Dış Faktörler.....        | 18   |
| 2.2.1. Kurlenme.....                                                 | 18   |
| 2.2.2. Kalıp.....                                                    | 20   |
| 3. ANALİTİK ÇALIŞMALAR.....                                          | 22   |
| 3.1. Seçilen Konfigürasyon ve Test Parçası Tasarımı.....             | 22   |
| 3.1.1. Geometri.....                                                 | 22   |
| 3.1.2. Malzeme.....                                                  | 24   |
| 3.1.3. Serim yönü.....                                               | 25   |

|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1.4. Katman sayısı.....                                              | 25 |
| 3.2. Test Parçaları Deformasyonlarının Analitik Değerlendirilmesi..... | 26 |
| 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....                                            | 30 |
| 4.1. Test Parçaları Tasarımı.....                                      | 30 |
| 4.2. Kalıp Tasarımı ve Üretimi.....                                    | 33 |
| 4.3. Test Parçaları Üretimi Ön Hazırlık Aşaması.....                   | 43 |
| 4.4. Test Parçaları Serim İşlemleri.....                               | 46 |
| 4.5. Vakum İçin Torbalama.....                                         | 51 |
| 4.6. Kürleme Süreci.....                                               | 51 |
| 4.7. Kalıptan Çıkarma.....                                             | 52 |
| 4.8. Test Parçalarının Ölçümü.....                                     | 53 |
| 5. BULGULAR VE DEĞERLENDİRMELER.....                                   | 81 |
| 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....                                           | 91 |
| 6.1. Sonuçlar.....                                                     | 92 |
| 6.2. Gelecek Çalışmalar.....                                           | 94 |
| KAYNAKLAR.....                                                         | 95 |

## ÖNSÖZ

Bu tezin ortaya çıkmasına TUSAŞ bünyesinde gerçekleştirilmiş ve gerçekleştirilmekte olan farklı projelere ait karbon fiber ile güçlendirilmiş termoset matris yapısına sahip kompozit parçaların, yapısal montaj operasyonları sırasında tasarım geometrilerinden ölçüsel sapmalar göstermesinin neden olduğu operasyonel zorlukların çözüm ihtiyacı motivasyon oluşturmıştır. Bu parçalarda görülen geometrik deformasyonların önlenmesi mümkün olmasa da üretim süreci başında doğru tahmin edilmesi ile gerekli aksiyonların planlanması mümkündür.

Havacılık endüstrisi regülasyonlarının sıkı kuralları çerçevesinde, parça kullanım koşullarındaki limitleri koruyabilmek için, parça tasarım kriterlerinin değiştirilmesi çoğunlukla tercih edilmemekte veya sınırlı önlemler alınabilmektedir. Ancak hem parça tasarım kriterlerinin hem de üretim süreci kaynaklı deformasyonların toplamının önceden tahmini, parçaların üretim kalıplarının tasarımları aşamasında, takımlara gerekli düzeltici katsayıların uygulanmasını sağlayabilmektedir. Takımların tahmin edilen değerlere göre kompanse edilmesi ile üretim sonucu elde edilen parça geometrileri ile parça tasarımları arasındaki farklar minimum seviyelere indirgenebilir. Bu durum ancak süreç deformasyon değerinin doğru tahmin edilebilmesi ile mümkün olmaktadır.

Bu tez çalışmasında, literatürde bulunan analitik formüller ile seçilen geometriye sahip parçaların iç faktörleri nedeniyle ortaya çıkartacağı deformasyonlar öngörülmüş, daha sonra parça üretimleri gerçekleştirilerek, dış faktör etkisinin oranı ve kalıp tasarım kriterlerinin etkisi gözlemlenmiştir.

## TABLÖLER LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablo 1.1. Fiber malzemeleri ve mekanik özellikleri .....                    | 2  |
| Tablo 1.2. Matris malzemeleri ve mekanik özellikleri .....                   | 3  |
| Tablo 2.1. Katman sayıları ve kalınlık karşılıkları .....                    | 15 |
| Tablo 3.1. Test parçası geometrik özellikleri .....                          | 23 |
| Tablo 3.2. AS4/8552 kompozit fiziksel özellikleri.....                       | 24 |
| Tablo 3.3. AS4/8552 kompozit termal özellikleri .....                        | 24 |
| Tablo 3.4. AS4/8552 kompozit mekanik özellikleri.....                        | 25 |
| Tablo 3.5. AS4/8552 kompozit katman kalınlık değerleri .....                 | 26 |
| Tablo 3.6. Eşitlik (2.15) hesaplamalarında kullanılan sayısal değerler ..... | 26 |
| Tablo 3.7. Süreç deformasyonu analitik değerleri.....                        | 29 |
| Tablo 4.1. Kalıp malzemeleri ve ısı genleşme katsayıları.....                | 35 |
| Tablo 4.2. Takımlara uygulanan düzeltici ölçeklendirme katsayıları .....     | 38 |
| Tablo 4.3. Test parçaları numaralandırma.....                                | 50 |
| Tablo 4.4. Test parçaları ölçüm noktaları ve deformasyon değerleri .....     | 56 |
| Tablo 4.5. T1.P1.1 numaralı parça ölçüm noktaları deformasyonları .....      | 57 |
| Tablo 4.6. T1.P1.2 numaralı parça ölçüm noktaları deformasyonları .....      | 58 |
| Tablo 4.7. T1.P2.1 numaralı parça ölçüm noktaları deformasyonları .....      | 59 |
| Tablo 4.8. T1.P2.2 numaralı parça ölçüm noktaları deformasyonları .....      | 60 |
| Tablo 4.9. T1.P3.1 numaralı parça ölçüm noktaları deformasyonları .....      | 61 |
| Tablo 4.10. T1.P3.2 numaralı parça ölçüm noktaları deformasyonları .....     | 62 |
| Tablo 4.11. T2.P1.1 numaralı parça ölçüm noktaları deformasyonları .....     | 63 |
| Tablo 4.12. T2.P1.2 numaralı parça ölçüm noktaları deformasyonları .....     | 64 |

|                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablo 4.13. T2.P2.1 numaralı parça ölçüm noktaları deformasyonları .....                     | 65 |
| Tablo 4.14. T2.P2.2 numaralı parça ölçüm noktaları deformasyonları .....                     | 66 |
| Tablo 4.15. T2.P3.1 numaralı parça ölçüm noktaları deformasyonları .....                     | 67 |
| Tablo 4.16. T2.P3.2 numaralı parça ölçüm noktaları deformasyonları .....                     | 68 |
| Tablo 4.17. T3.P1.1 numaralı parça ölçüm noktaları deformasyonları .....                     | 69 |
| Tablo 4.18. T3.P1.2 numaralı parça ölçüm noktaları deformasyonları .....                     | 70 |
| Tablo 4.19. T3.P2.1 numaralı parça ölçüm noktaları deformasyonları .....                     | 71 |
| Tablo 4.20. T3.P2.2 numaralı parça ölçüm noktaları deformasyonları .....                     | 72 |
| Tablo 4.21. T3.P3.1 numaralı parça ölçüm noktaları deformasyonları .....                     | 73 |
| Tablo 4.22. T3.P3.2 numaralı parça ölçüm noktaları deformasyonları .....                     | 74 |
| Tablo 4.23. T4.P1.1 numaralı parça ölçüm noktaları deformasyonları .....                     | 75 |
| Tablo 4.24. T4.P1.2 numaralı parça ölçüm noktaları deformasyonları .....                     | 76 |
| Tablo 4.25. T4.P2.1 numaralı parça ölçüm noktaları deformasyonları .....                     | 77 |
| Tablo 4.26. T4.P2.2 numaralı parça ölçüm noktaları deformasyonları .....                     | 78 |
| Tablo 4.27. T4.P3.1 numaralı parça ölçüm noktaları deformasyonları .....                     | 79 |
| Tablo 4.28. T4.P3.2 numaralı parça ölçüm noktaları deformasyonları .....                     | 80 |
| Tablo 5.1. P1 numaralı parça deformasyon değerleri.....                                      | 81 |
| Tablo 5.2. P2 numaralı parça deformasyon değerleri.....                                      | 82 |
| Tablo 5.3. P3 numaralı parça deformasyon değerleri.....                                      | 82 |
| Tablo 5.4. Erkek kalıp ile üretilen parça (P1) deformasyonu ile takım malzemesi ilişkisi .   | 84 |
| Tablo 5.5. Dişi kalıp ile üretilen parça (P2) deformasyonu ile takım malzemesi ilişkisi .... | 86 |
| Tablo 5.6. Takım malzemesi ile süreç deformasyonu artışı .....                               | 87 |
| Tablo 5.7. Erkek-dişi kalıp deformasyon artışı .....                                         | 88 |
| Tablo 5.8. P3 parçası ile P1 ve P2 parçaları açısı değişim yüzdeleri.....                    | 90 |

## ŞEKİLLER LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1. Bir montaj operasyon örneği, beklenen – gerçekleşen.....                                      | 5  |
| Şekil 2.1. Çarpılma (Atma).....                                                                          | 7  |
| Şekil 2.2. İçe kapanma $\Delta\theta_i$ (Spring-in) ve geri yaylanma $\Delta\theta_b$ (Spring-back)..... | 8  |
| Şekil 2.3. Bükümlü parçalarda toplam deformasyon .....                                                   | 8  |
| Şekil 2.4. Çarpılmaya etki eden faktörler .....                                                          | 11 |
| Şekil 2.5. Büküm açısı ile içe kapanma miktarı bağıntısı .....                                           | 12 |
| Şekil 2.6. Serim yönü tanımları .....                                                                    | 14 |
| Şekil 2.7. "L" geometrili parçalarda köşe ve flanş tanımları .....                                       | 17 |
| Şekil 2.8. Tek basamaklı kür döngüsü.....                                                                | 19 |
| Şekil 2.9. Çift basamaklı kür döngüsü.....                                                               | 19 |
| Şekil 2.10. Kür döngüsü üzerinde jelleşme ve vitrifikasyon noktaları.....                                | 20 |
| Şekil 2.11. (a) Katmanların kalıp üzerine serimi (b) Otoklav içerisinde katman davranışı                 | 21 |
| Şekil 3.1. Test parça ölçüleri ( $[0]_8$ ).....                                                          | 23 |
| Şekil 3.2. İç yüzeyi üzerine serilen test parçası (büküm yarıçapı = $R_i$ ) .....                        | 28 |
| Şekil 3.3. Dış yüzeyi üzerine serilen test parçası (büküm yarıçapı = $R_d$ ).....                        | 28 |
| Şekil 4.1. P1 numaralı test parçası.....                                                                 | 31 |
| Şekil 4.2. P2 numaralı test parçası.....                                                                 | 31 |
| Şekil 4.3. P3 numaralı test parçası.....                                                                 | 32 |
| Şekil 4.4. P3 parçasının P1 ve P2 parçası ile ilişkisi .....                                             | 33 |
| Şekil 4.5. Bir kalıp üzerinde test parçaları yerleşimi.....                                              | 34 |
| Şekil 4.6. (a) T1, (b) T2, (c) T3, (d) T4 kodlu kalıpların üç boyutlu modelleri .....                    | 36 |
| Şekil 4.7. T1 numaralı takım geometrisi .....                                                            | 38 |
| Şekil 4.8. T2 numaralı takım geometrisi .....                                                            | 39 |

|                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4.9. T3 numaralı takım geometrisi .....                                                                        | 39 |
| Şekil 4.10. T4 numaralı takım geometrisi .....                                                                       | 40 |
| Şekil 4.11. Kalıp serim yönü ve kalınlığı .....                                                                      | 40 |
| Şekil 4.12. Parça kenar çizgileri ve serim yönlerinin takımlar üzerinde markalanması .....                           | 41 |
| Şekil 4.13. T1, T2, T3 ve T4 kodlu takımlar (1) .....                                                                | 42 |
| Şekil 4.14. T1, T2, T3 ve T4 kodlu takımlar (2) .....                                                                | 43 |
| Şekil 4.15. (a) P1 ve P2 kumaş açılımı (b) P3 kumaş açılımı.....                                                     | 44 |
| Şekil 4.16. P1, P2 ve P3 test parçaları üretiminde kullanılan AS4/8552 reçine emdirilmiş kumaşlar.....               | 45 |
| Şekil 4.17. Katmanların el ile serimi (1) .....                                                                      | 46 |
| Şekil 4.18. Katmanların el ile serimi (2) .....                                                                      | 47 |
| Şekil 4.19. P1, P2 ve P3 test parçalarının takım üzerindeki pozisyonları (1) .....                                   | 48 |
| Şekil 4.20. P1, P2 ve P3 test parçalarının takım üzerindeki pozisyonları (2) .....                                   | 49 |
| Şekil 4.21. T1, T2, T3 ve T4 kodlu takımlar üzerinde serim işlemleri tamamlanan P1, P2 ve P3 numaralı parçalar ..... | 50 |
| Şekil 4.22. Şematik vakum torbalaması .....                                                                          | 51 |
| Şekil 4.23. Kurlenme döngüsü sıcaklık ve basınç değerleri.....                                                       | 52 |
| Şekil 4.24. Üretilen test parçaları ve markalamaları .....                                                           | 53 |
| Şekil 4.25. FARO Quantum ölçme kolu.....                                                                             | 53 |
| Şekil 4.26. P1 numaralı test parçalarının ölçüm metodolojisi.....                                                    | 54 |
| Şekil 4.27. P2 numaralı test parçalarının ölçüm metodolojisi.....                                                    | 54 |
| Şekil 4.28. P3 numaralı test parçalarının ölçüm metodolojisi.....                                                    | 55 |
| Şekil 4.29. T1.P1.1 numaralı parça ölçüm noktaları .....                                                             | 57 |
| Şekil 4.30. T1.P1.2 numaralı parça ölçüm noktaları .....                                                             | 58 |
| Şekil 4.31. T1.P2.1 numaralı parça ölçüm noktaları .....                                                             | 59 |



|                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4.32. T1.P2.2 numaralı parça ölçüm noktaları .....                                                         | 60 |
| Şekil 4.33. T1.P3.1 numaralı parça ölçüm noktaları .....                                                         | 61 |
| Şekil 4.34. T1.P3.2 numaralı parça ölçüm noktaları .....                                                         | 62 |
| Şekil 4.35. T2.P1.1 numaralı parça ölçüm noktaları .....                                                         | 63 |
| Şekil 4.36. T2.P1.2 numaralı parça ölçüm noktaları .....                                                         | 64 |
| Şekil 4.37. T2.P2.1 numaralı parça ölçüm noktaları .....                                                         | 65 |
| Şekil 4.38. T2.P2.2 numaralı parça ölçüm noktaları .....                                                         | 66 |
| Şekil 4.39. T2.P3.1 numaralı parça ölçüm noktaları .....                                                         | 67 |
| Şekil 4.40. T2.P3.2 numaralı parça ölçüm noktaları .....                                                         | 68 |
| Şekil 4.41. T3.P1.1 numaralı parça ölçüm noktaları .....                                                         | 69 |
| Şekil 4.42. T3.P1.2 numaralı parça ölçüm noktaları .....                                                         | 70 |
| Şekil 4.43. T3.P2.1 numaralı parça ölçüm noktaları .....                                                         | 71 |
| Şekil 4.44. T3.P2.2 numaralı parça ölçüm noktaları .....                                                         | 72 |
| Şekil 4.45. T3.P3.1 numaralı parça ölçüm noktaları .....                                                         | 73 |
| Şekil 4.46. T3.P3.2 numaralı parça ölçüm noktaları .....                                                         | 74 |
| Şekil 4.47. T4.P1.1 numaralı parça ölçüm noktaları .....                                                         | 75 |
| Şekil 4.48. T4.P1.2 numaralı parça ölçüm noktaları .....                                                         | 76 |
| Şekil 4.49. T4.P2.1 numaralı parça ölçüm noktaları .....                                                         | 77 |
| Şekil 4.50. T4.P2.2 numaralı parça ölçüm noktaları .....                                                         | 78 |
| Şekil 4.51. T4.P3.1 numaralı parça ölçüm noktaları .....                                                         | 79 |
| Şekil 4.52. T4.P3.2 numaralı parça ölçüm noktaları .....                                                         | 80 |
| Şekil 5.1. Takım bazlı P1 parça deformasyonları.....                                                             | 83 |
| Şekil 5.2. Takım bazlı P2 parça deformasyonları.....                                                             | 83 |
| Şekil 5.3. Dış faktörler kaynaklı $\Delta\theta_{P1}$ (°) ile takım malzemesi $\alpha_{CTE}$ karşılaştırma ..... | 85 |

|                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 5.4. Dış faktörler kaynaklı $\Delta\theta_{P2}$ (°) ile takım malzemesi $\alpha_{CTE}$ karşılaştırma ..... | 86 |
| Şekil 5.5. Takım bazlı erkek-dişi takım karşılaştırması .....                                                    | 88 |
| Şekil 5.6. Takım bazlı P3 parça deformasyonu .....                                                               | 89 |
| Şekil 5.7. "L" ve "Z" geometrili parçalar üzerindeki açısal deformasyon değerleri<br>karşılaştırması.....        | 90 |
| Şekil 6.1. Temel deformasyon türleri .....                                                                       | 91 |

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

|                       |                                                                             |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| g                     | gram                                                                        |
| cc                    | santimetre küp / cubic centimeter                                           |
| GPa                   | Giga pascal                                                                 |
| PH                    | Fenolik                                                                     |
| E                     | Epoxy                                                                       |
| CE                    | Siyanat Ester                                                               |
| BMI                   | Bismaleimide                                                                |
| PI                    | Poliamid                                                                    |
| PC                    | Polikarbonat                                                                |
| PPS                   | Polifenilen Sülfid                                                          |
| PEI                   | Polietherimid                                                               |
| PEEK                  | Polietereterketon                                                           |
| $\Delta x$            | Düzlemsellikten sapma miktarı                                               |
| $\theta$              | Bükümlü parça üzerindeki teorik büküm açısı                                 |
| $\Delta\theta$        | Gerçekleşen ile teorik büküm açısı farkı, Deformasyon açısal değeri         |
| $\Delta\theta_i$      | İçe kapanma deformasyon açısal değeri                                       |
| $\Delta\theta_b$      | Geri yaylanma deformasyon açısal değeri                                     |
| $\Delta\theta_1$      | Deformasyon içe kapanma bileşeni                                            |
| $\Delta\theta_2$      | Deformasyon çarpılma bileşeni                                               |
| $\delta_1$            | Flanş üzerinde gerçekleşen maksimum yer değiştirme miktarı                  |
| $\delta_2$            | Flanş üzerinde gerçekleşen minimum yer değiştirme miktarı                   |
| $w_{max}$             | Maksimum çarpılma                                                           |
| $\tau_{net}$          | Net kesme gerilimi                                                          |
| L                     | Parça simetri ekseninden parça sonuna olan uzaklık                          |
| E                     | Parça Young modülü                                                          |
| t                     | Parça toplam kalınlığı                                                      |
| $\tau_{net}$          | Net kesme gerilimi                                                          |
| $\tau_{kalıp yüzeyi}$ | Kalıp yüzeyi ile ilk katman arasındaki kesme gerilimi                       |
| $\tau_{arayüz}$       | Katmanlar arasındaki kesme gerilimi                                         |
| P                     | Kürlenme sırasında parça üzerine etkiyen basınç                             |
| $\Delta\theta_{CTE}$  | İçe kapanma açısının ısıl bileşeni (Coefficient of thermal expansion (CTE)) |
| $\Delta\theta_{CS}$   | İçe kapanma açısı kürlenme daralması (Cure shrinkage (CS))                  |
| $\alpha_l$            | Isıl genleşme katsayısı uzunluk bileşeni (Longitudinal CTE)                 |
| $\alpha_t$            | Isıl genleşme katsayısı kalınlık bileşeni (Through thickness CTE)           |
| $\Delta T$            | Kür sıcaklığı ve ortam sıcaklığı farkı                                      |
| $\beta_l$             | Kürlenme daralması uzunluk bileşeni (Longitudinal CS)                       |
| $\beta_t$             | Kürlenme daralması kalınlık bileşeni (Through thickness CS)                 |
| $\Delta\theta_{etk}$  | Etkin içe kapanma açısı                                                     |
| $\Delta\theta_{max}$  | Serim yönüne göre oluşabilecek en yüksek içe kapanma açısı                  |
| $\psi$                | Serim yönünün derece cinsinden açısal değeri                                |
| $\epsilon_R$          | Kalınlık doğrultusundaki mekanik olmayan gerinim                            |
| R                     | Takım ile parçanın temas ettiği yüzeydeki büküm yarı çapı                   |
| $R_i$                 | Parça açısal büküm kısmındaki iç yarıçap değeri                             |
| $R_d$                 | Parça açısal büküm kısmındaki dış yarıçap değeri                            |
| a                     | Deformasyon kalınlık sabiti                                                 |

|                                 |                                                                  |
|---------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| $\alpha_\theta$                 | Isıl genleşme katsayısı yüzey bileşeni (silindirik koordinat)    |
| $\alpha_R$                      | Isıl genleşme katsayısı kalınlık bileşeni (silindirik koordinat) |
| $\beta_\theta$                  | Kürlenme daralması yüzey bileşeni (silindirik koordinat)         |
| $\beta_R$                       | Kürlenme daralması kalınlık bileşeni (silindirik koordinat)      |
| $G_{\theta R}$                  | Katmanlar arası kesme modülü                                     |
| $E_\theta$                      | Elastik modül                                                    |
| $\varepsilon_Z$                 | Çevresel doğrultudaki mekanik olmayan gerinim                    |
| $\nu_{ZR}$                      | Poisson's oranı                                                  |
| $l$                             | Tek bükümlü parçalardaki flanş uzunluğu                          |
| $w$                             | Tek bükümlü parçalardaki flanş genişliği                         |
| $C$                             | Büküm yarıçapı, büküm açısı ve kalınlık içeren katsayı           |
| $\mu\varepsilon/^\circ\text{C}$ | Santigrat derece başına mikro gerilim                            |
| UD                              | Tek yönlü (Unidirectional)                                       |
| $\alpha_{CTE}$                  | Takım malzemesi lineer ısı genleşme katsayısı                    |
| $\Delta\theta_{iç}$             | İç faktörler kaynaklı deformasyon açısal değeri                  |
| $\Delta\theta_{dış}$            | Dış faktörler kaynaklı deformasyon açısal değeri                 |

# 1. GİRİŞ

Günümüzde başta savunma sanayi olmak üzere ulaşım, enerji, sağlık gibi endüstri kollarında artan rekabetçi gereksinimlere karşılık verebilmek için geleneksel mühendislik çözümlerine ek, yeni metotlar ve uygulamalar ihtiyacı bulunmaktadır. Farklı tasarım çözümlerinin gerçekleştirilebilmesini mümkün hale getiren en önemli faktörlerden biri ise konvansiyonel mühendislik malzemeleri dışında daha üstün özelliklere sahip malzemelerdir. Bu durum yüksek performanslı yeni malzemelere duyulan gereksinimi gün geçtikçe artırmaktadır. Kökleri çok daha eskiye dayansa da 1940'lı yılların başında bir mühendislik malzemesi olarak ele alınmaya başlayan kompozit malzemeler, yıllar içindeki gelişimleri ile günümüzde mühendislik çözümlerinin ana bileşenlerinden biri olmuştur [1].

Kompozit malzemeler temel olarak, birden fazla malzemenin, kendi başlarına sahip oldukları özelliklerden daha iyi sonuçlar elde edilmesi için makroskobik ölçekte bir araya gelmesi olarak tanımlanmaktadır [2].

Mekanik özellikler bakımından kompozit malzemelerin sergiledikleri yüksek mukavemet-yoğunluk ve elastik deformasyon direnci-yoğunluk oranları, görece düşük ağırlıklarda yüksek mukavemet ve dayanım değerleri sağlamaktadır. Bununla birlikte kompozit malzemelerin yorulma dirençlerinin yüksek oluşu, aşınma ve korozyona karşı dirençleri, çevresel etmenlerden minimum seviyede etkilenmeleri, zorlu çevresel koşullarda kullanılmalarına olanak tanımaktadır. Aynı zamanda ısı ve akustik yalıtım özellikleri de mühendislik uygulamalarında kompozit malzemelerin tercih edilmesini sağlamıştır.

Kompozit malzemelerin yukarıda sayılan özellikleri, havacılık ve uzay alanındaki yüksek performanslı malzeme ihtiyacına bir çözüm sunarak, yeni tasarımların oluşmasının önünü açmıştır.

Kompozit malzemelerin havacılık alanında kullanılmaya başlaması 1970'li yıllarda başlamıştır. İlk kullanımları, havacılık otoritesinin ağır regülasyonları nedeniyle sınırlı olmuş, ikincil öncelikli ve kozmetik parçalar olarak değerlendirilmiştir. İlerleyen süreçte ise malzeme özelliklerinin hesaplanmasındaki hassasiyetin artması, kullanım amacına göre malzeme özelliklerine yön verilebilmesini sağlamış ve uçuş kritik parçalarda kullanılmasını sağlamıştır. Son 10 yıllık periyotta önde gelen havacılık firmaları yolcu uçaklarında kullanılan kompozit parça sayılarının, toplam parça sayısına oranı %50'nin üzerine çıkmıştır [3]. İnsansız hava araçlarında bu oran %90'nın üzerinde bulunmaktadır [4].

Hava araçlarının sabit kanatlı veya döner kanatlı olmasından bağımsız olarak, sektörün en temel amaçlarından olan, hava aracı ağırlığının azaltılarak, faydalı yük miktarının artırılması uygulamalarında kompozit malzeme kullanımı en önemli tasarım çözümleri arasında yer almaktadır.

### 1.1. Havacılık Sektöründe Kullanılan Kompozit Malzeme Sınıfları

Kompozit malzemeler temel olarak güçlendirici yapılar (takviye elemanı veya fiber) ve bu yapıların içinde barınmasına olanak tanıyan matrislerin (reçine) bir araya gelmesi ile oluşur. Kompozit yapılar bu iki bileşene göre sınıflandırılır.

Havacılık sanayinde sıklıkla kullanılan güçlendirici yapı malzemeleri ve genel mekanik özellikleri Tablo 1.1’de belirtilmiştir.

**Tablo 1.1.** Fiber malzemeleri ve mekanik özellikleri [3] [5]

| Fiber  |            | Yoğunluk<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | Elastisite Modülü<br>(GPa) | Çekme Dayanımı<br>(GPa) |
|--------|------------|----------------------------------|----------------------------|-------------------------|
| Cam    | E-Cam      | 2.55                             | 65-75                      | 2.2-2.6                 |
|        | S-Cam      | 2.47                             | 85-95                      | 4.4-4.8                 |
| Aramid | Düşük      | 1.44                             | 80-85                      | 2.7-2.8                 |
|        | Orta       | 1.44                             | 120-128                    | 2.7-2.8                 |
|        | Yüksek     | 1.48                             | 160-170                    | 2.3-2.4                 |
| Karbon | Düşük      | 1.77-1.80                        | 220-240                    | 3.0-3.5                 |
|        | Orta       | 1.77-1.81                        | 270-300                    | 5.4-5.7                 |
|        | Yüksek     | 1.77-1.80                        | 390-450                    | 2.8-4.5                 |
|        | Çok Yüksek | 1.80-1.82                        | 290-310                    | 7.0-7.5                 |

Fiber yapıları barındıran polimer matrisleri ise genel olarak termoset matrisler ve termoplastik matrisler olarak iki kategoride sınıflandırılmaktadır. Temel farkları, termoset matrisli yapıların sıcaklık ve basınç altında kürlenmesinden sonra bu prosesin geri döndürülememesi ve yapıya tekrar şekil verilememesi söz konusuysa, termoplastik matrisli yapılarda süreç, ısı uygulamaları ile geri döndürülebilmektedir. Havacılık uygulamalarında sıklıkla kullanılan matris yapılar ise Tablo 1.2’de belirtilmiştir [5].

Termoset matrisler yüksek mukavemet değerlerine ve elastik deformasyon modülüne sahiptir. Yorulma dirençleri, sıcaklık ve korozyon dayanımları yüksektir. Termoplastik matrisler ise hasara karşı yüksek tolerans göstermekte, geri dönüşüm ve uzun raf ömrü açısından öne çıkmaktadır [5].

**Tablo 1.2.** Matris malzemeleri ve mekanik özellikleri [3] [5]

|              | <b>Matris</b>               | <b>Yoğunluk<br/>(g/cm<sup>3</sup>)</b> | <b>Elastisite<br/>Modülü (GPa)</b> | <b>Çekme<br/>Dayanımı<br/>(GPa)</b> |
|--------------|-----------------------------|----------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| Termoset     | Fenolik (PH)                | 1.1-1.2                                | 3.8                                | 0.048                               |
|              | Epoxy (E)                   | 1.2-1.3                                | 2.3                                | 0.067                               |
|              | Siyanat Ester (CE)          | 1.0-2.0                                | 2.8                                | 0.069                               |
|              | Bismaleimide (BMI)          | 1.2-1.3                                | 26.9                               | 0.072                               |
|              | Poliamid (PI)               | 1.3-1.5                                | 3.4                                | 0.114                               |
| Termoplastik | Polikarbonat (PC)           | 1.2                                    | 2.3                                | 0.065                               |
|              | Polifenilen Sülfid (PPS)    | 1.3-1.8                                | 3.4                                | 0.093                               |
|              | Polietherimid (PEI)         | 1.3                                    | 5.5                                | 0.041                               |
|              | Polietereterketon<br>(PEEK) | 1.3                                    | 13.8                               | 0.159                               |
|              |                             |                                        |                                    |                                     |

Günümüz havacılık sanayinde tasarım çözümleri için ihtiyaç duyulan yüksek performanslı malzeme ihtiyaçları, yukarıda belirtilen fiber ve matris yapıların kombinasyonu ile oluşturulan kompozit malzemelerin kullanımları ile karşılanmaktadır. Kompozit hava aracı yapılarında yüksek mukavemet özellikleri nedeniyle fiber olarak karbon tercih edilirken, matris yapılarda, termoplastik kullanımı artış gösterse dahi, halen termoset matrislerin kullanım oranları termoplastik matrise göre daha yüksektir [5].

## 1.2. Motivasyon

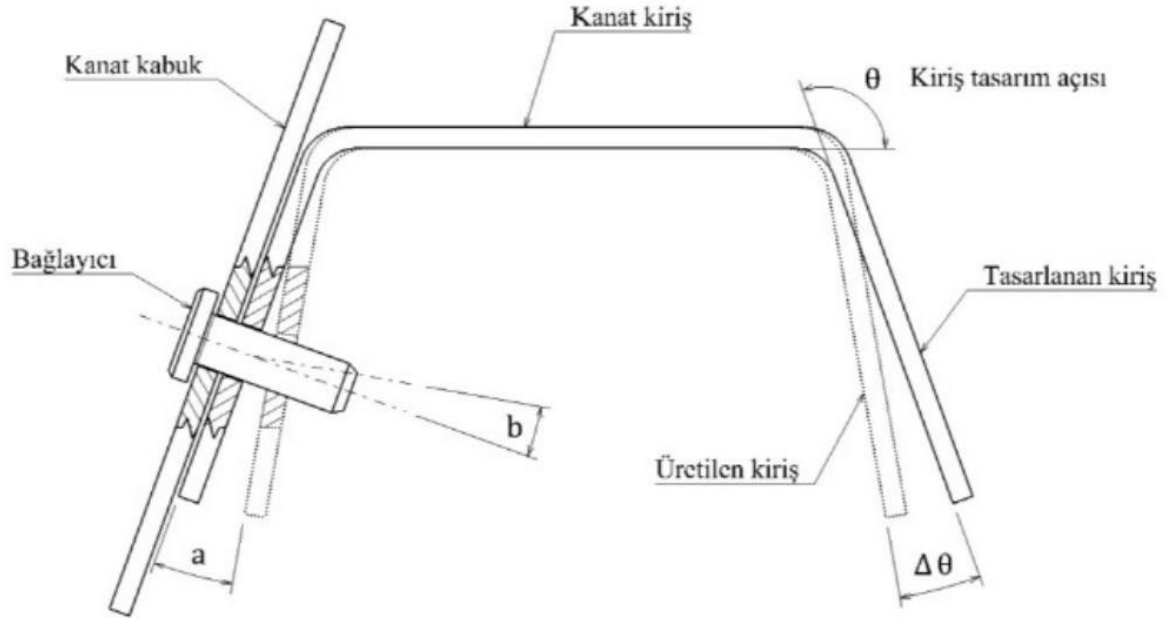
Karbon fiber ile güçlendirilmiş termoset kompozit malzemeler hava platformları yapısal parçalarında mukavemet-ağırlık oranı ve yorulma dayanımı nedeniyle sıklıkla tercih edilmektedir [4]. Bu yapısal parçalar hava platformu içinde gövde ve kanat ana bileşenleri olan ve temel uçuş yüklerini taşıyan kaburgalar ve kirişler gibi omurgayı oluşturan yapılar ve kabuklar olabildiği gibi, motor ve erişim kapakları ile paneller gibi ikincil yapılar da olabilmektedir.

Tüm bu farklı parça sınıflarındaki kullanım ihtiyaçları, karbon fiber ile güçlendirilmiş termoset kompozit parçaların farklı geometrik şekillerde tasarlanmasını gerektirmektedir. Uçuş dinamikleri için ihtiyaç duyulan dış yüzey geometrileri, aerodinamik gereksinimler ile şekillenmekte, hava aracı yapısal parçaları ise asgari parça ağırlıkları ile azami dayanım sağlanması amacıyla tasarlanmakta ve geometrileri oluşmaktadır.

Farklı geometrilere sahip termoset kompozit yapısal elemanların yukarıda belirtilen malzeme avantajlarının ürüne yansıtılabilmesi ancak tasarım ve analiz süreçlerindeki mühendislik hesaplarının imal edilen parça ile tutarlı olması ve üretim sonucunda elde edilen parça ile tasarım geometrisinin birbirine en yakın şekilde gerçekleşmesi ile mümkündür. Bu durum tasarım ve üretim süreçlerin doğru analiz edilerek planlanmasını gerektirmektedir. Özellikle hava araçları yapısal parçalarında ihtiyaç duyulan boyutsal hassasiyet ve hassas ölçü toleranslarının sağlanabilmesi, kompleks tasarım ve üretim süreçlerinin doğru kurgulanabilmesi ve tüm süreç parametrelerinin kontrol altında tutulması, bu parametrelerin etkilerinin öngörülerek gerekli mühendislik çözümlerinin tasarım aşamasında uygulanması ile mümkün olmaktadır.

Üretim süreçleri sonucu elde edilen geometrinin beklenene uyumu, özellikle yüksek hassasiyet gerektiren montaj operasyonları için kritiktir. Şekil 1.1 havacılık sanayinde sıklıkla karşılaşılan örnek bir montaj operasyonunu göstermektedir. Kanat kabuğu ve kirişi montaj aşamasını gösteren bu örnekte, kirişin tasarım geometrisi ile üretilen kiriş geometrisi arasındaki farklar “a” ve “b” olarak belirtilen alanlarda beklenenden farklı gerçekleşmektedir.





**Şekil 1.1.** Bir montaj operasyon örneği, beklenen – gerçekleşen

Beklenen geometriden sapmaların artması aşağıdaki muhtemel sonuçları doğurmaktadır;

- Montaj operasyonun gerçekleştirilememesi sonucunda üretilen parçanın hurdaya ayrılması.
- Montaj operasyonu sırasında geçme toleranslarının sağlanamaması nedeniyle ek kuvvet / ön gerilme uygulanarak montajının yapılabilmesi sonucu beklenmeyen ve hesaplanmayan artık gerilmelerin ürün içinde oluşması ve uçuş güvenliğini tehdit etmesi.
- Montaj sırasında bir araya gelen karşı parçalar arasında hesaplanan değerlerden daha fazla boşluk oluşması sonucunda ortaya çıkan dolgu ihtiyacı (shimming), buna bağlı olarak ürün ağırlığında beklenen değer üzerinde artma, yorulma direncinde düşüş ve sızdırmazlık gereken bölgelerde hatalar.

### 1.3. Amaç

Bu tezin amacı, hava platformlarında kullanılan karbon fiber takviyeli termoset kompozit yapısal elemanların üretim süreçlerinde meydana gelen süreç bazlı deformasyonların önceden tayini, değerlendirilmesi ve çözümü için bir metot ortaya koymaktır.

#### **1.4. Hedef**

Termoset kompozit yapısal elemanların üretim süreçlerinde karşılaşılan deformasyonların sınıflandırılması ve bu sınıflandırmaya bağlı olarak dış etmenlerden takım-geometri etkisinin karşılaştırmalı olarak deneysel incelenmesi hedeflenmiştir.

## 2. LİTERATÜR TARAMASI

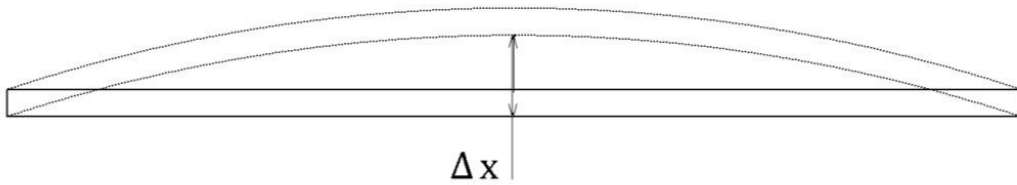
Termoset kompozit malzemeler, parça geometrisinin elde edilebilmesi için tasarlanan bir kalıp üzerinde, belirlenen basınç ve sıcaklık altında yeterli süre tutulması ile üretilirler. Basınç, sıcaklık ve zaman değişkenleri, kompozit malzeme içerisinde kullanılan matris malzemeye, malzemenin hacimsel fiber/matris oranına göre belirlenir. Basınç ve sıcaklık altında geçen bu süre kürlenme olarak tanımlanır [2].

Termoset kompozit malzemelerin kürlenmesi sırasında parçalar içinde artık gerilmeler oluşur ve birikir. Kürleme işlemi sonrasında ise parça üzerindeki basıncın kaldırılması ve sıcaklığın düşürülmesi ile bu artık gerilmenin bir kısmı kalıptan çıkarılan parçada beklenen geometriden sapma olarak ortaya çıkar. Bu nedenle üretilen parçanın oda sıcaklığındaki son hali ile ideal geometrisi arasında farklar oluşur. Bu geometrik fark, süreç kaynaklı deformasyon veya kürlenme deformasyonu olarak adlandırılır [6].

Termoset kompozit yapıların tasarımlarından başlayarak son ürünün elde edilmesine kadar geçen süreçte ortaya çıkan en önemli problemlerden biri boyutsal kararlılığın sağlanabilmesidir [7] [8].

Kürlenme deformasyonları düz ve düze yakın geometriye sahip parçalarda düzlemsellikten sapma diğer bir değişle atma veya çarpılma (warpage) (

Şekil 2.1) olarak tanımlanır [9].



Şekil 2.1. Çarpılma (Atma)

Açısal özellikler barındıran parçalarda ise beklenen açı değerlerinden sapma, elde edilen parça üzerindeki açı değerinin tasarım halindeki dar açıdan küçük olması durumunda içe kapanma (spring-in), büyük olması durumunda ise dışa açılma veya diğer bir deyişle geri yaylanma (spring-back) olarak tanımlanır (Şekil 2.2) [10].

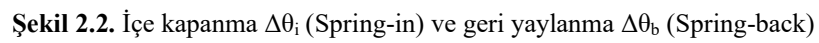


Diagram illustrating the geometry of a curved beam with a rectangular cross-section. The cross-section has width  $l$  and height  $\delta_1$ . The beam has a radius of curvature  $R$ . The angle of rotation is  $\theta$ . The diagram shows the beam's profile and the cross-section's dimensions.

**Şekil 2.3.** Bükümlü parçalarda toplam deformasyon

$$\Delta\theta = \Delta\theta_1 + \Delta\theta_2 = \frac{\delta_1 - \delta_2}{l} \quad (2.1)$$

$\Delta\theta$ : Deformasyon açısal değeri

- $\Delta\theta_1$ : Deformasyon içe kapanma bileşeni  
 $\Delta\theta_2$ : Deformasyon çarpılma bileşeni  
 $\delta_1$ : Flanş üzerinde gerçekleşen maksimum yer değiştirme miktarı  
 $\delta_2$ : Flanş üzerinde gerçekleşen minimum yer değiştirme miktarı  
 $l$ : Flanş uzunluğu

Bu deformasyonların temel nedeni kompozit malzemelerin anizotropik özellikler göstermesi ile ilintilidir. Kompozit malzemeyi oluşturan matris yapı malzemesi (reçine) ile güçlendirici yapı malzemesi (fiber) arasında bulunan ısı genleşme katsayısı farkı deformasyonların temel sebebidir. [9].

Deformasyonların ana bileşeni her ne kadar temelde bu ısı genleşme katsayısı farkına dayansa da tasarım başlangıcından son ürünün elde edilmesine kadar geçen süreçte farklı pek çok faktörün deformasyona etkisi olmaktadır. Bu faktörlerin temel olarak iç ve dış faktörler olarak iki ana başlık altında toplanması Albert ve Fernlund [11] tarafından gerçekleştirilmiştir.

Genellikle iç ve dış faktörler birlikte etki ederek toplam deformasyonu oluştururlar. Fakat parça geometrisine bağlı olarak iki deformasyon türünden biri toplam deformasyonda baskın olarak görülür [12].

## **2.1. Süreç Kaynaklı Deformasyona Etki Eden İç Faktörler**

Süreç kaynaklı deformasyonlara etkisi bulunan iç faktörler genel olarak parça ihtiyacını oluşturan temel gereksinimlere bulunan tasarım çözümleri olarak tanımlanabilir. Parça kullanım alanına göre belirlenen geometri ile dayanım gereksinimlerine göre belirlenen matris ve fiber malzeme çeşitleri ve matris-fiber oranı, katman sayıları ve serim yönleri en önemli iç faktörlerdir.

### **2.1.1. Geometri**

Kullanılması planlanan alanlara göre geometrisi belirlenen kompozit parçalar, düz plakalar gibi basit geometrilerde olabildiği gibi, tek bükümlü (ör: “L” şekle sahip) veya birden çok bükümlü (ör: “C” şekle sahip) olabilmektedir. Literatürde yapılan çalışmalarda incelenen parça geometrileri Lian ve arkadaşları [13] tarafından aşağıdaki gibi derlenmiştir;

- Düz ve düze yakın geometriler.

- Silindir veya yuvarlak, kare profiller.
- “L”, “V”, “U”, “T”, “Z” gibi tek veya çok büküm geometriler.
- Karmaşık geometriler.

Havacılık endüstrisi kapsamında ihtiyaç duyulan yapısal parça geometrilerinden ilki düzlemsel ve düzlemsele yakın parçalardır. Bu geometriler çoğunlukla yapısal paneller ve kabuk tasarımlarında ortaya çıkmaktadır.

Yukarıda tanımlandığı gibi düz ve düze yakın parçalarda süreç bazlı deformasyonu belirleyen ana faktör çarpılma değildir. Bu durum Twigg, Poursartip ve Fernlund [14] tarafından analitik olarak eşitlik (2.2)’de tanımlanmıştır.

$$w_{max} = \frac{2 \cdot \tau_{net} \cdot L^3}{E \cdot t^2} \quad (2.2)$$

$w_{max}$ : Maksimum çarpılma

$\tau_{net}$ : Net kesme gerilimi (Eşitlik (2.3))

L: Parça simetri ekseninden parça sonuna olan uzaklık

E: Parça Young modülü

t: Parça toplam kalınlığı

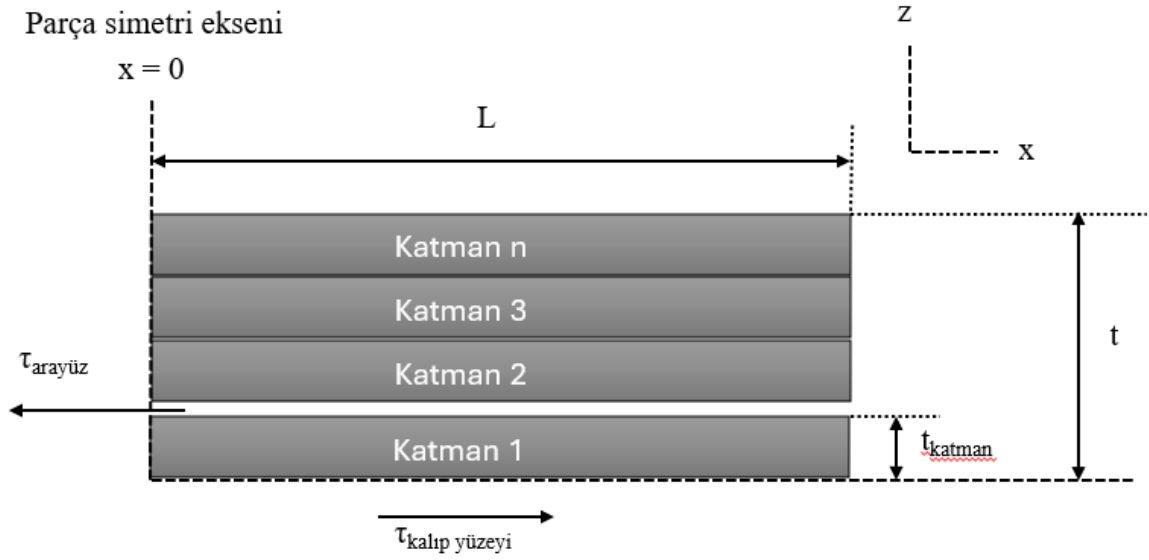
$$\tau_{net} = \tau_{kalıp yüzeyi} - \tau_{arayüz} \quad (2.3)$$

$\tau_{net}$ : Net kesme gerilimi

$\tau_{kalıp yüzeyi}$ : Kalıp yüzeyi ile ilk katman arasındaki kesme gerilimi

$\tau_{arayüz}$ : Katmanlar arasındaki kesme gerilimi

Eşitlik (2.2)’de ve Şekil 2.4’de görüldüğü gibi düz ve düze yakın parçalarda, parça boyutları arttıkça çarpılma baskın deformasyon haline gelmektedir [15].



Şekil 2.4. Çarpılmaya etki eden faktörler

Aynı çalışma kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda maksimum çarpılma değerinin orantılı olduğu değişkenler eşitlik (2.4)’te tanımlamaktadır.

$$w_{max} \propto \frac{P^{0.2} \cdot L^3}{t^2} \quad (2.4)$$

$w_{max}$ : Maksimum çarpılma

P: Kurlenme sırasında parça üzerine etkiyen basınç

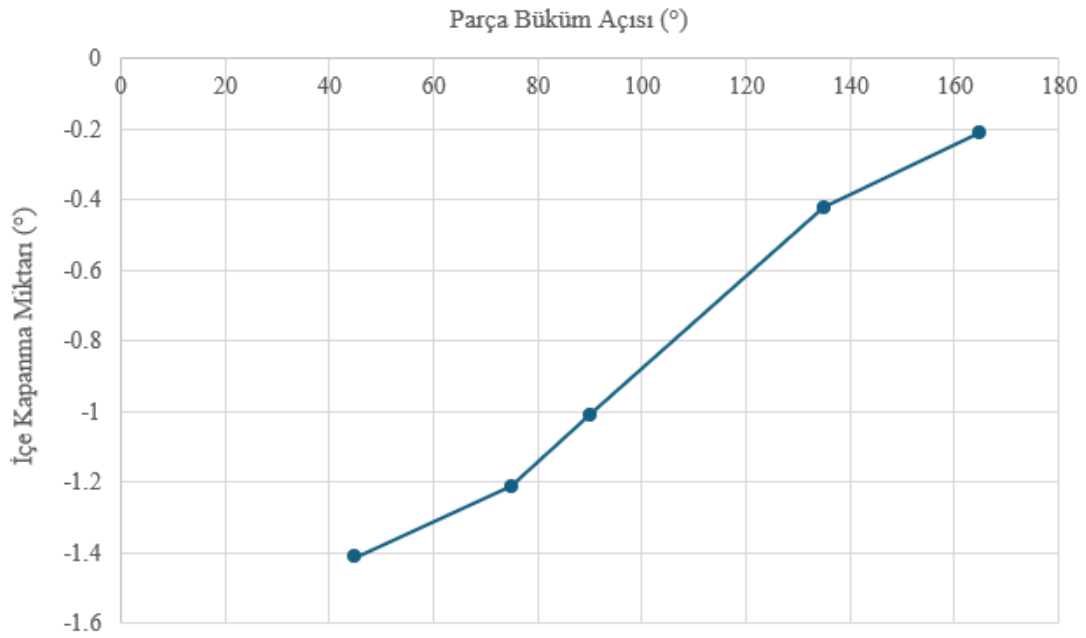
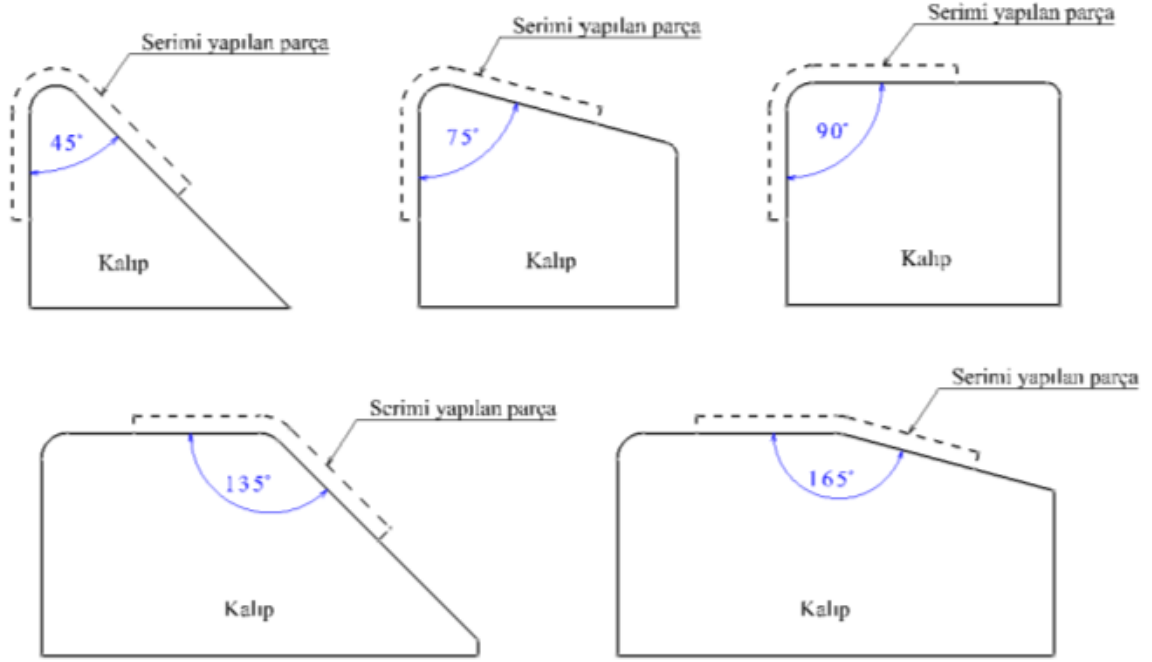
L: Parça simetri ekseninden parça sonuna olan uzaklık

t: Parça toplam kalınlığı

Twigg, Poursartip ve Fernlund [14] çalışması, çarpılmanın büyük oranda iç faktörler (parça uzunluğu ve kalınlığı) tarafından belirlendiğini göstermektedir. Burada sınırlı etkisi bulunan tek dış faktör basınç olarak ortaya çıkmaktadır.

“L” ve “C” şekle sahip geometriler ise havacılık endüstrisi kapsamında kiriş ve diğer güçlendirici elemanlar olarak sıklıkla kullanılmaktadır [16]. Burada parça üzerinde bulunan büküm açısı içe kapanma değerinde doğrudan etkilidir [17].

Huang ve Yang [17] tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada parça üzerinde bulunan büküm açıları düze yaklaştıkça içe kapanma açısının azaldığı görülmektedir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Büküm açısı ile içe kapanma miktarı bağıntısı [17]

### 2.1.2. Malzeme özellikleri

Bükümlü parçalarda malzeme seçimine bağlı olan deformasyon faktörleri, Radford ve Rennick [18] tarafından termoelastik bileşen ve termoelastik olmayan (kimyasal) bileşen olarak iki ana grupta toplanmıştır. Benzer sınıflama daha sonra Albert ve Fernlund [11]



tarafından ısı genleşme anizotropi bileşeni ve rezin kurlenme daralma (büzülme) bileşeni olarak tanımlanmıştır ve açısal bir parçada toplam içe kapanma miktarı eşitlik (2.5)'teki gibi tanımlanmıştır.

$$\Delta\theta = \Delta\theta_{CTE} + \Delta\theta_{CS} \quad (2.5)$$

$\Delta\theta$ : İçe kapanma açısı

$\Delta\theta_{CTE}$ : İçe kapanma açısının ısı bileşeni (termoelastik bileşen) Eşitlik (2.6)

$\Delta\theta_{CS}$ : İçe kapanma açısı kurlenme daralması (termoelastik olmayan bileşen) Eşitlik (2.7)

$$\Delta\theta_{CTE} = \theta \left( \frac{(\alpha_l - \alpha_t)\Delta T}{1 + \alpha_t \Delta T} \right) \quad (2.6)$$

$\theta$ : Parça açısı

$\alpha_l$ : Isı genleşme katsayısı uzunluk bileşeni (Longitudunal (in-plane) CTE)

$\alpha_t$ : Isı genleşme katsayısı kalınlık bileşeni (Through thickness CTE)

$\Delta T$ : Kür sıcaklığı ve ortam sıcaklığı farkı

$$\Delta\theta_{CS} = \theta \left( \frac{\beta_l - \beta_t}{1 + \beta_t} \right) \quad (2.7)$$

$\theta$ : Parça açısı

$\beta_l$ : Kurlenme daralması uzunluk bileşeni (Longitudunal CS)

$\beta_t$ : Kurlenme daralması kalınlık bileşeni (Through thickness CS)

Eşitlik (2.5), (2.6) ve (2.7) malzeme etkilerinin süreç kaynaklı deformasyona etkisini analitik olarak hesaplamaya olanak tanımaktadır. Bazı çalışmalarda eşitlik (2.5), kurlenme prosesindeki veya matris sertleşmesi sırasındaki nem kaybının da hesaba katılması ile genişletilmiştir [10] [19]. Nem etkisi bu denklemde ısı ve kurlenme daralması bileşenleri yanında ihmal edilebilecek seviyede etkisi olduğu için literatürde çoğunlukla ihmal edilmektedir.

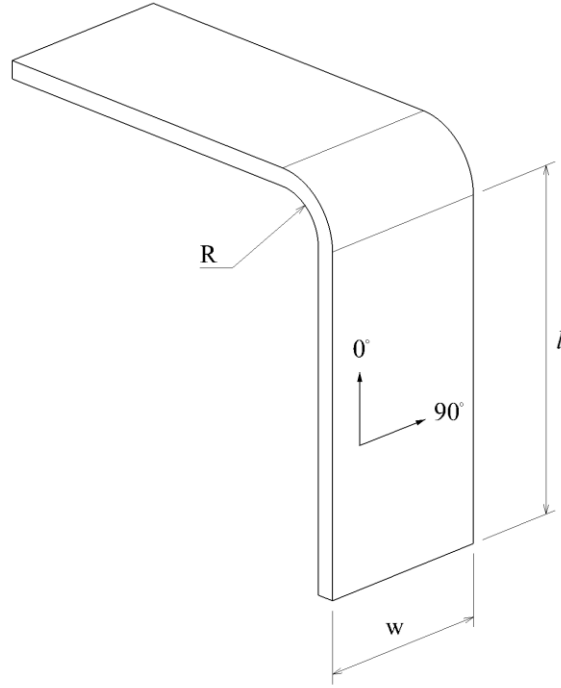
Eşitlik (2.6) ve (2.7) içinde bulunan  $\alpha_t \Delta T$  ve  $\beta_t$  bileşenleri 1 ile toplandığında paydada önemli bir etki yapmadığı için eşitlik (2.5) Wisnom ve arkadaşları [20] tarafından sadeleştirilmiştir ve eşitlik (2.8) elde edilmiştir.

$$\frac{\Delta\theta}{\theta} = (\alpha_l - \alpha_t)\Delta T + (\beta_l - \beta_t) \quad (2.8)$$

### 2.1.3. Serim yönü

Kompozit parçalarda gerekli mekanik özelliklerin elde edilebilmesi için her bir katmanın serim yönü, mukavemet ve yorulma ihtiyaçları doğrultusunda belirlenmektedir.

Literatürde yapılan çalışmalarda serim yönlerinin tanımlanmasında Şekil 2.6.'da gösterildiği şekilde 0° yönü, takım uzunluk eksenine dik eksen olarak tanımlanmak üzere genellikle 0°, 90°, +45°, -45°, +30°, -30°, +60° ve -60° yönlerinin farklı kombinasyonları ihtiyaca göre belirlenmektedir.



Şekil 2.6. Serim yönü tanımları

Katmanların farklı serim yönlerinde açılal deformasyona etkileri konusunda pek çok değerli çalışmalar gerçekleştirilmiş, bu çalışmaların ortak sonuçlarında deformasyona en çok etkinin, fiberlerin serim esnasında profilin çevresel olarak hizalandığı durumda, diğer bir deyişle fiberlerin Şekil 2.6.'da belirtilen 0° eksenine paralel olduğu durumda, gerçekleştiği belirtilmiştir. Fiberlerin bükülmeye uğramadığı durum olan 90° serim yönünde yerleştirilen

katmanların içe kapanma deformasyonuna etkisi ihmal edilebilecek derecede az görülmüştür. Bu durum katmanların serim yönleri etkilerinin sinüs eğrisine benzer bir davranış göstermesi üzerine eşitlik (2.9)'da belirtildiği gibi formüle edilmiştir [12].

$$\Delta\theta_{etk} = 0.5 \cdot \Delta\theta_{max} \cdot (\cos 2\psi + 1) \quad (2.9)$$

$\Delta\theta_{etk}$ : Etkin içe kapanma açısı

$\Delta\theta_{max}$ : Tüm katmanların  $0^\circ$  yönünde serildiği ( $[0]_i$ ) konfigürasyondaki içe kapanma açısı

$\psi$ : Serim yönünün derece cinsinden açısal değeri

#### 2.1.4. Katman sayısı

Kompozit parçalarda ihtiyaç duyulan mukavemet değerlerinin sağlanması için serim yönleri ile katman sayıları, dolayısıyla parça kalınlıkları çeşitlilik göstermektedir.

Literatürde süreç deformasyonları kompozit parça tasarımlarında yoğunlukla tercih edilen katman sayıları ve teorik kalınlık karşılıkları (prepreg malzemenin cinsine göre değişmekle birlikte) yaklaşık olarak Tablo 2.1'de belirtilmiştir [12] [21].

**Tablo 2.1.** Katman sayıları ve kalınlık karşılıkları

| Katman Sayıları | Toplam Kalınlık [mm] |
|-----------------|----------------------|
| 4               | 0.8                  |
| 8               | 1.6                  |
| 16              | 3.2                  |
| 24              | 4.8                  |
| 32              | 6.4                  |
| 48              | 9.6                  |
| 64              | 12.8                 |
| 96              | 19.2                 |

Yapılan çalışmalar parça kalınlıklarının geometrik deformasyonlara, özellikle de bükümlü parçalarda görülen içe kapanmaya etkisinin önemli ölçülerde olduğunu göstermiştir. Hörberg ve arkadaşları [21], gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada, aynı “L” şekle sahip, serim yönleri aynı, fakat farklı kalınlıklarda üretilen numunelerde alınan ölçüm

sonuçlarına göre 4 katmana sahip parça ile 64 katmana sahip parça arasında %64, 24 katmana sahip parça ile 64 katmana sahip parça arasında ise %32 fazla içe kapanma açısı gözlemlendiğini belirtmişlerdir.

Eşitlik (2.8) bükümlü parçalarda deformasyonun analitik olarak hesaplanmasında sadece malzeme özellikleri göz önüne alındığında doğru sonuçlar elde edilmesine rağmen, parça kalınlıkları hesaba katılmadığı için deneysel sonuçlarla fark göstermektedir. Bu fark temel olarak kurlenme gerçekleşmeden önce kompozit malzemenin düşük kesme dayanımına sahip olması ile ilgilidir ve bu eşitlik Wisnom ve arkadaşları tarafından [20] kalınlık etkisinin hesaba katılmasıyla geliştirilmiştir ve eşitlik (2.10) oluşturulmuştur.

$$\Delta\theta = -\varepsilon_R \left[ \theta - \frac{(e^{aR\theta} - e^{-aR\theta})}{Ra(e^{aR\theta} + e^{-aR\theta})} \right] + \theta[(\alpha_\theta - \alpha_R)\Delta T + (\beta_\theta - \beta_R)] \quad (2.10)$$

$\varepsilon_R$ : Kalınlık doğrultusundaki mekanik olmayan gerinim

R: Takım ile parçanın temas ettiği yüzeydeki büküm yarı çapı

a: Deformasyon kalınlık sabiti eşitlik (2.11)

$\alpha_\theta$ : Isıl genleşme katsayısı yüzey bileşeni (silindirik koordinat)

$\alpha_R$ : Isıl genleşme katsayısı kalınlık bileşeni (silindirik koordinat)

$\beta_\theta$ : Kurlenme daralması yüzey bileşeni (silindirik koordinat)

$\beta_R$ : Kurlenme daralması kalınlık bileşeni (silindirik koordinat)

$$a = \sqrt{\frac{10G_{\theta R}}{E_\theta t^2}} \quad (2.11)$$

$G_{\theta R}$ : Katmanlar arası kesme modülü

$E_\theta$ : Elastik modül

t: Parça kalınlığı

Eşitlik (2.10) içe kapanma mekanizmasında malzemenin kurlenme sırasındaki fiziksel ve kimyasal bileşenlerini içerdiği için analitik olarak aç değeri tahmin edilmesinde deney sonuçlarına daha yakın değerler vermiştir [22].

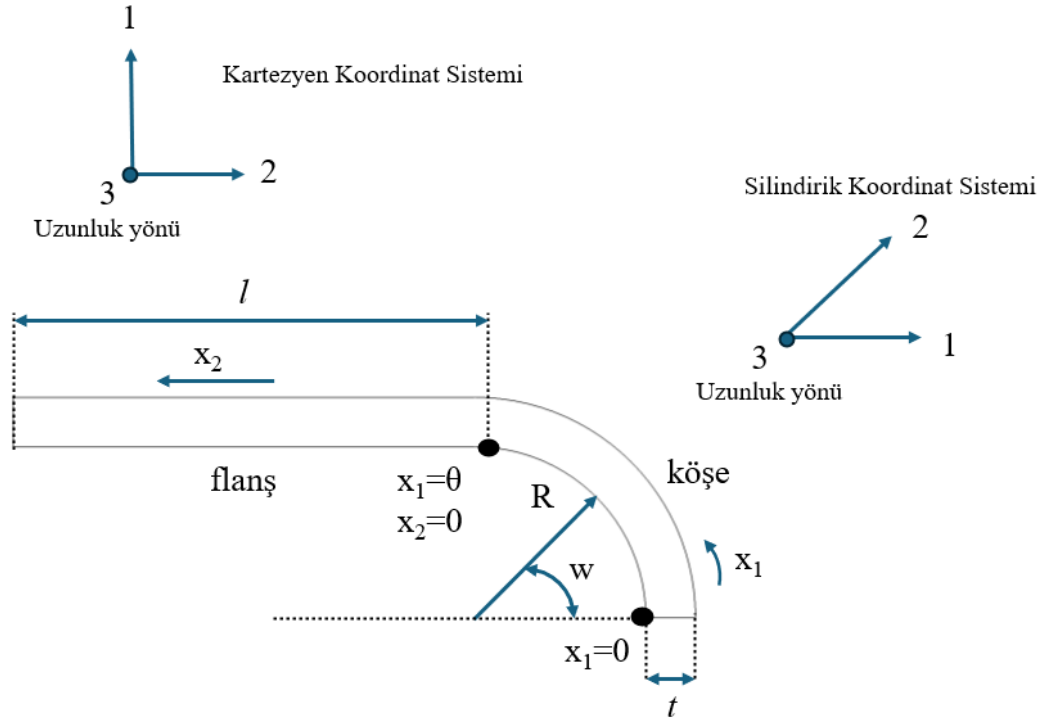
Wisnom ve arkadaşları [20], eşitlik (2.10)'a kurlenmenin ilk aşamasında uzunluk yönünde görülen deformasyonları dahil ederek analitik formülü aşağıdaki gibi geliştirmiştir.

$$\Delta\theta = -(\varepsilon_R + \nu_{ZR}\varepsilon_Z) \left[ \theta - \frac{(e^{aR\theta} - e^{-aR\theta})}{Ra(e^{aR\theta} + e^{-aR\theta})} \right] + \theta[(\alpha_\theta - \alpha_R)\Delta T + (\beta_\theta - \beta_R)] \quad (2.12)$$

$\varepsilon_Z$ : Çevresel doğrultudaki mekanik olmayan gerinim

$\nu_{ZR}$ : Poisson's oranı

Eşitlik (2.12) hem “C” hem de “L” şekle sahip parçaların toplam içe kapanma açılarının analitik hesaplanmasında kullanılmıştır. Ancak “L” şekle sahip parçalarda deneysel sonuçlar ile analitik sonuçların farklarının fazla olduğu görülmüştür [22]. Bu deviasyonun nedenlerinden birinin “L” şekle sahip parçaların içe kapanma açılarının aynı zamanda flanş boyuna (Şekil 2.7.’de belirtilen  $l$  ölçüsü) bağlı olduğu değerlendirilerek, Ding ve arkadaşları [22] tarafından analitik formüle dahil edilmiştir.



Şekil 2.7. "L" geometrili parçalarda köşe ve flanş tanımları [23]

$$\Delta\theta = -(\varepsilon_R + \nu_{ZR}\varepsilon_Z) \left[ \theta + \frac{C(1 + e^{2al})}{Ra[C - 1 - e^{2al}(C + 1)]} \right] + \theta[(\alpha_\theta - \alpha_R)\Delta T + (\beta_\theta - \beta_R)] \quad (2.13)$$

$l$ : Flanş uzunluğu

$C$ : Büküm yarıçapı, büküm açısı ve kalınlık içeren katsayı (Eşitlik (2.14))

$$C = \frac{e^{aR\theta} - e^{-aR\theta}}{e^{aR\theta} + e^{-aR\theta}} \quad (2.14)$$

Eşitlik (2.13) “L” şekle sahip parçalarda deneysel sonuçlarla tutarlı değerler elde edilmesini sağlamıştır [22].

Kompozit parçalardaki toplam açısal deformasyon Şekil 2.7’de tanımlanan flanş ve büküm köşe deformasyonlarının toplamı olarak ortaya çıkmaktadır. Parça kalınlığı, flanş boyu ve köşe büküm kısmında ortaya çıkan deformasyonların tamamının analitik olarak hesaplanması için Ding ve arkadaşları [23] eşitlik (2.15)’i önermiştir:

$$\Delta\theta = -(\varepsilon_R + \nu_{ZR}\varepsilon_Z) \left[ \theta + \frac{C(e^{2al} - 1)}{lRa^2[C - 1 - e^{2al}(C + 1)]} \right] + \theta \quad (2.15)$$
$$[(\alpha_\theta - \alpha_R)\Delta T + (\beta_\theta - \beta_R)]$$

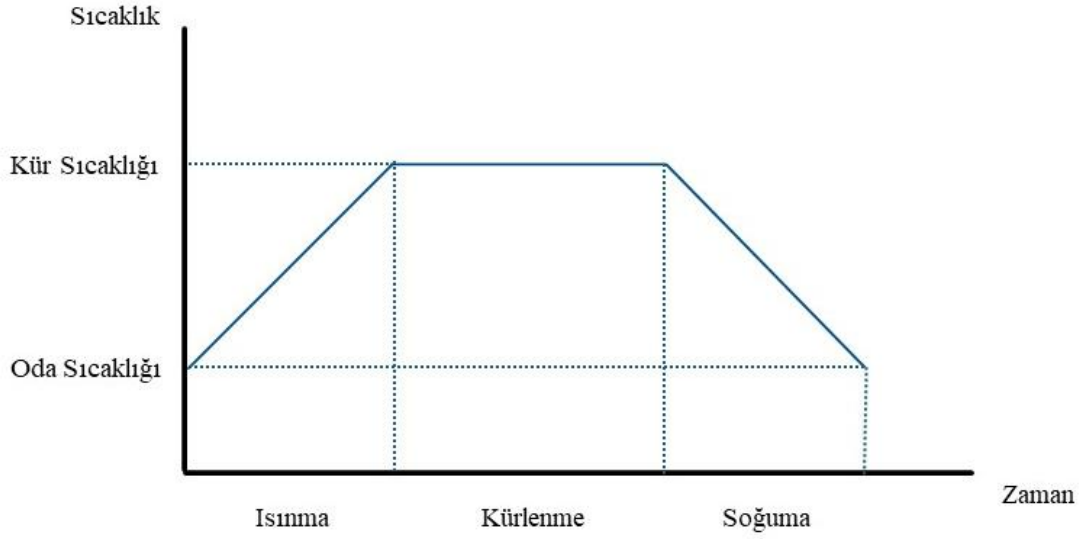
## 2.2. Süreç Kaynaklı Deformasyona Etki Eden Dış Faktörler

Süreç kaynaklı deformasyonlara etki eden dış faktörler, üretim süreci kaynaklı ortaya çıkan geometrik bozulmalardır. En önemli dış faktörler, temel olarak kürlenme süreç parametreleri ve kalıp parametreleri olarak sınıflandırılabilir [10].

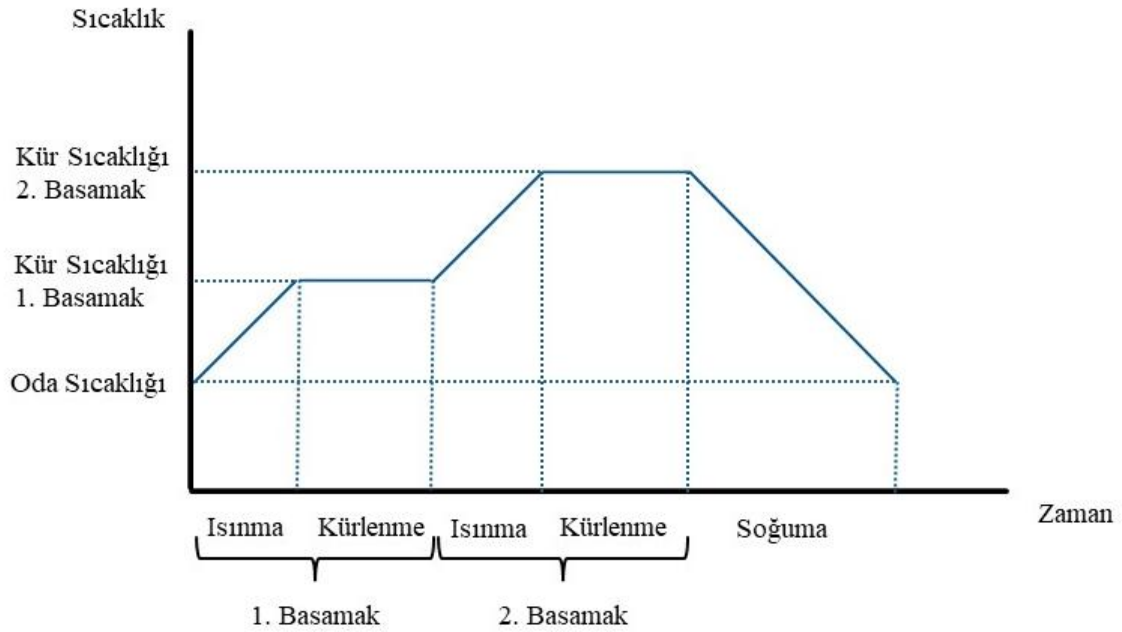
### 2.2.1. Kürlenme

Kürlenme döngüsü parametreleri kür sıcaklığı, aşamalı kür basamakları, kür sıcaklığına ulaşılan zaman, kür sıcaklığında kalma süresi ve soğuma süresi olarak tanımlanmaktadır. Bu parametrelerin farklı kombinasyonlar ile uygulanması konusunda önemli deneysel çalışmalar yapılmıştır [11]. Düşük kür sıcaklıkları ve uzun kür zamanlarının uygulanmasının artık gerilmelerin azalmasına neden olduğu, buna bağlı olarak geometrik deformasyonlarda düşüş sağladığı görülmüştür. Ancak bu durum kürlenme reaksiyonun tam olarak gerçekleşmemesine bağlı olarak son üründe beklenen mekanik özelliklerin sağlanamamasına yol açmaktadır.

Havacılık kompozit malzeme üretim süreçlerinde uygulanan kürleme döngüleri genel olarak tek basamaklı kür döngüsü (Şekil 2.8) ve çift basamaklı kür döngüsü olarak (Şekil 2.9) belirtilebilir.

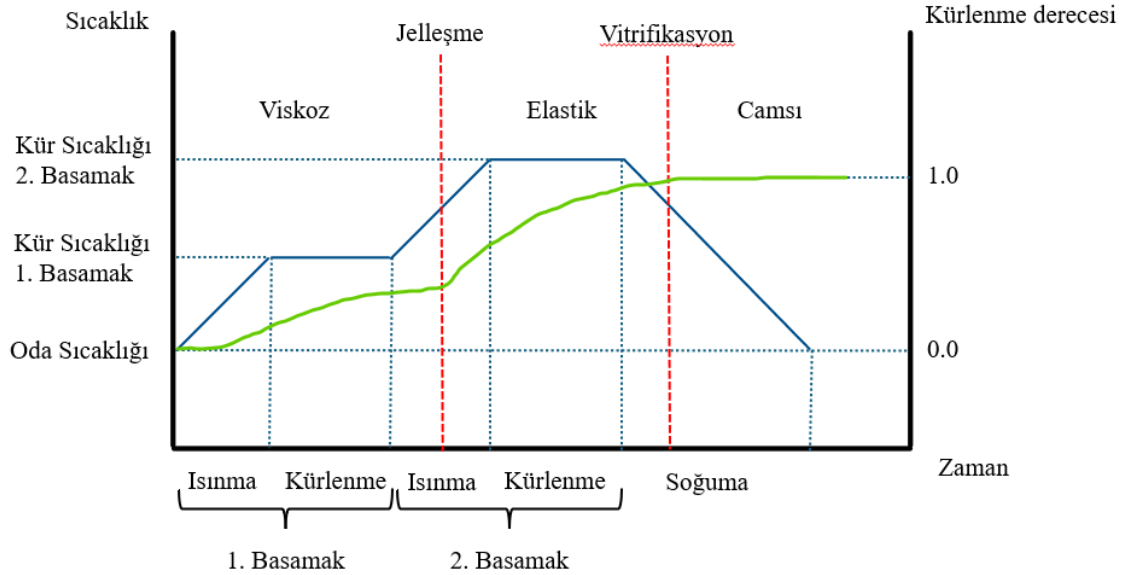


Şekil 2.8. Tek basamaklı kür döngüsü



Şekil 2.9. Çift basamaklı kür döngüsü

Kürlenme süreci boyunca kompozit malzemeler temel olarak üç ana karakteristik göstermektedir. İlk aşama oda sıcaklığından başlayarak artan sıcaklık ile matris yapının viskoz özellik gösterdiği kısımdır. Bu aşama matrisin jel benzeri bir yapıya ulaşması ile birlikte, malzemenin elastik özellik gösterdiği ikinci aşama gerçekleşir. Matris yapının sert ve mukavim yapıya dönüştüğü diğer bir deyişle kürlenmenin gerçekleştiği vitrifikasyon noktasından sonra ise son aşamada malzeme camsı yapıya ulaşmaktadır (Şekil 2.10) [22].



Şekil 2.10. Kür döngüsü üzerinde jelleşme ve vitrifikasyon noktaları

### 2.2.2. Kalıp

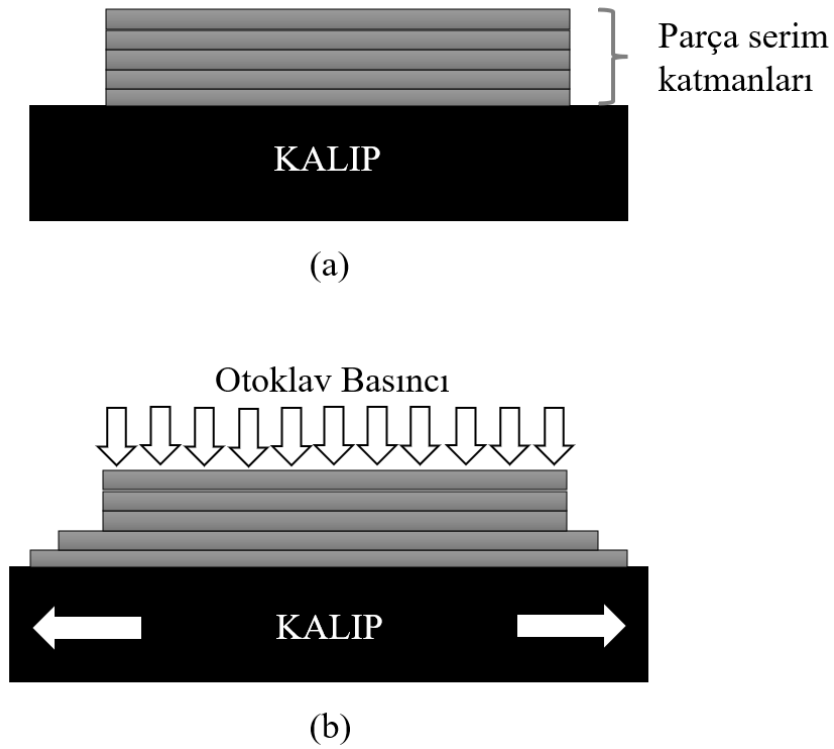
Kalıp parametrelerinden, kalıp malzemesi ve kalıp serim yüzeyi özelliklerinin süreç kaynaklı deformasyonlara etki eden dış faktörlerde önemli bir rol aldığı farklı çalışmalarda belirlenmiştir [7] [24] [25].

Kalıpların her bir parçanın üretimi sırasında defalarca kürlenme döngüsünde ısınma ve soğumaya maruz kalması, tekrarlanan ısıl yüklere dayanımı gerektirmektedir. Bu sebeple düşük ısı genleşme değerlerine sahip, yüksek çalışma sıcaklıklarına dayanabilecek malzemeler, maliyet de göz önünde bulundurularak seçilir [24].

Kalıp üzerine serimi yapılan kompozit katmanlar, otoklav içerisinde uygulanan basınç ile takım üzerine doğru itilir. Kür sıcaklığına ulaşabilmek için yapılan ısıtma işlemi sırasında kalıp genişler ve kalıba temas eden ilk katman, kalıp yüzeyi ile sürtünme katsayısı ile orantılı



olarak hareket eder. Katmanların bu hareketi kalıp yüzeyinden uzaklaştıkça azalma eğilimi gösterir. Parça kürlenmesi Şekil 2.11 (b)'de [26] gösterildiği gibi kalıp ve parçanın kalıba temas eden ilk katmanı arasındaki gerilim ve bu gerilimin diğer katmanlara etkisi altında gerçekleşir ve bu durum soğuma sonrası parça içerisinde kalan artık gerilmelere neden olur [14] [27]. Bu nedenle kalıp üzerinde serim yapılan parça malzemesi ve kalıp malzemesinin ısı genleşme katsayıları arasındaki farkın artması, kürlenme sonrası parça içerisinde kalan artık gerilmelerin artmasına yol açmaktadır [14] [27]. Kalıp malzemelerinde ısı genleşme katsayısı düşük malzemeler tercih edilmesinin süreç kaynaklı deformasyonları azalttığı gözlemlenmiştir [7] [14] [28] [29].



**Şekil 2.11.** (a) Katmanların kalıp üzerine serimi (b) Otoklav içerisinde katman davranışı

### 3. ANALİTİK ÇALIŞMALAR

Havacılık standartlarındaki karbon fiber ile güçlendirilen kompozit parçaların üretim süreçlerinde ortaya çıkan süreç deformasyonlarına etki eden faktörler, iç ve dış olarak bölüm 2.1 ve 2.2’de sınıflandırılmıştır. Literatürde süreç bazlı deformasyon faktörlerinin öngörülebilmesi için hem analitik hesaplamalar hem de nümerik analizler gerçekleştirilmiş, sonuçlar deneysel çalışmalar ile test edilmiştir. Ürün tasarım aşamalarında süreç bazlı deformasyonların tahmini için kaynak, zaman ve ihtiyaç duyulan kesinliğe bağlı olarak her iki metot da kullanılmaktadır.

Havacılık endüstrisinde kullanılan kompleks geometriye sahip kompozit yapılarda süreç deformasyonlarının öngörülebilmesi için nümerik analizler ön plana çıkarken, farklı türdeki hava platformlarında sıklıkla benzer geometrilere sahip olan, kaburga, kiriş gibi ana yapısal parçaların süreç deformasyonlarında analitik çalışmalar süreç verimliliği açısından önem teşkil etmektedir.

2 içinde belirtilen eşitlik (2.15) analitik olarak “L” şekle sahip parçalardaki süreç deformasyonlarının hesaplanmasında tutarlı bir öngörü sağlamaktadır. Ancak bu eşitlik süreç bazlı deformasyonların iç faktörlerinin hesaplanmasını sağlarken, dış faktörler konusunda herhangi bir bilgi vermemektedir. Oysa yine bölüm 2.2’de belirtilen dış faktörlerin de süreç deformasyonlarına etkisinin bulunduğu bilinmektedir.

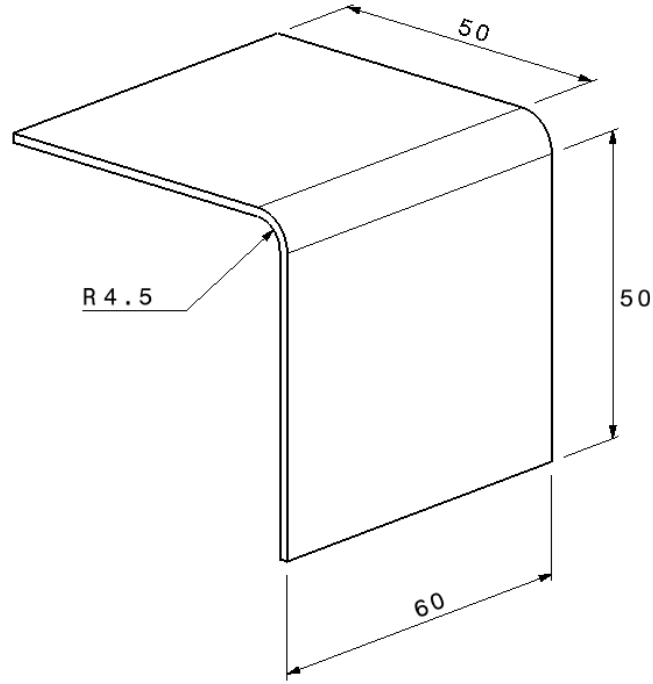
Bu bölümde seçilen bir konfigürasyonda tasarımı yapılan “L” geometriye sahip kompozit parçanın iç faktörler nedeniyle uğrayacağı süreç deformasyonunun analitik hesaplanması gerçekleştirilecektir.

#### 3.1. Seçilen Konfigürasyon ve Test Parçası Tasarımı

##### 3.1.1. Geometri

Bükümlü parçalar, iç yapıları gereği deformasyona daha açık olmaktadır. Ek olarak düz ve düze yakın kompozit parçalarda sadece çarpılma etkisi görülmesine rağmen bükümlü parçalarda çarpılma ve içe kapanma etkisi birlikte görülmektedir [23]. Bu nedenle süreç deformasyonları değerlendirilecek parça tasarımı “L” geometri olarak seçilmiş ve ölçüler

mm cinsinden Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Parça tek büküme sahiptir ve büküm açısı  $90^\circ$ ’dir. Parça flanş uzunlukları birbirine eşittir.



**Şekil 3.1.** Test parça ölçüleri ([0]<sub>8</sub>)

Süreç deformasyonlarının analitik olarak hesaplanmasında kullanılan parça geometrik özellikleri Tablo 3.1’de belirtilmiştir.

**Tablo 3.1.** Test parçası geometrik özellikleri

| Özellikler | Ölçü       |
|------------|------------|
| $l$        | 50 mm      |
| $R_i^*$    | 4.5 mm     |
| $R_d^*$    | 6 mm       |
| $\theta$   | $90^\circ$ |

\*  $R_i$  ve  $R_d$  değerleri eşitlik (2.15) içinde parça serim yüzeyine göre kullanılmıştır. İç yüzeyi serim yüzeyi olan test parçalarında  $R_i$  değeri, dış yüzeyi serim yüzeyi olan test parçalarında  $R_d$  değeri kullanılmıştır.

### 3.1.2. Malzeme

Parça malzemesi olarak literatürde süreç deformasyonları konusunda yoğunlukla çalışılan, aynı zamanda havacılık sanayi platformlarında geniş kullanım alanı bulunan tek yönlü (UD) karbon fiber dağılımına sahip AS4/8552 prepreg malzeme tercih edilmiştir. Malzeme fiziksel özellikleri üretici katalog değerleri Tablo 3.2’de listelenmiştir.

**Tablo 3.2.** AS4/8552 kompozit fiziksel özellikleri

| Fiziksel Özellik       | Birim             | Değer |
|------------------------|-------------------|-------|
| Fiber Yoğunluğu        | g/cm <sup>3</sup> | 1.79  |
| Rezin Yoğunluğu        | g/cm <sup>3</sup> | 1.30  |
| Hacimsel Fiber Oranı   | %                 | 57.42 |
| Katman Yoğunluğu       | g/cm <sup>3</sup> | 1.58  |
| Elastisite Modülü (0°) | GPa               | 141   |
| Çekme Dayanımı (0°)    | GPa               | 2.207 |

Malzeme kaynaklı deformasyonların, termal faktörler nedeniyle ortaya çıkan kısmının analitik olarak hesaplanabilmesi için eşitlik (2.15) içerisinde bulunan, camısı alandaki ısı genleşme katsayıları ve kurlenme daralma katsayıları Tablo 3.3’de verilmiştir [22] [30].

**Tablo 3.3.** AS4/8552 kompozit termal özellikleri [22] [30]

| Özellikler      | Tek yönlü (UD) kompozit (Camsı) ( $\mu\epsilon/^\circ\text{C}$ ) |
|-----------------|------------------------------------------------------------------|
| $\alpha_\theta$ | 0                                                                |
| $\alpha_R$      | 32.6 $\mu\epsilon/^\circ\text{C}$                                |
| $\beta_\theta$  | 0                                                                |
| $\beta_R$       | 0                                                                |

Yine eşitlik (2.15) içinde bulunan ve kurlenme sırasında camısı alana gelmeden önce elastiki bölgede yaşanan deformasyonların hesaplanabilmesi için gerekli elastisite, kayma modülü, Poissons oranı ve gerinim değerleri literatürdeki önceki çalışmalar baz alınarak Tablo 3.4’de verilmiştir [22] [23] [31] [32].

**Tablo 3.4.** AS4/8552 kompozit mekanik özellikleri [22] [23] [31]

| Özellikler                                                | Tek yönlü (UD) kompozit (Camsı) |
|-----------------------------------------------------------|---------------------------------|
| $E_{11}$ ( $E_\theta$ )                                   | 132200 MPa                      |
| $E_{22}=E_{33}$ ( $E_R=E_Z$ )                             | 165 MPa                         |
| $G_{12}=G_{13}$ ( $G_{\theta R}=G_{\theta Z}$ )           | 44.3 MPa                        |
| $G_{23}$ ( $G_{RZ}$ )                                     | 41.6 MPa                        |
| $\nu_{12}=\nu_{13}$ ( $\nu_{\theta R}=\nu_{\theta Z}$ )   | 0.346                           |
| $\nu_{23}$ ( $\nu_{RZ}$ )                                 | 0.982                           |
| $\epsilon_{11}$ ( $\epsilon_\theta$ )                     | 0                               |
| $\epsilon_{22}=\epsilon_{33}$ ( $\epsilon_R=\epsilon_Z$ ) | % 0.48                          |

### 3.1.3. Serim yönü

Şekil 2.6’da tanımlanan serim yönlerine istinaden, etkin içe kapanma açısının maksimum olduğu durum Eşitlik (2.9)’a göre fiberlerin en çok deformasyona maruz kaldığı  $0^\circ$  yönünde serildiği durum olarak ortaya çıkmaktadır ( $\Delta\theta_{\text{etk}} = \Delta\theta_{\text{max}}$ ).  $90^\circ$  yönünde serimi yapılan katmanlarda fiberler deformasyona maruz kalmadıkları için süreç bazlı deformasyona etkileri ihmal edilebilecek kadar küçük olduğu kabul edilmektedir. Bu bilgiye dayanarak test parçasında maksimum deformasyonun gözlemlenebilmesi için tüm katmanların serim yönleri  $\psi=0^\circ$  olacak şekilde [0]<sub>i</sub> konfigürasyonu seçilmiştir.

### 3.1.4. Katman sayısı

Bölüm 2.1.4’te parça kalınlıklarının azalmasının süreç deformasyonlarını artırdığı yönünde literatür araştırmaları paylaşılmıştı. Bu nedenle parça kalınlığı belirlenirken hem deformasyonun gözlemlenebilmesi kolaylaştırmak hem de havacılık endüstrisinde kullanılan parçaların kalınlıkları en düşük olanları değerlendirmek için 8 katmanlı bir parça test parçası olarak seçilmiştir. Serim yönleri de düşünüldüğünde parça [0]<sub>8</sub> konfigürasyonu olarak tanımlanmıştır.

Reçine emdirilmiş kumaş formunda kullanılan AS4/8552 malzeme için daha önce yapılan testlerde elde edilen maksimum, minimum ve ortalama kalınlık değerleri Tablo 3.5’te belirtilmiştir [33] [34].

**Tablo 3.5.** AS4/8552 kompozit katman kalınlık değerleri [33] [34]

| Katman Kalınlığı | Toplam Kalınlık [mm] |
|------------------|----------------------|
| Maksimum         | 0.196                |
| Ortalama         | 0.188                |
| Minimum          | 0.178                |

Ortalama kalınlık değeri baz alınarak test parçası kalınlığı eşitlik (3.1)'de belirtildiği gibi öngörölmüştür.

$$[0]_8 = 1.50mm = t \quad (3.1)$$

### 3.2. Test Parçaları Deformasyonlarının Analitik Değerlendirilmesi

Tüm test parçalarında yukarıda bahsi geçen parametreler aynı değerlerde tutularak, parçalarda oluşacak süreç deformasyonlarının iç faktörleri sabitlenmiştir. Bu sayede deformasyona etki eden dış faktörlerin, iç faktörlerden bağımsız olarak değerlendirilmesi hedeflenmiştir.

Süreç deformasyonlarının analitik olarak hesaplanması için eşitlik (2.15) [23] kullanılmıştır. Analitik hesaplamalarda kullanılmak üzere, parça geometrisine bağlı parametreler Tablo 3.1'de ve eşitlik (3.1)'de, malzeme tipine bağlı ısıl özellikler Tablo 3.3'de, mekanik özellikler ise Tablo 3.4'de belirtilmiştir.

Eşitlik (2.15)'e girdi oluşturan sayısal değerler Tablo 3.6'da derlenmiştir.

**Tablo 3.6.** Eşitlik (2.15) hesaplamalarında kullanılan sayısal değerler [22] [23] [30] [31]

| Özellikler     | Değerler    |
|----------------|-------------|
| $\epsilon_R$   | -0.0048     |
| $\epsilon_Z$   | -0.0048     |
| $\nu_{RZ}$     | 0.982       |
| $\theta$       | 1.5708 rad. |
| $G_{\theta R}$ | 44.3 MPa    |
| $E_{\theta}$   | 132200 MPa  |
| $t$            | 1.5 mm      |

|                 |                             |
|-----------------|-----------------------------|
| $R_i$           | 4.5 mm                      |
| $R_d$           | 6 mm                        |
| $l$             | 50 mm                       |
| $\alpha_\theta$ | 0                           |
| $\alpha_R$      | 32.6 $\mu\epsilon/^\circ C$ |
| $\beta_\theta$  | 0                           |
| $\beta_R$       | 0                           |

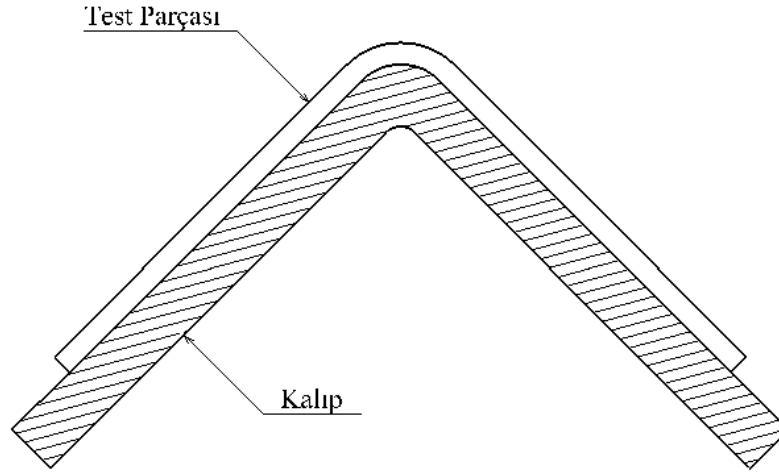
---

Eşitlik (2.11) ve Tablo 3.6'daki değerler ile malzeme özellikleri ve kalınlığa bağlı deformasyon kalınlık sabiti “a” hesaplanmıştır.

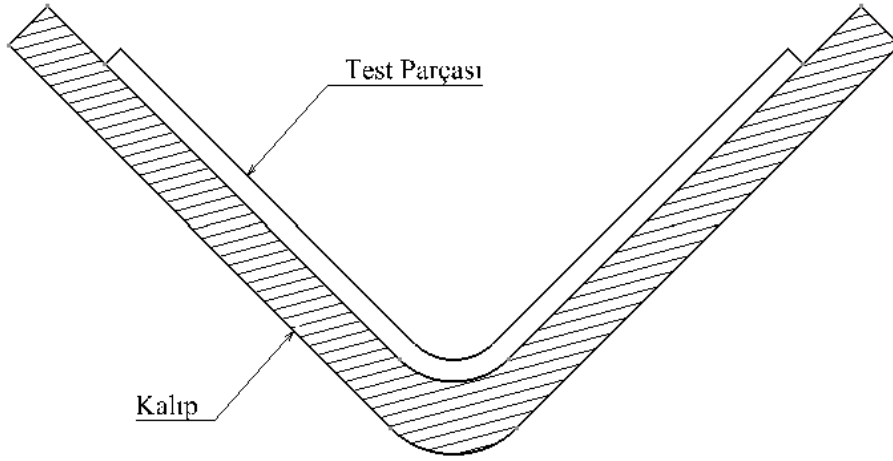
$$a = \sqrt{\frac{10 \times 44.3}{132200 \times 1.5^2}} = 0.0386$$

Eşitlik (2.14) ve Eşitlik (2.15) içinde belirtilen ve geometrik parametreler içinde bulunan “R” yarıçap değeri, takımın serim yüzeyindeki büküm yarıçapı olarak tanımlanmıştır [23]. Serim yüzeyi, kalıp ile parça ilk katmanının temas ettiği yüzey olarak tanımlanmaktadır. Bu nedenle test parçaları deformasyon hesaplarında parça serim yüzeylerine göre R değeri olarak Tablo 3.6'daki  $R_i$  veya  $R_d$  yarıçap değerleri kullanılmıştır.

Diğer bir deyişle, parça iç yüzeyi serim yüzeyi olan parçalar için (Şekil 3.2) erkek kalıp yarıçap değeri ( $R_i$ ), dış yüzeyi takım yüzeyi olan parçalarda (Şekil 3.3) ise dişi kalıp yarıçap değeri ( $R_d$ ) kullanılmıştır.



**Şekil 3.2.** İç yüzeyi üzerine serilen test parçası (büküm yarıçapı =  $R_i$ )



**Şekil 3.3.** Dış yüzeyi üzerine serilen test parçası (büküm yarıçapı =  $R_d$ )

Eşitlik (2.14) ve Tablo 3.6'daki değerler ile Eşitlik (2.15) içinde kullanılan düzeltme faktörü ( $C_i$  ve  $C_d$ ),  $R_i$  veya  $R_d$  çapları kullanılarak hesaplanmıştır.



$$C_i = \frac{e^{0.0386 \times 4.5 \times 1.5708} - e^{-0.0386 \times 4.5 \times 1.5708}}{e^{0.0386 \times 4.5 \times 1.5708} + e^{-0.0386 \times 4.5 \times 1.5708}} = 0.2663$$

$$C_d = \frac{e^{0.0386 \times 6 \times 1.5708} - e^{-0.0386 \times 6 \times 1.5708}}{e^{0.0386 \times 6 \times 1.5708} + e^{-0.0386 \times 6 \times 1.5708}} = 0.3486$$

Eşitlik (2.15) ve Tablo 3.6'daki değerler ve yukarıda hesaplanan katsayı "a" ile yine erkek ve dişi kalıp kullanılmasına bağlı olarak kullanılan  $C_i$ ,  $R_i$  ve  $C_d$ ,  $R_d$  değerleri ile iki ayrı süreç deformasyon değeri hesaplanmıştır.

$$\Delta\theta_i = -(0.0048 + 0.982 \times 0.0048) \times \left[ 1.5708 + \frac{0.2663 \times (e^{2 \times 0.0386 \times 50} - 1)}{50 \times 4.5 \times 0.0386^2 \times [0.2663 - 1 - e^{2 \times 0.0386 \times 50} (0.2663 + 1)]} \right] + 1.5708 \times [(-32.6 \times 10^{-6}) \times 160] = 0.01736 \text{ rad}$$

$$\Delta\theta_d = -(-0.0048 + 0.982 \times (-0.0048)) \times \left[ 1.5708 + \frac{0.3486 \times (e^{2 \times 0.0386 \times 50} - 1)}{50 \times 6 \times 0.0386^2 \times [0.3486 - 1 - e^{2 \times 0.0386 \times 50} (0.3486 + 1)]} \right] + 1.5708 \times [(-32.6 \times 10^{-6}) \times 160] = 0.01780 \text{ rad}$$

Radyan cinsinden elde edilen toplam açısal deformasyon değerleri Tablo 3.7'de derece olarak belirtilmiştir.

**Tablo 3.7.** Süreç deformasyonu analitik değerleri

| Test Parçaları            | Açısal Deformasyon (°) |
|---------------------------|------------------------|
| Erkek kalıp üzerine serim | 0.995                  |
| Dişi kalıp üzerine serim  | 1.020                  |

## 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Karbon fiber takviyeli termoset polimer yapıların üretim süreçleri sonrasında elde edilen geometrileri, imalat süreç parametrelerine bağlı olarak gerçekleşen deformasyonlar nedeniyle tasarım geometrilerinden farklılık göstermektedir. Havacılık sanayinde kullanılan kompozit yapılarda karşılaşılan bu geometrik farkların etkileri bölüm 1.2’de, bu konuda literatürde bulunan önemli referans çalışmalar ve süreç deformasyonlarının iç ve dış faktörler olarak sınıflandırılması bölüm 2’de açıklanmıştır. Bölüm 3’te ise geometrisi tanımlanan bir parça geometrisi üzerinden literatürde bulunan analitik formüller ile deformasyon öngörülme çalışılmıştır.

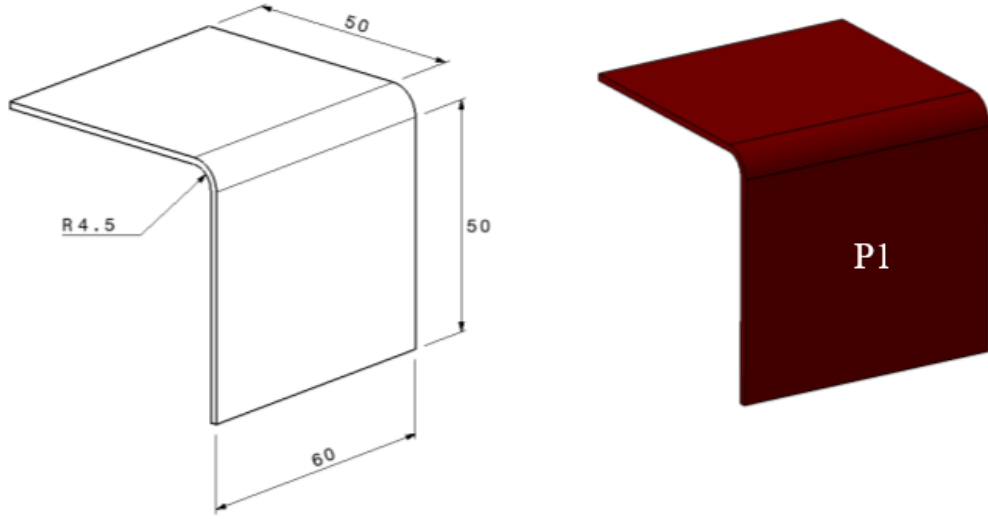
Bu bölümde analitik süreç deformasyon hesabı bir önceki bölümde gerçekleştirilen geometri üzerinden yapılan deneysel çalışmalar paylaşılmıştır.

Bölüm 2.1 içerisinde tanımlanan iç faktörler; geometri, malzeme, serim yönü ve katman sayısı (kalınlık) tüm test parçaları için sabit tutulmuş, bu sayede süreç deformasyonlarına, dış faktörlerin etkileri araştırılmıştır. Bölüm 2.2 içinde ise bu etkiyi ortaya çıkaran dış faktörler; kürlenme süreci ve kalıp parametreleri sunulmuştur.

Deneysel çalışmalar sonucu elde edilen verilerin analitik olarak hesaplanan süreç deformasyonları ile karşılaştırılması hedeflenmiştir.

### 4.1. Test Parçaları Tasarımı

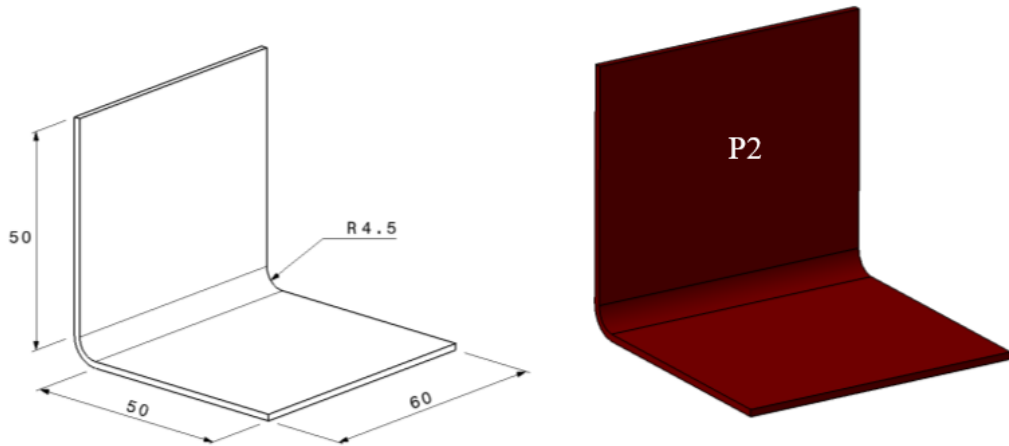
Bölüm 3.1.1 içinde geometrisi tanımlanan test parçası, çalışmalarda “P1” olarak isimlendirilmiştir, parça modeli Şekil 4.1’de sunulmuştur. P1 parçasının üretiminde, parça iç yüzeyi kalıp ile temas etmekte diğer bir deyişle erkek kalıp üzerinde (Şekil 3.2’de gösterildiği şekilde) üretimi planlanmıştır.



**Şekil 4.1.** P1 numaralı test parçası\*

\* Ölçü birimleri mm'dir.

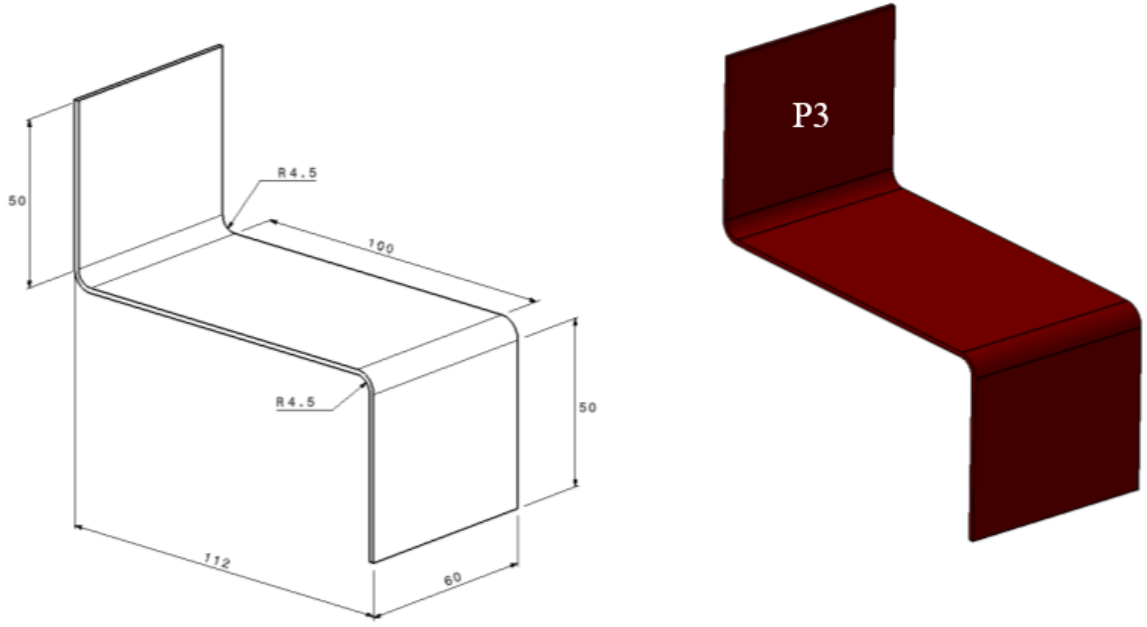
“P2” kodu ile isimlendirilen test parçaları ise P1 olarak isimlendirilen parçalar ile birebir aynı geometriye sahiptir. P1 ile P2 parçalarını birbirinden ayıran yegâne özellik serim yüzeyleridir. P2 parçasının, P1 parçasından farklı olarak parça dış yüzeyi kalıp ile temas etmekte (Şekil 3.3'te gösterildiği şekilde) diğer bir deyişle, P2 parçasının dışı kalıp üzerinde serim yapılarak üretilmesi planlanmıştır. P2 parça modeli Şekil 4.2'de sunulmuştur.



**Şekil 4.2.** P2 numaralı test parçası\*

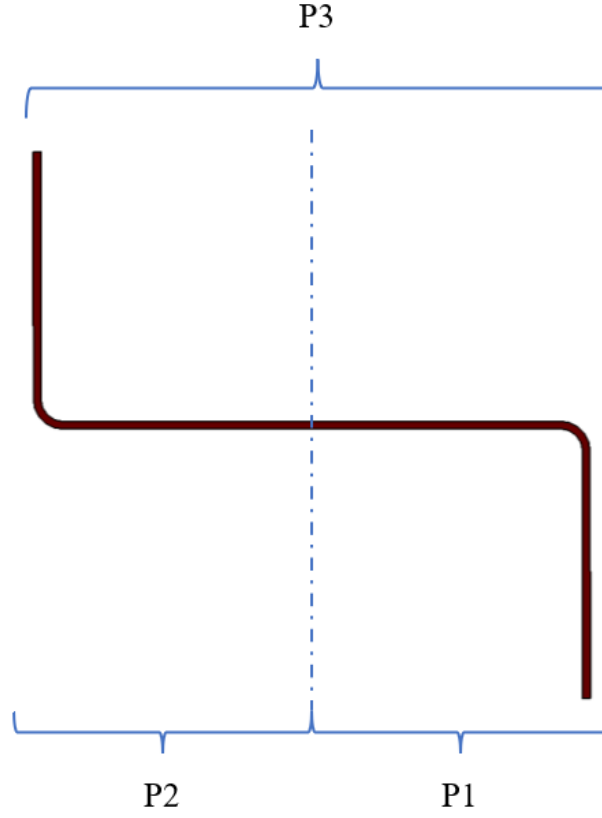
\* Ölçü birimleri mm'dir.

“P3” olarak isimlendirilen test parçası (Şekil 4.3) ise geometrik olarak P1 ve P2 parçalarının birleşmiş halidir (Şekil 4.4). P3 parçası üzerinde, P1 parçasında gözlemlenen deformasyon ile P2 parçasında gözlemlenen deformasyonların, P1 parçasının bir flanşı ile P2 parçasının bir flanşının birlikte üretilmesi durumundaki toplam deformasyonların değişimi hakkında veri elde etmek için planlanmıştır.



**Şekil 4.3.** P3 numaralı test parçası\*

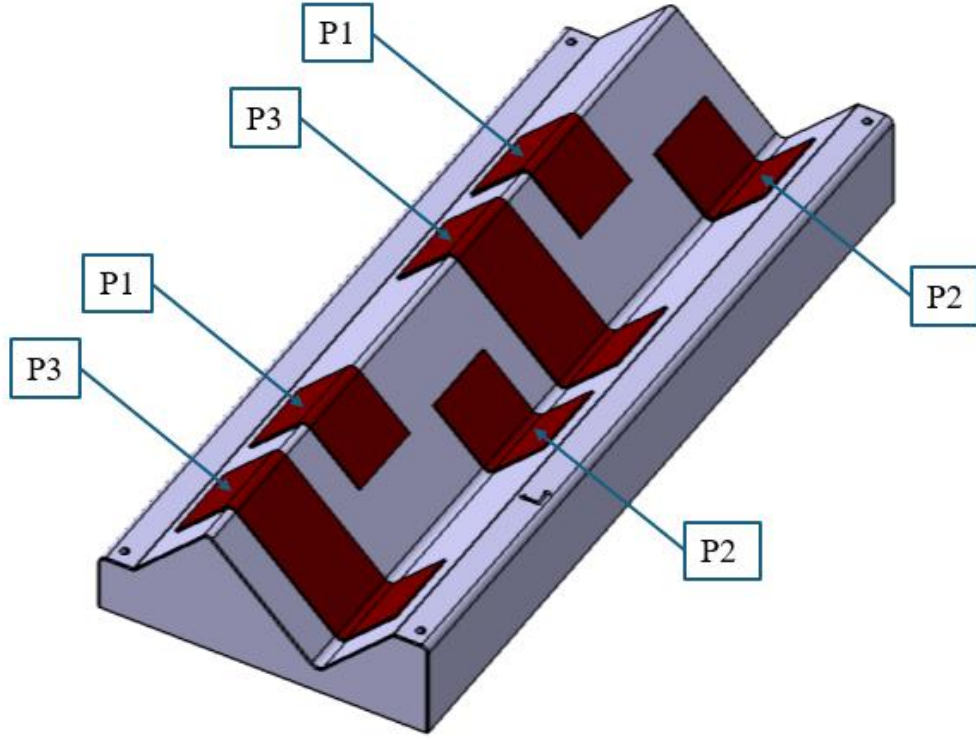
\* Ölçü birimleri mm'dir.



**Şekil 4.4.** P3 parçasının P1 ve P2 parçası ile ilişkisi

#### **4.2.Kalıp Tasarımı ve Üretimi**

Bölüm 4.1’de tanımlanan üç parça (P1, P2 ve P3) üretiminde kullanılmak üzere bilgisayar destekli tasarım aracı (CATIA V5) kullanılarak serim kalıbı tasarım faaliyetleri gerçekleştirilmiştir. Tasarım, bir kalıp üzerinde iki adet P1, iki adet P2 ve iki adet P3 parçasının tek bir kür döngüsünde üretilmesine olanak sağlayacak şekilde yapılmıştır. Test parçalarının takım üzerindeki yerleşimleri Şekil 4.5’te gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Bir kalıp üzerinde test parçaları yerleşimi

Toplam dört farklı kalıp tasarım faaliyeti gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.6). Farklı kalıp malzemelerinin üretim süreçlerinde deformasyona etkilerinin gözlemlenebilmesi için kalıp imalatında sıklıkla kullanılan malzemeler arasından seçilenler Tablo 4.1’de belirtilmiştir.

Alüminyum 6061 T6 izotropik özellikler göstermesi, kolay işlenebilmesi ve diğer malzemeler göz önüne alındığında görece uygun maliyete sahip olması nedeniyle özellikle küçük parçalar için tercih edilmektedir. Yüksek ısı genleşme katsayısı nedeniyle kalıpların tekrarlı kullanımında ise genellikle kalıp yüzeylerinde bozulma görülebilir.

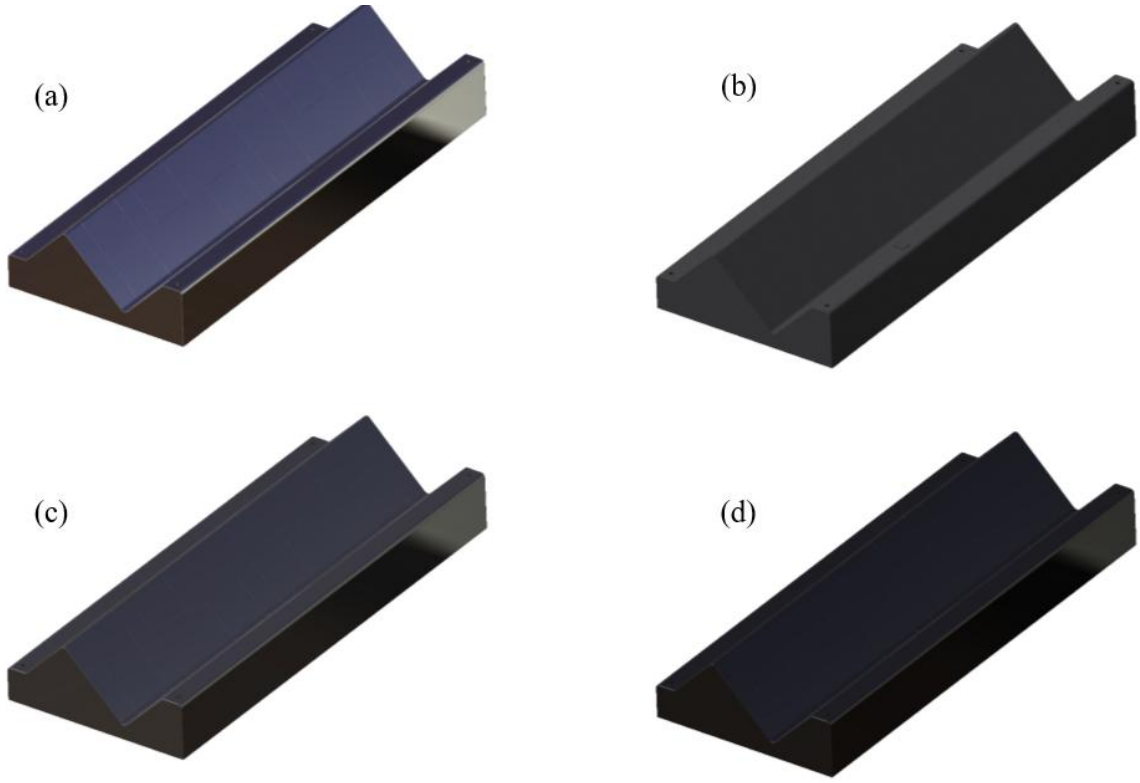
LTM 217 Prepreg malzeme takım imalatları için özel üretilen reçine emdirilmiş kumaşlardır. Küçük parçalardan büyük parçalara kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir. Takım üretimlerinde LTM 217 kullanılabilmesi için öncelikle yardımcı takımların üretilmesi, sonrasında ise bu yardımcı takımlar üzerinde serim yapılarak ana takımın oluşması sağlanmaktadır. Bu nedenle genellikle yüksek maliyet oluşturan bu malzeme, hava platformları kompozit malzemeleri ile yakın ısı genleşme katsayısına sahip olmaları ve karmaşık geometrilerde üretilebilmeleri nedeniyle tercih edilmektedir.

S355J2 çelik malzeme kolay erişebilirliği ve maliyet avantajı nedeniyle tercih edilmektedir. Aynı zamanda alüminyuma göre daha düşük ısı genleşme katsayısına sahip olması, tekrarlı kullanımlarda dayanıklılığı arttırmaktadır.

Alloy 36 veya yaygın kullanılan diğer adıyla Invar® 36, %36 nikel ve %64 demir içeriği ile takım malzemeleri arasında en düşük ısı genleşme katsayısına sahip malzemedir. Isıl değişimlere dayanıklılığı nedeniyle, yüksek malzeme ve işçilik maliyetlere karşın özellikle büyük ve kompleks parçalarda tercih edilmektedir.

**Tablo 4.1.** Kalıp malzemeleri ve ısı genleşme katsayıları

| Kalıp Kodu | Kalıp Malzemesi      | Lineer Isıl Genleşme Katsayısı ( $\alpha_{CTE}$ ) |
|------------|----------------------|---------------------------------------------------|
|            |                      | ( $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$ )   |
| T1         | Alüminyum 6061 T6    | 25.2                                              |
| T2         | LTM 217 Prepreg      | 3.0                                               |
| T3         | Çelik S355J2         | 12.1                                              |
| T4         | Alloy 36 (Invar® 36) | 2.6                                               |



**Şekil 4.6.** (a) T1, (b) T2, (c) T3, (d) T4 kodlu kalıpların üç boyutlu modelleri

Kalıplar üzerinde yapılan serim operasyonu oda sıcaklığında gerçekleşmekte, sonrasında otoklav içerisinde kür sıcaklığına kadar yaşanan sıcaklık değişimi, takımların ısı genleşmeye maruz kalmasına sebep olmaktadır. Bu genleşme takım üzerinden çıkarılan parçalarda tasarım geometrisinden sapmalara neden olmaktadır. Kalıp tasarım aşamasında oda sıcaklığı ile kürlenme sıcaklığı farkı, takım malzemesi baz alınarak göz önünde bulundurulmakta ve takımlara ısı genleşmeden kaynaklı düzeltici ölçeklendirme faktörleri uygulanmaktadır.

Test parçalarının, Tablo 4.1’de belirtilen farklı malzemelere sahip takımlar üzerinde üretilmesine bağlı olarak, tüm test parçalarının üretildiği takımların ısı genleşme farklarından ortaya çıkan sapmaların bertaraf edilebilmesi önemlidir. Her bir takımdan elde edilen test parçalarının, birbiri ile karşılaştırılması sırasında sadece iç kapanma ve çarpılma miktarlarının parçalar üzerindeki etkilerinin değerlendirilebilmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle düzeltici ölçeklendirme faktörleri, eşitlik (4.1)’de belirtildiği şekilde hesaplanmıştır.



$$\frac{1}{(1 + \alpha_{CTE} \times \Delta T)} \quad (4.1)$$

Eşitlik (4.1), birim uzunluğun belirli bir sıcaklık farkı altında, malzeme lineer ısı genleşme katsayısına göre göstereceği uzunluk artışının öngörülerek mevcut birim uzunluğun tasarım aşamasında azaltılmasına dayanır.

Test parçaları malzemesi (AS4/8552) üretici katalog değerlerinde, kürleme sıcaklığı 180 °C olarak belirtilmiştir. Serim yapılan temiz oda sıcaklığı 20 °C olarak alındığında toplam sıcaklık farkı ( $\Delta T$ ) 160 °C olmak kaydıyla, Tablo 4.1’de belirtilen lineer ısı genleşme katsayıları ( $\alpha_{CTE}$ ) ile düzeltici ölçeklendirme faktörleri hesaplanmıştır.

Alüminyum 6061 T6 malzemeye sahip T1 takımı için;

$$\frac{1}{(1 + 25.2 \times 10^{-6} \times 160)} = 0.9960$$

LTM 217 Prepreg kompozit malzemeye sahip T2 takımı için;

$$\frac{1}{(1 + 3.0 \times 10^{-6} \times 160)} = 0.9995$$

S355J2 çelik malzemeye sahip T3 takımı için;

$$\frac{1}{(1 + 12.1 \times 10^{-6} \times 160)} = 0.9981$$

Alloy 36 (Invar® 36) malzemeye sahip T4 takımı için;

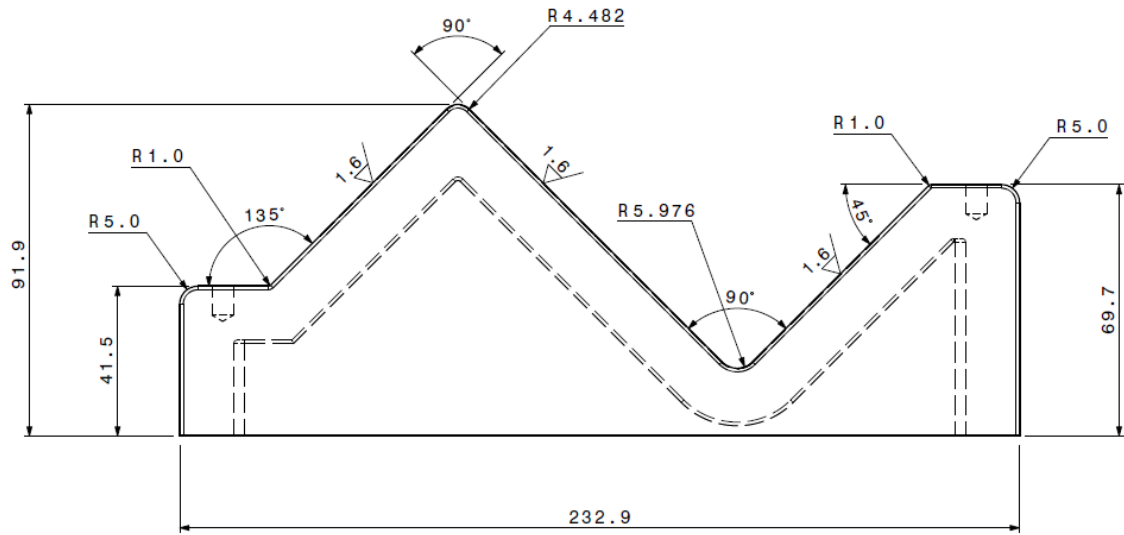
$$\frac{1}{(1 + 2.6 \times 10^{-6} \times 160)} = 0.9996$$

Eşitlik (4.1) ile hesaplanan birimsiz katsayılar Tablo 4.2’de sunulmuştur. Bu katsayılar tasarım aşamasında takım modellerine uygulanmıştır.

**Tablo 4.2.** Takımlara uygulanan düzeltici ölçeklendirme katsayıları

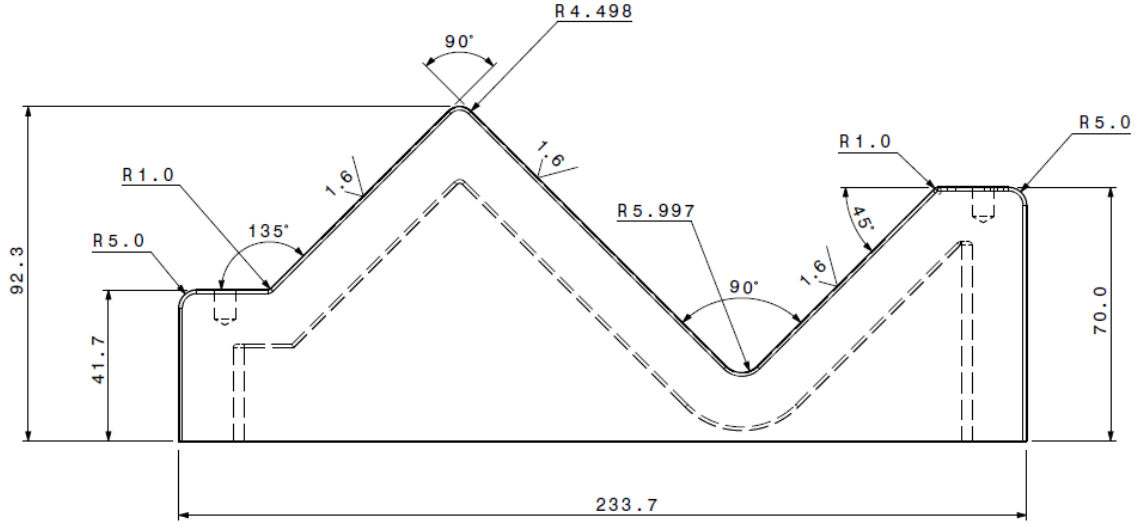
| Kalıp Kodu | Kalıp Malzemesi      | Ölçeklendirme Katsayısı |
|------------|----------------------|-------------------------|
| T1         | Alüminyum 6061 T6    | 0.9960                  |
| T2         | LTM 217 Prepreg      | 0.9995                  |
| T3         | Çelik S355J2         | 0.9981                  |
| T4         | Alloy 36 (Invar® 36) | 0.9996                  |

Üç boyutlu modeller bu katsayılar oranında küçültülerek, kür sıcaklığına ulaşıldığında takımların beklenen geometriye ulaşması hedeflenmiştir. Takımlara uygulanan ölçeklendirme katsayıları sonrasında, takım geometrileri Şekil 4.7, Şekil 4.8, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10’da gösterilmiştir. Her dört takımda test parçası serim yüzeylerine, parça ilk katmanı ile takım serim yüzeyi arasındaki sürtünmenin kontrol altında tutulabilmesi için, yüzey pürüzlülük değeri tanımlanmıştır.



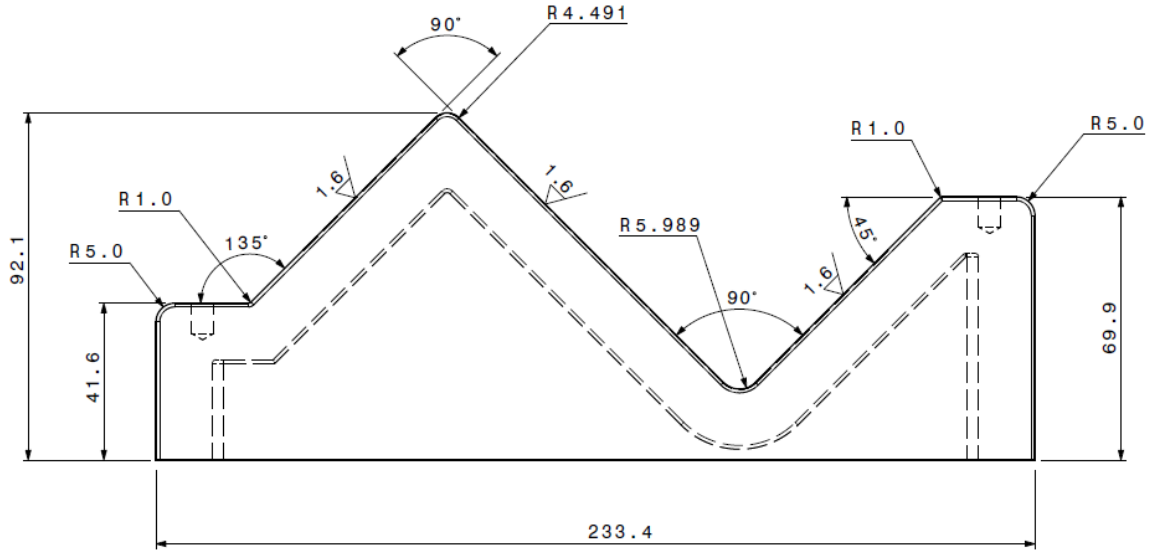
**Şekil 4.7.** T1 numaralı takım geometrisi\*

\* Ölçü birimleri mm’dir.



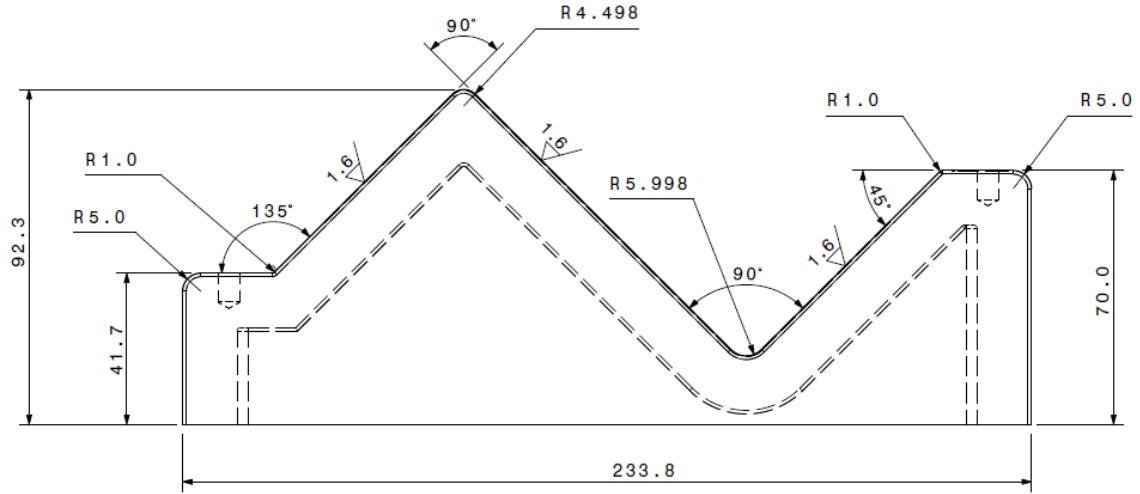
Şekil 4.8. T2 numaralı takım geometrisi\*

\* Ölçü birimleri mm'dir.



Şekil 4.9. T3 numaralı takım geometrisi\*

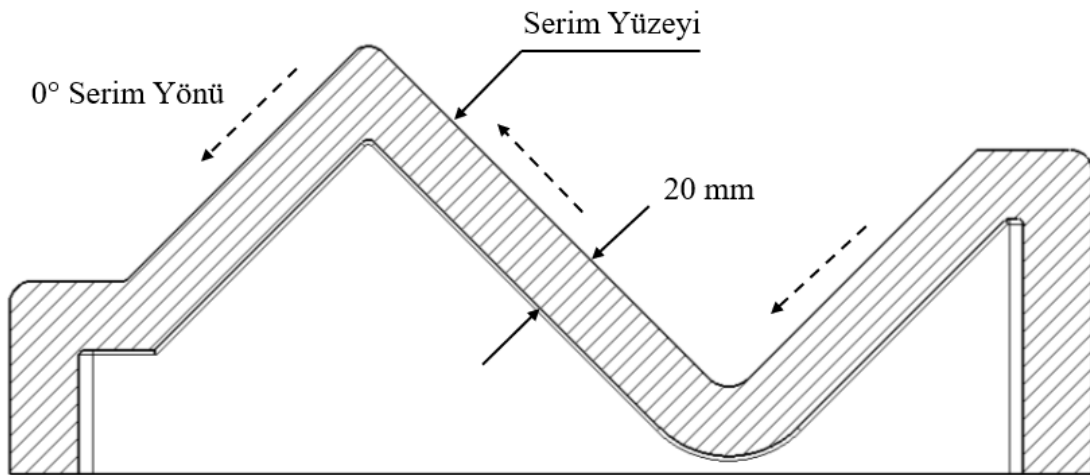
\* Ölçü birimleri mm'dir.



**Şekil 4.10.** T4 numaralı takım geometrisi\*

\* Ölçü birimleri mm'dir.

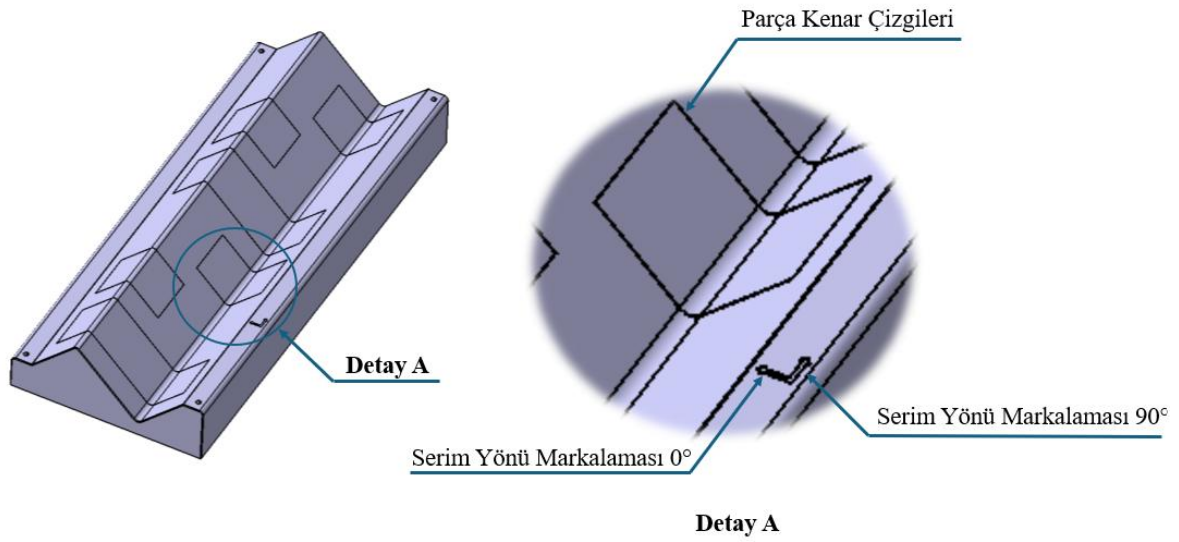
Test parçalarının takım ile temas eden katmanlarının kurlenme döngüleri sırasında eşit bir dağılım ile ısınması için kalıpların tasarımında serim yüzeylerinin kalınlıkları eşit tutulmuştur. Kalıp tasarımlarında parça seriminin yapıldığı yüzeyler altında 20 mm takım malzemesi kalacak şekilde çalışılmış, takımların alt kısımları boş bırakılarak otoklav içerisinde ısı transferinin eşit sağlanması hedeflenmiştir. Tüm test parçaları için tek yön olarak belirlenen serim yönü 0°, Şekil 4.11'de belirtilmiştir.



**Şekil 4.11.** Kalıp serim yönü ve kalınlığı

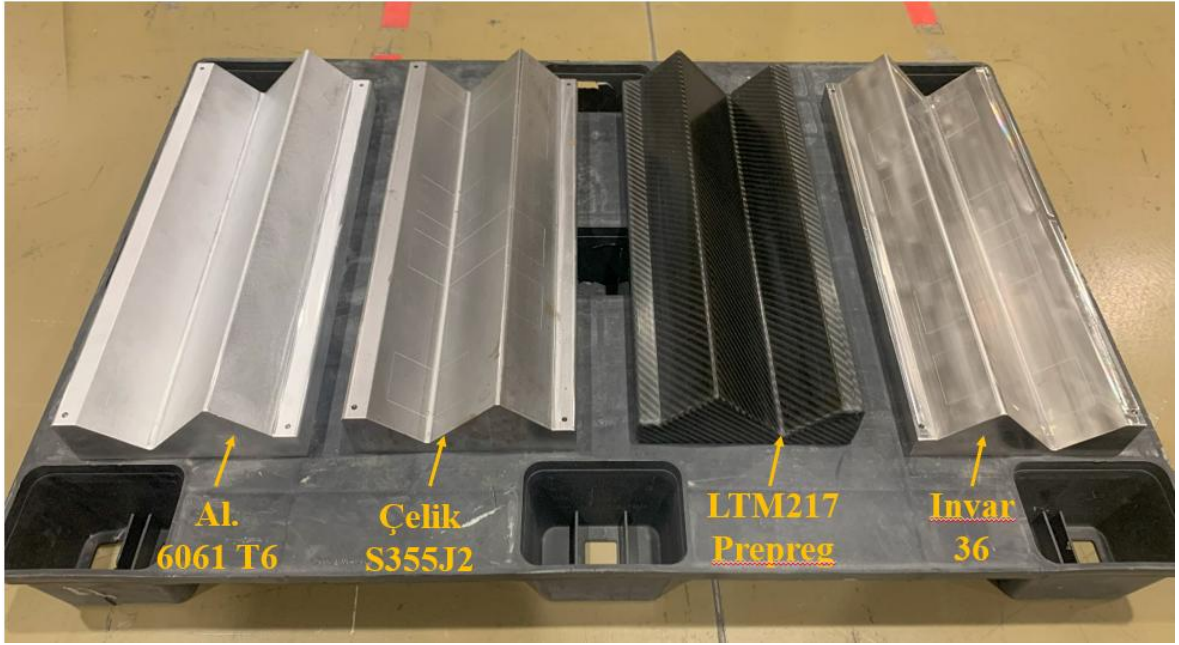
Test parçaları geometrilerine bağlı olarak parça kenar çizgileri her bir takım serim yüzeyi üzerine 0.2 mm genişlik ve 0.2 mm derinlikte işlenmiştir. Bu sayede ilgili alanlarda yapılan serimler, otoklav basıncı ile test parçaları üzerinde, parça sınırlarını belirleyici izler oluşturmaktadır. İzler dışında kalan fazla malzemeler de parça geometrisinin son halini elde edebilmek için kesilerek temizlenmektedir.

Parça kenar çizgilerinin serim yüzeylerine işlenmesine benzer şekilde serim yönlerinin tanımlanabilmesi için gerekli eksen bilgileri takımlar üzerine markalanmıştır (Şekil 4.12).

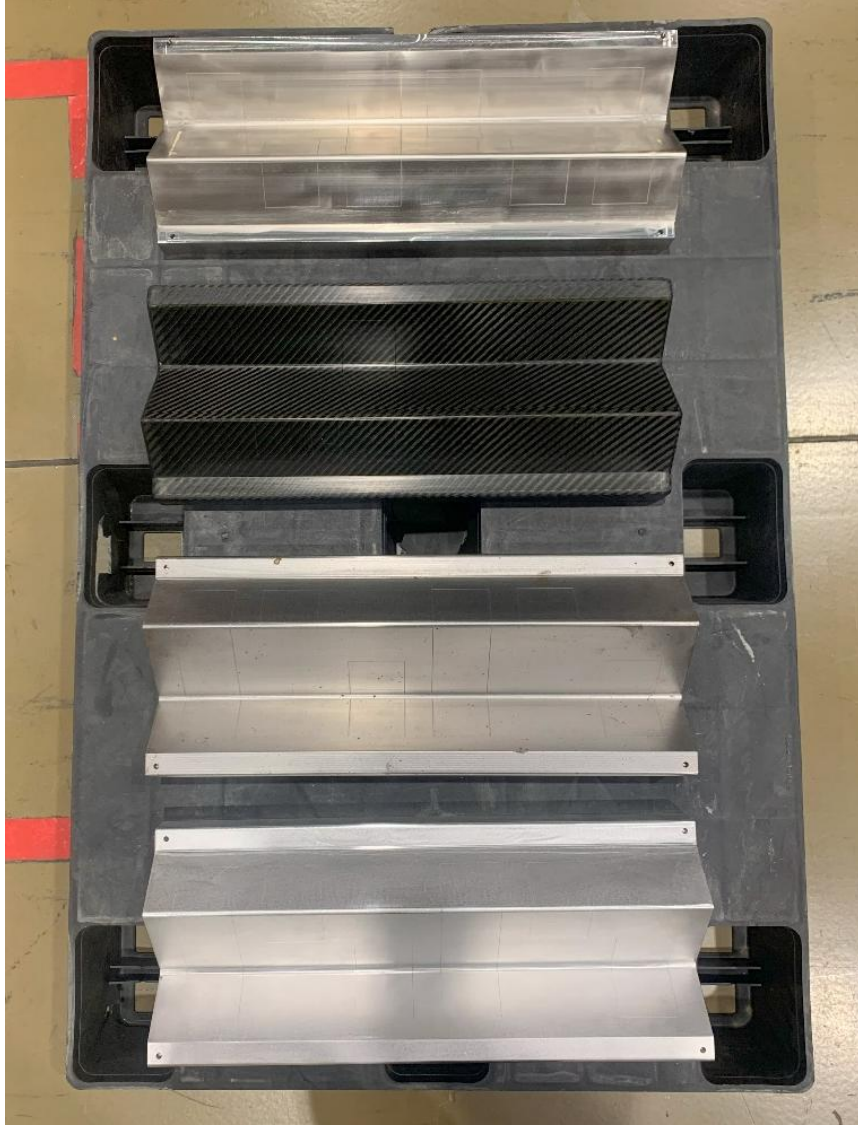


**Şekil 4.12.** Parça kenar çizgileri ve serim yönlerinin takımlar üzerinde markalanması

Üretimleri tamamlanan takımlar Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te gösterilmiştir.



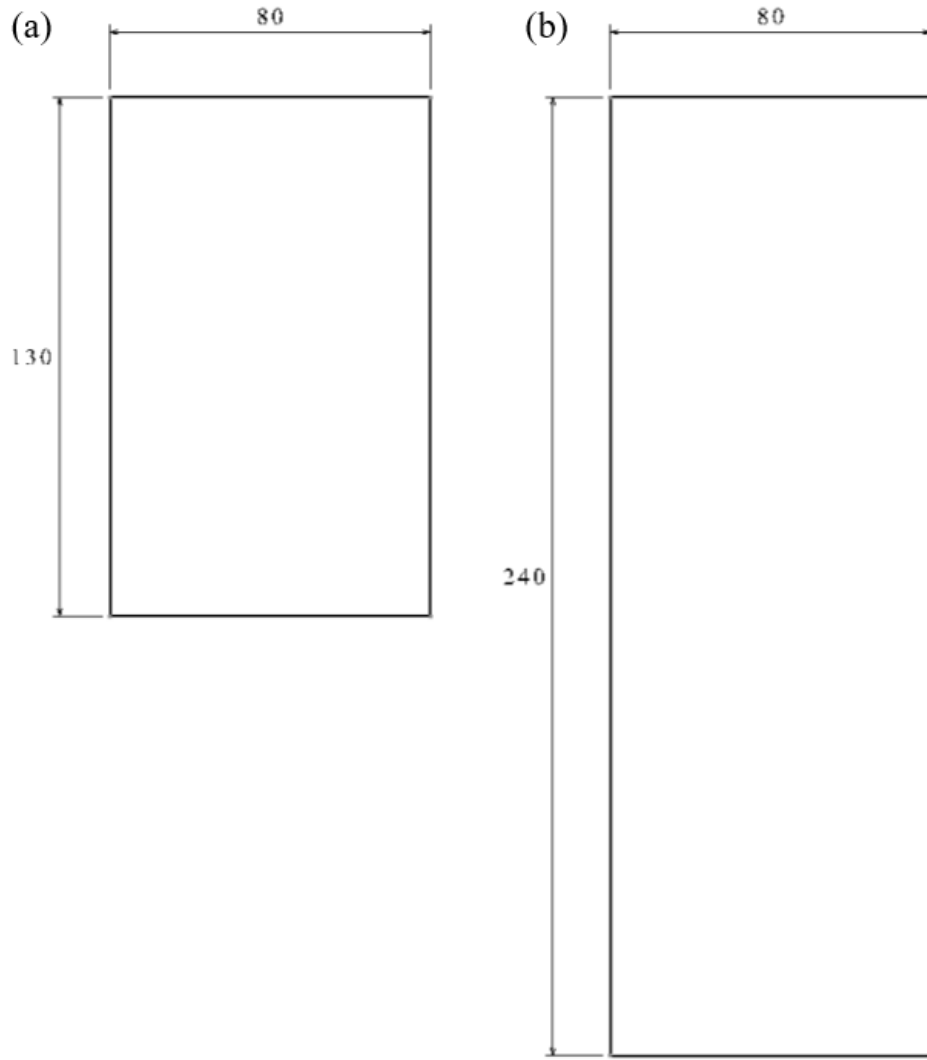
Şekil 4.13. T1, T2, T3 ve T4 kodlu takımlar (1)



Şekil 4.14. T1, T2, T3 ve T4 kodlu takımlar (2)

#### 4.3. Test Parçaları Üretimi Ön Hazırlık Aşaması

Bölüm 4.1 içinde tasarımları tanımlanan test parçalarının üretim faaliyetleri için Hexcel HexPly® 8552 epoksi reçine emdirilmiş, AS4 karbon fiberli hazır kumaşlar kullanılmıştır. Bu kumaşlar P1, P2 ve P3 parça serim işlemlerinde kullanılmak üzere hedeflenen son ürün boyutlarından daha büyük olacak şekilde açınım yapılarak hazırlanmıştır (Şekil 4.15). Amaç son üründe, hedeflenenden geometriden büyük üretilen parçaların, kenarlarının kesilerek istenen ölçülerin sağlanması, bu şekilde test parçası kenarlarında ortaya çıkabilecek düzensiz üretim hatalarının ölçüm sonuçlarına yansımalarının engellenmesidir.



**Şekil 4.15.** (a) P1 ve P2 kumaş açılımı (b) P3 kumaş açılımı

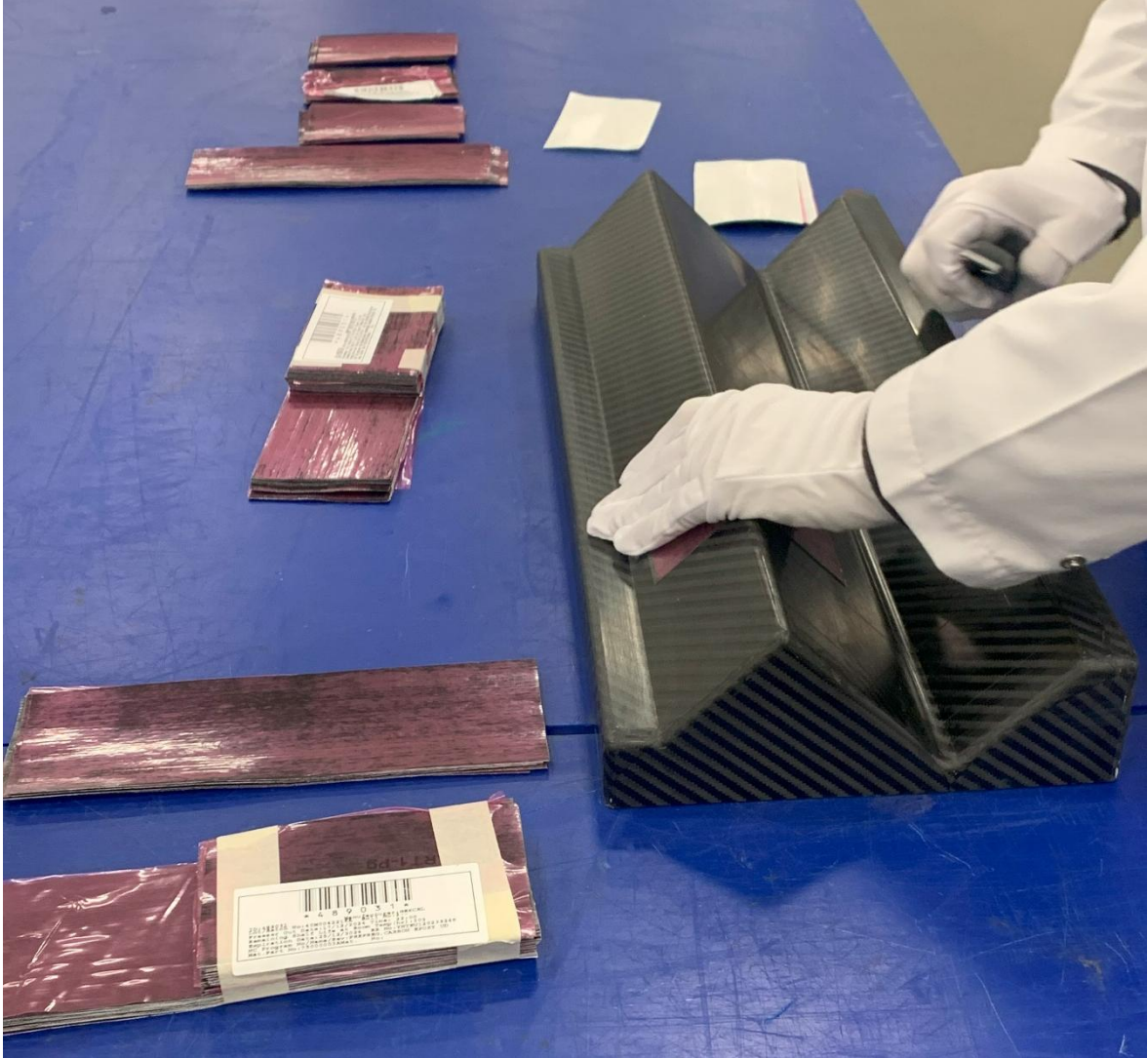




Şekil 4.16. P1, P2 ve P3 test parçaları üretiminde kullanılan AS4/8552 reçine emdirilmiş kumaşlar

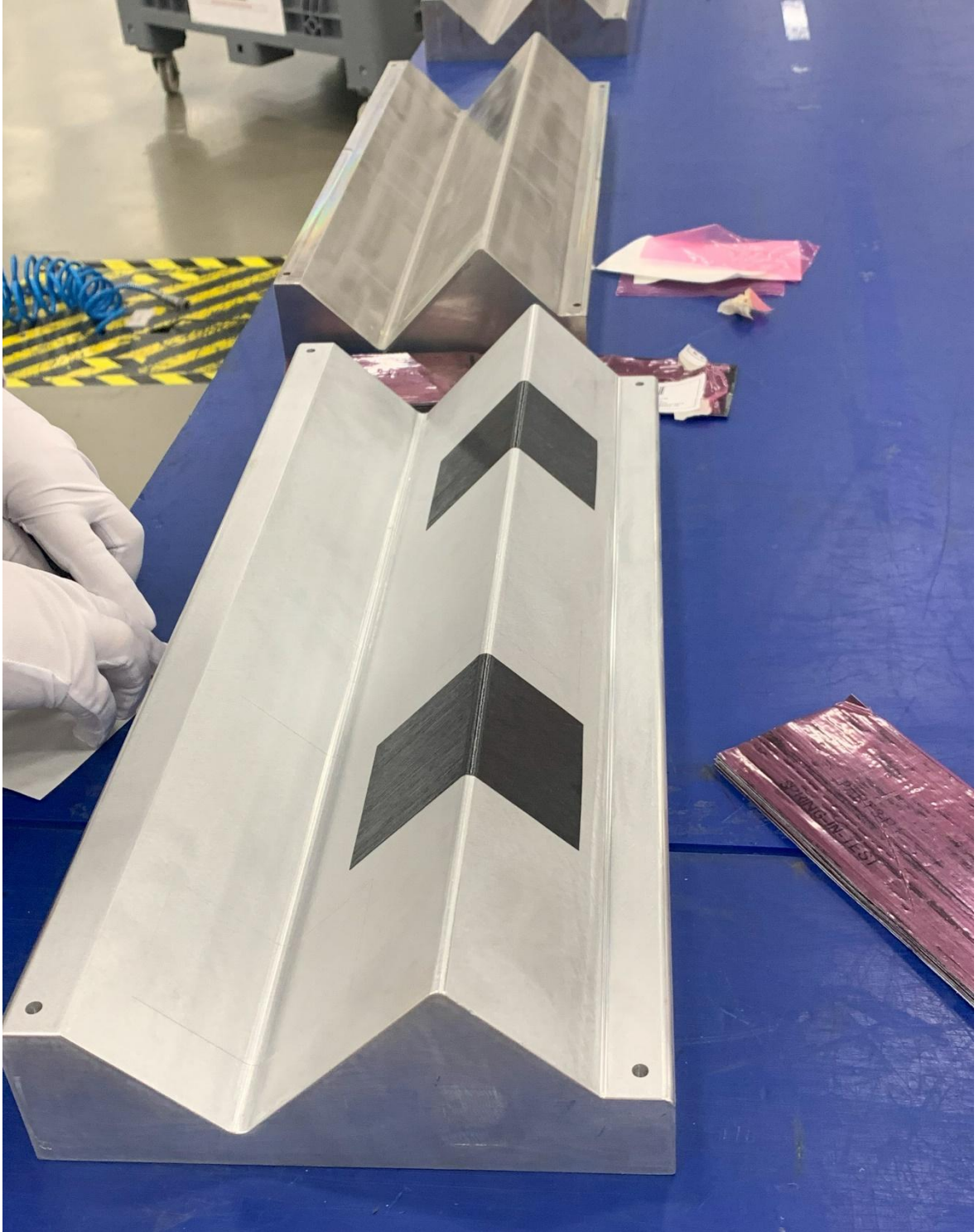
#### 4.4. Test Parçaları Serim İşlemleri

Bölüm 4.2 içinde tanımlanan kalıpların serim yüzeylerine parça katmanları serimi başlamadan ayırıcı solvent sürülerek takımlar fırınlanmıştır. Bölüm 4.4'te belirtilen reçine emdirilmiş hazır kumaşlar iklim kontrollü temiz oda içerisinde 20 °C sıcaklıkta konfigürasyonu  $[0]_8$  olacak şekilde el ile serilmiştir (Şekil 4.17 ve Şekil 4.18). Serim sırasında her bir takım üzerinde bulunan 0.2 mm derinlik ve 0.2 mm genişliğe sahip parça kenar çizgileri referans alınmıştır. Serilen katmanlar takım üzerinde her bir parça için çizilen kenar çizgilerinin dışında kalacak şekilde yerleştirilmiştir.



Şekil 4.17. Katmanların el ile serimi (1)





**Şekil 4.18.** Katmanların el ile serimi (2)

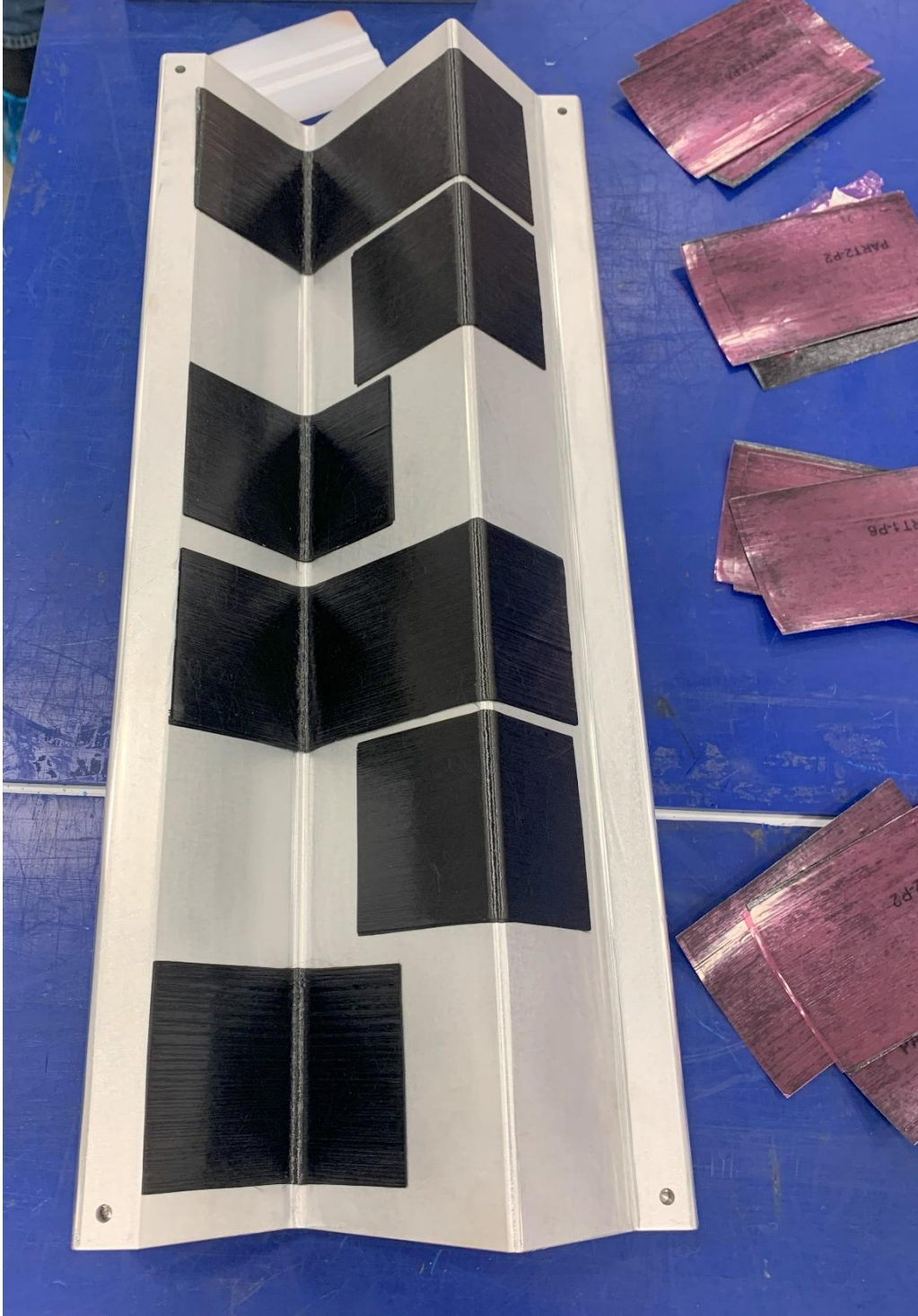
Serim sırasında, AS4/8552 malzeme üretici kataloğunda belirtilen uygulama esaslarına göre, ilk dört katman sonrasında katmanların birbirine yapışması ve katmanlar arasındaki boşlukların giderilmesi amacı ile 10 ila 15 dakika arasında vakum ile sıkıştırma

işlemi uygulanmıştır. Bu işlem sonrasında takip eden dört katmanın serimine devam edilmiştir.



Şekil 4.19. P1, P2 ve P3 test parçalarının takım üzerindeki pozisyonları (1)





Şekil 4.20. P1, P2 ve P3 test parçalarının takım üzerindeki pozisyonları (2)

Takım üzerinde tamamlanan serim işlemleri sonrasında (Şekil 4.19 ve Şekil 4.20), takımlar üzerinde test parçaları numaralandırması Tablo 4.3’de tanımlanmıştır (Şekil 4.21).

**Tablo 4.3.** Test parçaları numaralandırma

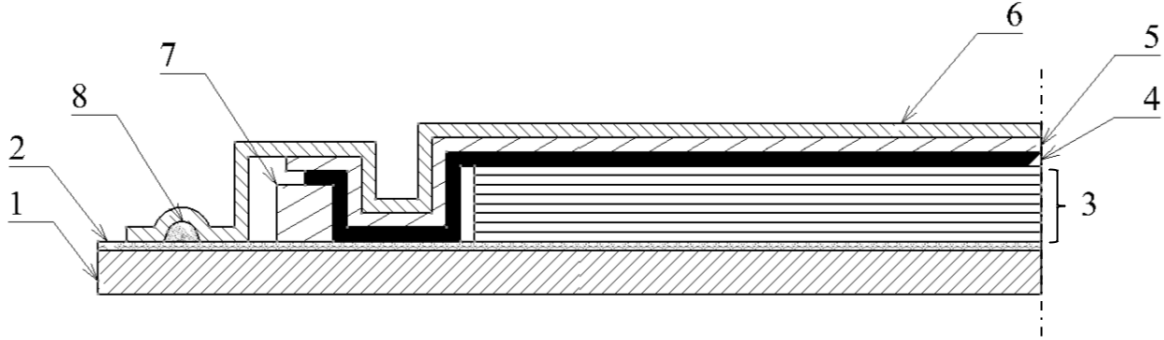
| Takım | Test Parçası |       |       |
|-------|--------------|-------|-------|
|       | P1           | P2    | P3    |
| T1    | T1-P1        | T1-P2 | T1-P3 |
| T2    | T2-P1        | T2-P2 | T2-P3 |
| T3    | T3-P1        | T3-P2 | T3-P3 |
| T4    | T4-P1        | T4-P2 | T4-P3 |



**Şekil 4.21.** T1, T2, T3 ve T4 kodlu takımlar üzerinde serim işlemleri tamamlanan P1, P2 ve P3 numaralı parçalar

#### 4.5. Vakum İçin Torbalama

Bölüm 4.4 içinde tariflendiği şekilde serim işlemleri tamamlanan test parçalarının, otoklava girmeden önce kalıp ile birlikte torbalaması yapılarak vakuma alınmıştır. Şekil 4.22’de belirtilen şematik gösterimde  $[0]_8$  konfigürasyonunda serimi yapılan test parçalarının torbalanma işlemi gösterilmiştir.



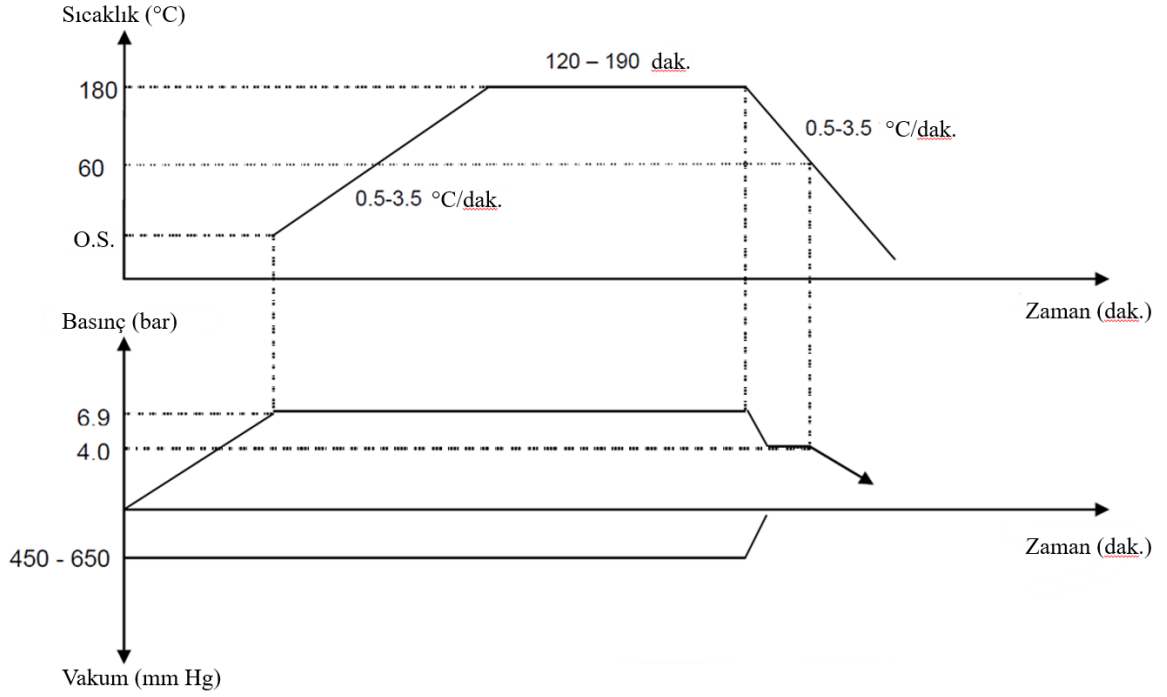
Şekil 4.22. Şematik vakum torbalaması

1. Kalıp (Serim Takımı)
2. Ayırıcı
3.  $[0]_8$  konfigürasyonunda serilen katmanlar
4. Ayırıcı film
5. Nefes alabilen kumaş
6. Naylon torba
7. Nefes alabilen kumaş (kenar)
8. Vakum contası

Torba içerisinde kalan hacme -450 ila -650 mm Hg aralığında (yaklaşık -0.6 bar ile -0.8 bar arası) vakum uygulanmıştır.

#### 4.6. Kürleme Süreci

Serimi ve sonrasında torbalaması gerçekleştirilen test parçaları takımlar ile birlikte otoklav içerisinde kürlenmeye bırakılmıştır. Zamana bağlı kürlenme sıcaklık değişimi ve karşılık gelen otoklav basınç değerleri Şekil 4.23’de belirtilmiştir.



Şekil 4.23. Kürlenme döngüsü sıcaklık ve basınç değerleri

Parça katman sayıları göz önüne alındığında kürlenme döngüsü tek basamaklı olacak şekilde seçilmiştir. Oda sıcaklığında ortalama -0.7 bar vakum altında bulunan parçalar, otoklav içerisinde yaklaşık 7 bar ilave basınç altına alınmış ve ortalama 2 °C/dak. olacak şekilde ısıtılarak en yüksek kürlenme sıcaklığı olan 180 °C'ye ulaştırılmıştır. Bu sıcaklıkta yaklaşık 180 dakika tutulduktan sonra ortalama 2 °C/dak. oranı ile oda sıcaklığına ulaştırılmıştır. Bu evrede otoklav basıncı kademeli olarak atmosferik basınca düşürülmüştür.

#### 4.7. Kalıptan Çıkarma

Oda sıcaklığına ulaşan kalıplardan test parçaları torbaların kaldırılmasını takiben sökülmüş ve son haline getirilmek için kenar kesimleri, takımların üzerinde bulunan kenar çizgilerinin parça üzerinde bıraktığı izlerden referans alınarak kesilmiştir. Test parçaları Tablo 4.3'de belirtilen isimlendirmeye uygun şekilde numaralandırılmıştır. Her bir test parçasının üzerindeki hataları minimize edebilmek için her parça numarasından iki adet üretildiği için parça numaraları sonuna .1 ve .2 ibareleri eklenmiştir. Örneğin T1-P1 parçasından üretilen iki numune T1.P1.1 ve T1.P1.2 olarak markalanmıştır (Şekil 4.24).





**Şekil 4.24.** Üretilen test parçaları ve markalamaları

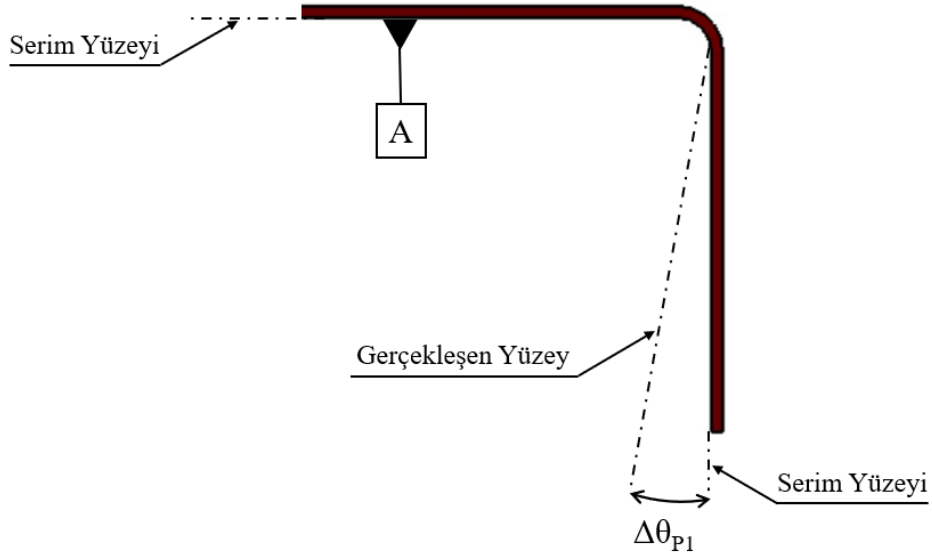
#### 4.8. Test Parçalarının Ölçümü

Üretim faaliyetleri tamamlanan parçaların, gerçekleşen deformasyonlarının ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler FARO Quantum marka ölçme kolu (Şekil 4.25) ile iklim kontrollü bir ortamda 23.6 °C ile 23.8 °C aralığında gerçekleştirilmiştir.

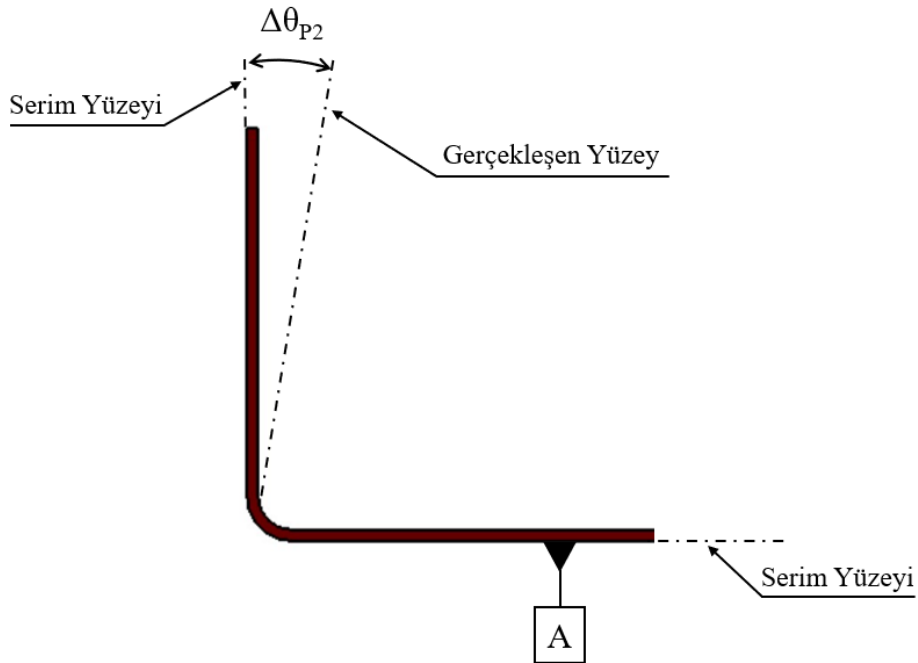


**Şekil 4.25.** FARO Quantum ölçme kolu

P1 ve P2 numaralı parçalar için bir flanşın takım ile temas yüzeyi referans yüzey (datum) olarak seçilmiş, diğer flanşın takım ile temas yüzeyinin, referans yüzeye yaptığı açı değerlendirilmiştir (Şekil 4.26 ve Şekil 4.27). Bu sayede ölçüm sonuçları parça kalınlık dalgalanmalarından bağımsız hale getirilmiştir.

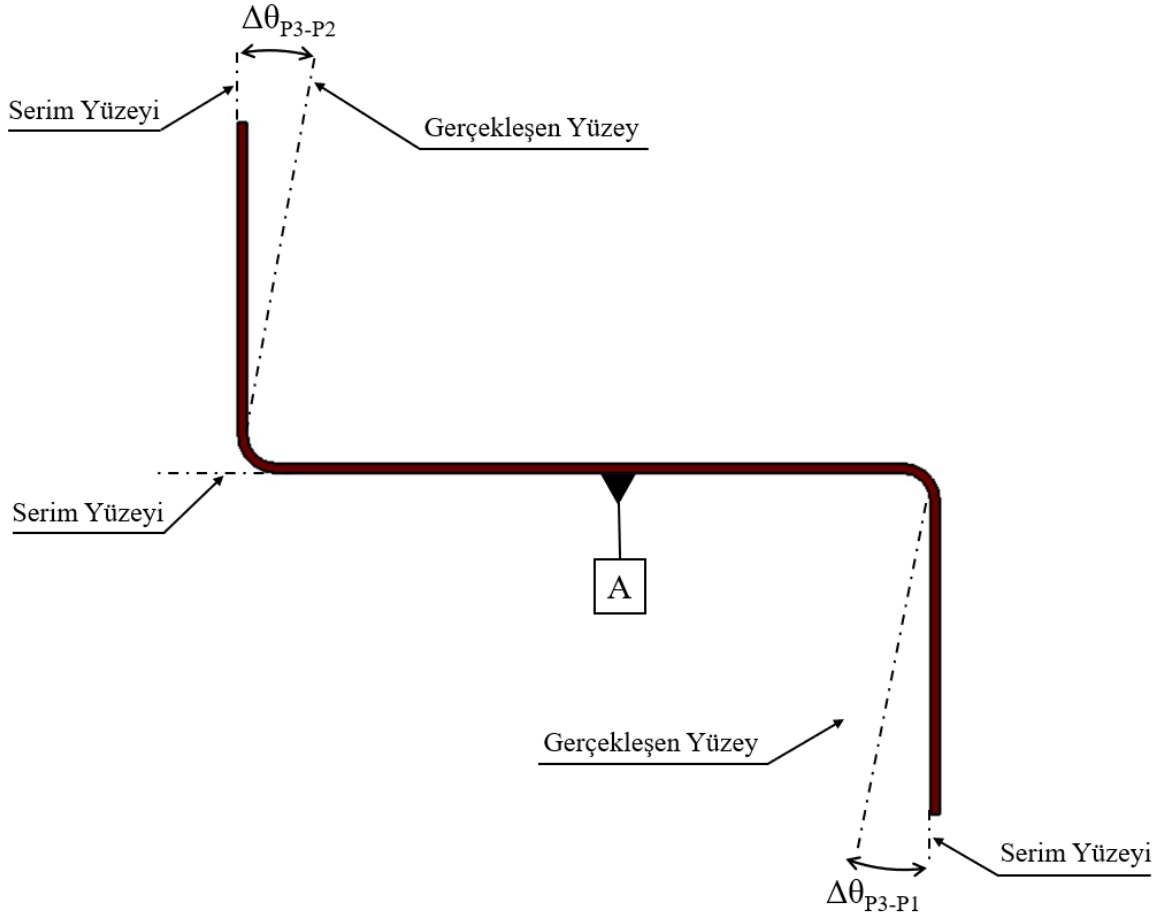


Şekil 4.26. P1 numaralı test parçalarının ölçüm metodolojisi



Şekil 4.27. P2 numaralı test parçalarının ölçüm metodolojisi

P3 parçası için, Şekil 4.28’de belirtilen “A” datum yüzeyi referans olarak kabul edilmiş ve diğer iki flanşın takım ile temas ettiği yüzeyleri ile referans yüzey arasındaki açı değerlendirilmiştir. Bu sayede ölçüm sonuçları parça kalınlık dalgalanmalarından bağımsız hale getirilmiştir.



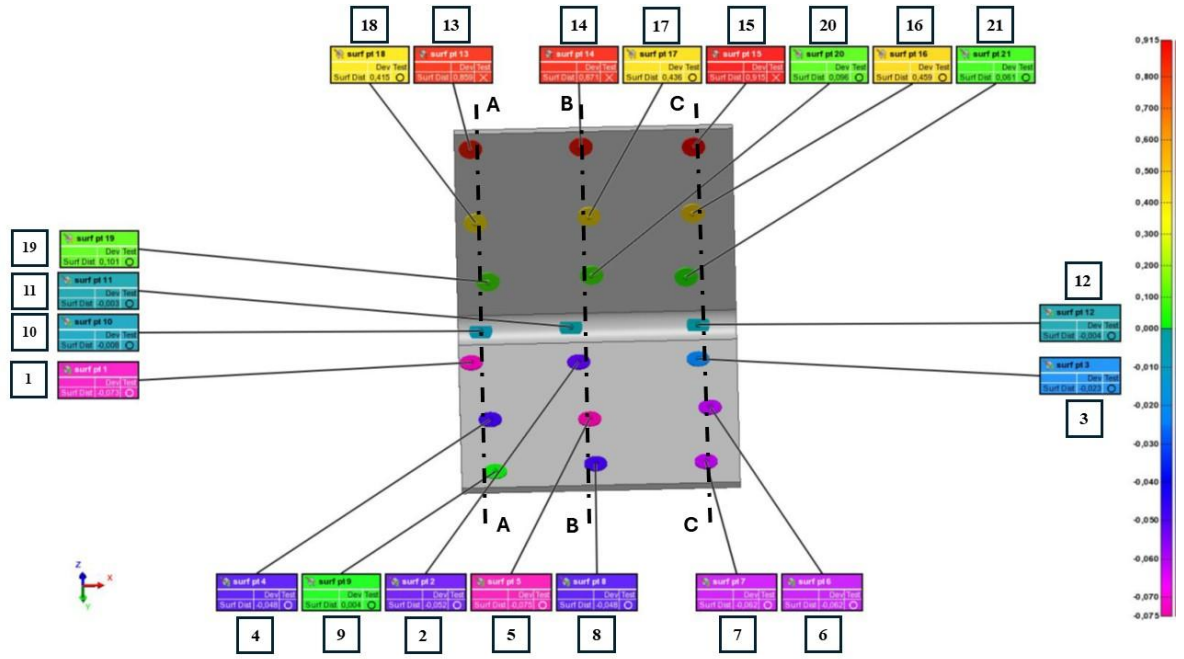
Şekil 4.28. P3 numaralı test parçalarının ölçüm metodolojisi

Polyworks 2022 yazılımı ile yukarıda belirtilen ölçüm metodolojilerine uygun olarak ölçüm raporları hazırlanmıştır. Parçaların üzerinde ölçüm alınan noktaların belirtildiği şekiller ile bu noktaların tasarım geometrilerinden farklarının milimetre cinsinden değerlerinin verildiği tablolar, takımlar ve üzerinde üretilen parça tiplerine göre Tablo 4.4’de adreslenmiştir.

**Tablo 4.4.** Test parçaları ölçüm noktaları ve deformasyon değerleri

| Takım | Test Parçası       |                          |                    |                          |                    |                          |
|-------|--------------------|--------------------------|--------------------|--------------------------|--------------------|--------------------------|
|       | P1                 |                          | P2                 |                          | P3                 |                          |
|       | Ölçüm<br>Noktaları | Deformasyon<br>Değerleri | Ölçüm<br>Noktaları | Deformasyon<br>Değerleri | Ölçüm<br>Noktaları | Deformasyon<br>Değerleri |
| T1    | Şekil 4.29         | Tablo 4.5                | Şekil 4.31         | Tablo 4.7                | Şekil 4.33         | Tablo 4.9                |
|       | Şekil 4.30         | Tablo 4.6                | Şekil 4.32         | Tablo 4.8                | Şekil 4.34         | Tablo 4.10               |
| T2    | Şekil 4.35         | Tablo 4.11               | Şekil 4.37         | Tablo 4.13               | Şekil 4.39         | Tablo 4.15               |
|       | Şekil 4.36         | Tablo 4.12               | Şekil 4.38         | Tablo 4.14               | Şekil 4.40         | Tablo 4.16               |
|       | Şekil 4.41         | Tablo 4.17               | Şekil 4.43         | Tablo 4.19               |                    | Tablo 4.21               |
| T3    | Şekil 4.42         | Tablo 4.18               | Şekil 4.44         | Tablo 4.20               | Şekil 4.45         | Tablo 4.22               |
|       |                    |                          |                    |                          | Şekil 4.46         |                          |
|       | Şekil 4.47         | Tablo 4.23               | Şekil 4.49         | Tablo 4.25               |                    | Tablo 4.27               |
| T4    | Şekil 4.48         | Tablo 4.24               | Şekil 4.50         | Tablo 4.26               | Şekil 4.51         | Tablo 4.28               |
|       |                    |                          |                    |                          | Şekil 4.52         |                          |

Tüm test parçaları için ölçümler sonucunda elde edilen deformasyon değerleri temel alınarak, her bir parça üzerinde üç kesitte açısıl içe kapanma değerleri ilişkili tablolarda belirtilmiştir.

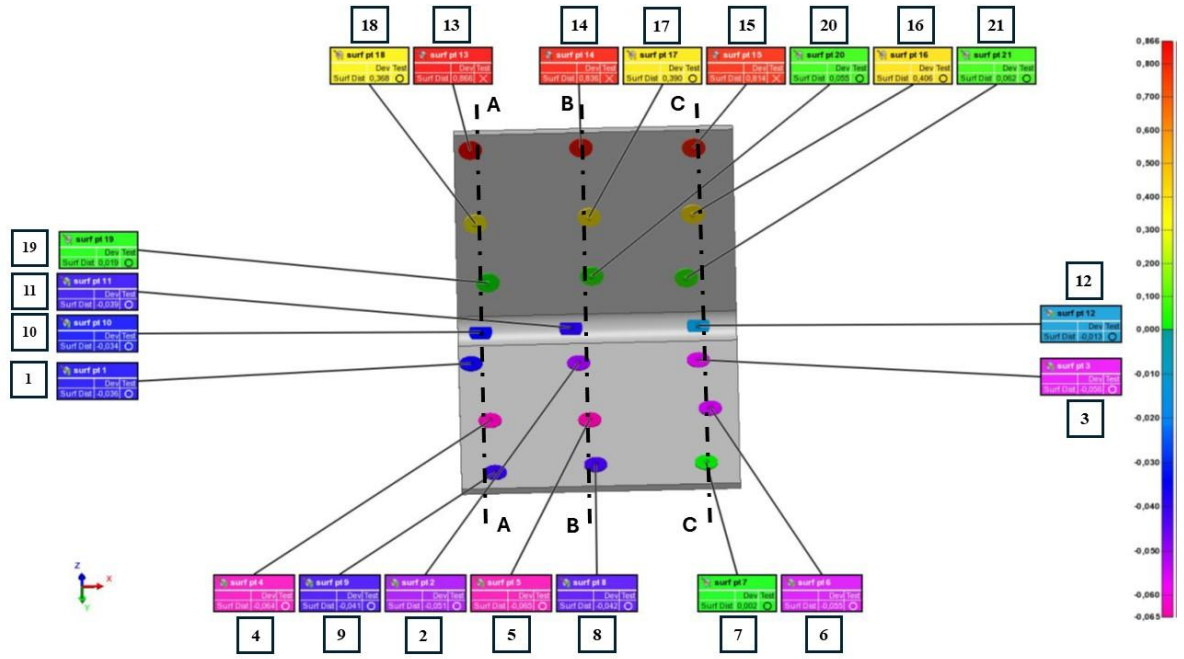


Şekil 4.29. T1.P1.1 numaralı parça ölçüm noktaları

Tablo 4.5. T1.P1.1 numaralı parça ölçüm noktaları deformasyonları

| Parça No. | Nokta        | Sapma* (mm)  | Nokta        | Sapma* (mm) |
|-----------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| T1.P1.1   | 1            | -0,073       | 12           | -0,004      |
|           | 2            | -0,052       | 13           | 0,859       |
|           | 3            | -0,023       | 14           | 0,871       |
|           | 4            | -0,048       | 15           | 0,915       |
|           | 5            | -0,075       | 16           | 0,459       |
|           | 6            | -0,062       | 17           | 0,436       |
|           | 7            | -0,062       | 18           | 0,415       |
|           | 8            | -0,048       | 19           | 0,101       |
|           | 9            | 0,004        | 20           | 0,096       |
|           | 10           | -0,008       | 21           | 0,061       |
|           | 11           | -0,003       |              |             |
| Kesit     | AA = -1.307° | BB = -1.179° | CC = -1.482° |             |

\* (Negatif değerler parça modelinin içine doğru (girişim) olan deformasyonları, pozitif değerler ise parça modelinin dışına doğru (uzaklaşma) olan deformasyonları tanımlamaktadır.)

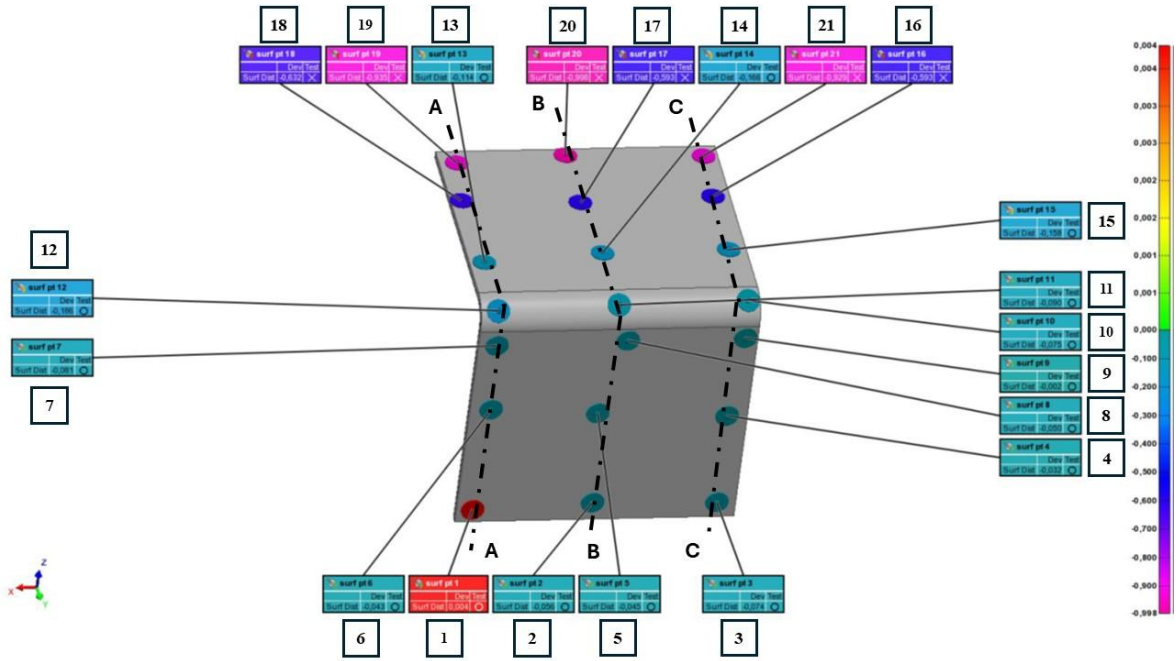


Şekil 4.30. T1.P1.2 numaralı parça ölçüm noktaları

Tablo 4.6. T1.P1.2 numaralı parça ölçüm noktaları deformasyonları

| Parça No. | Nokta        | Sapma* (mm)  | Nokta        | Sapma* (mm) |
|-----------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| T1.P1.2   | 1            | -0,036       | 12           | -0,01       |
|           | 2            | -0,051       | 13           | 0,866       |
|           | 3            | -0,056       | 14           | 0,836       |
|           | 4            | -0,064       | 15           | 0,814       |
|           | 5            | -0,065       | 16           | 0,406       |
|           | 6            | -0,055       | 17           | 0,390       |
|           | 7            | 0,002        | 18           | 0,368       |
|           | 8            | -0,042       | 19           | 0,019       |
|           | 9            | -0,041       | 20           | 0,055       |
|           | 10           | -0,034       | 21           | 0,062       |
|           | 11           | -0,039       |              |             |
| Kesit     | AA = -1.470° | BB = -1.146° | CC = -1.339° |             |

\* (Negatif değerler parça modelinin içine doğru (girişim) olan deformasyonları, pozitif değerler ise parça modelinin dışına doğru (uzaklaşma) olan deformasyonları tanımlamaktadır.)

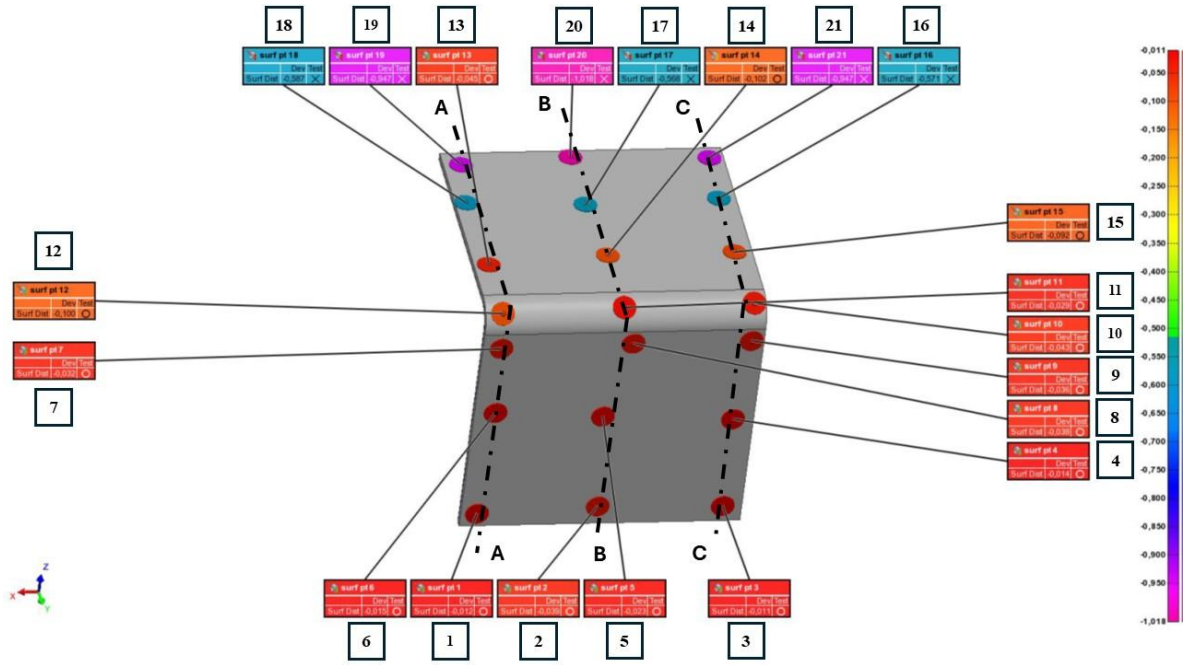


Şekil 4.31. T1.P2.1 numaralı parça ölçüm noktaları

Tablo 4.7. T1.P2.1 numaralı parça ölçüm noktaları deformasyonları

| Parça No. | Nokta        | Sapma* (mm)  | Nokta        | Sapma* (mm) |
|-----------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| T1.P2.1   | 1            | 0,004        | 12           | -0,186      |
|           | 2            | -0,056       | 13           | -0,114      |
|           | 3            | -0,074       | 14           | -0,166      |
|           | 4            | -0,032       | 15           | -0,158      |
|           | 5            | -0,045       | 16           | -0,593      |
|           | 6            | -0,043       | 17           | -0,593      |
|           | 7            | -0,081       | 18           | -0,632      |
|           | 8            | -0,050       | 19           | -0,935      |
|           | 9            | -0,002       | 20           | -0,998      |
|           | 10           | -0,075       | 21           | -0,929      |
|           | 11           | -0,090       |              |             |
| Kesit     | AA = -1.427° | BB = -1.413° | CC = -1.463° |             |

\* (Negatif değerler parça modelinin içine doğru (girişim) olan deformasyonları, pozitif değerler ise parça modelinin dışına doğru (uzaklaşma) olan deformasyonları tanımlamaktadır.)



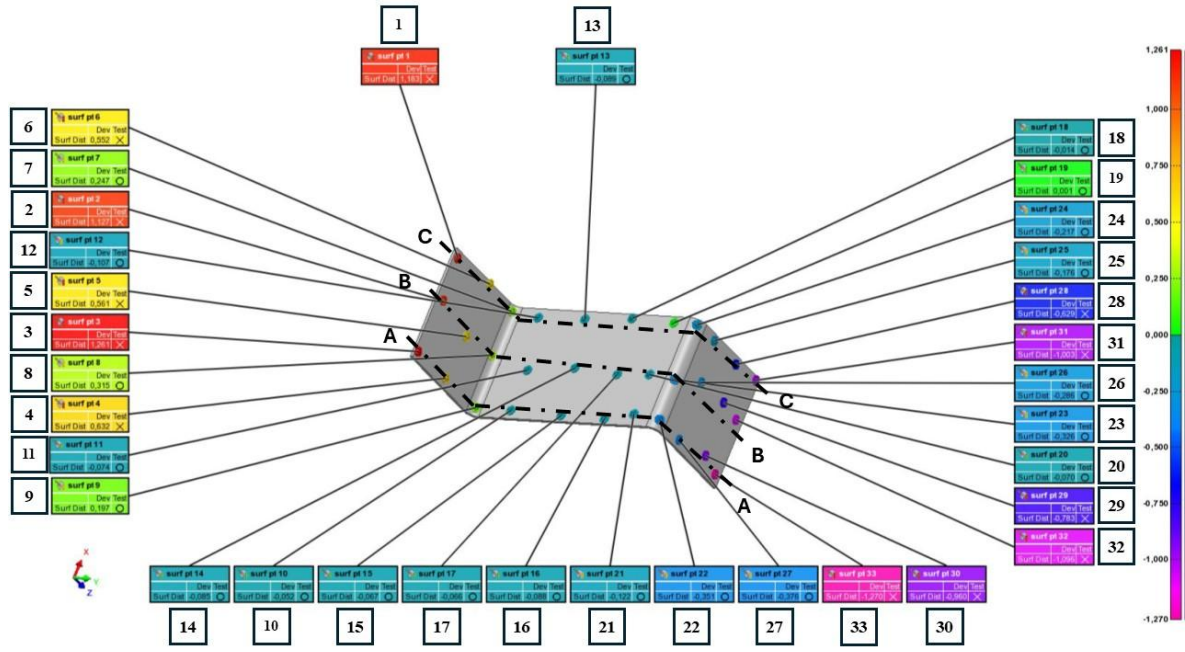
Şekil 4.32. T1.P2.2 numaralı parça ölçüm noktaları

Tablo 4.8. T1.P2.2 numaralı parça ölçüm noktaları deformasyonları

| Parça No. | Nokta        | Sapma* (mm)  | Nokta        | Sapma* (mm) |
|-----------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| T1.P2.2   | 1            | -0,012       | 12           | -0,100      |
|           | 2            | -0,039       | 13           | -0,045      |
|           | 3            | -0,011       | 14           | -0,102      |
|           | 4            | -0,014       | 15           | -0,092      |
|           | 5            | -0,023       | 16           | -0,571      |
|           | 6            | -0,015       | 17           | -0,568      |
|           | 7            | -0,032       | 18           | -0,587      |
|           | 8            | -0,038       | 19           | -0,947      |
|           | 9            | -0,036       | 20           | -1,018      |
|           | 10           | -0,043       | 21           | -0,947      |
|           | 11           | -0,029       |              |             |
| Kesit     | AA = -1.490° | BB = -1.573° | CC = -1.470° |             |

\* (Negatif değerler parça modelinin içine doğru (girişim) olan deformasyonları, pozitif değerler ise parça modelinin dışına doğru (uzaklaşma) olan deformasyonları tanımlamaktadır.)



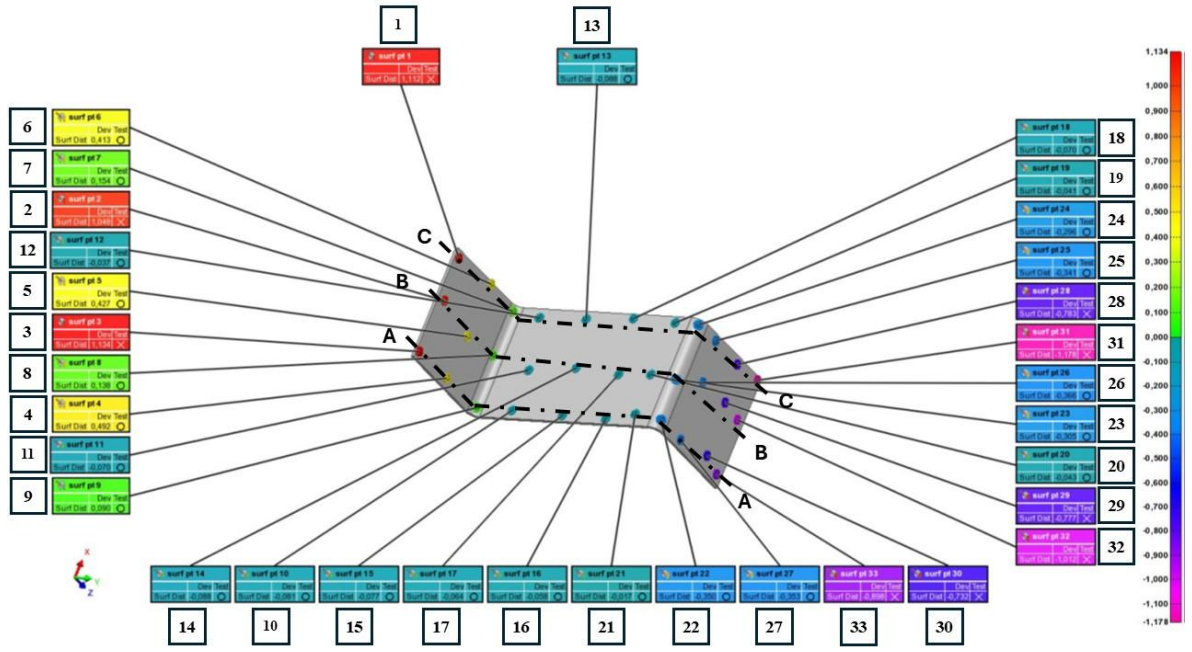


Şekil 4.33. T1.P3.1 numaralı parça ölçüm noktaları

Tablo 4.9. T1.P3.1 numaralı parça ölçüm noktaları deformasyonları

| Parça No.         | Nokta        | Sapma*<br>(mm) | Nokta        | Sapma*<br>(mm) | Nokta        | Sapma*<br>(mm) |
|-------------------|--------------|----------------|--------------|----------------|--------------|----------------|
| T1.P3.1           | 1            | 1,183          | 12           | -0,107         | 23           | -0,326         |
|                   | 2            | 1,127          | 13           | -0,089         | 24           | -0,217         |
|                   | 3            | 1,261          | 14           | -0,085         | 25           | -0,176         |
|                   | 4            | 0,632          | 15           | -0,067         | 26           | -0,286         |
|                   | 5            | 0,561          | 16           | -0,088         | 27           | -0,376         |
|                   | 6            | 0,552          | 17           | -0,066         | 28           | -0,629         |
|                   | 7            | 0,247          | 18           | -0,014         | 29           | -0,783         |
|                   | 8            | 0,315          | 19           | 0,001          | 30           | -0,960         |
|                   | 9            | 0,197          | 20           | -0,070         | 31           | -1,003         |
|                   | 10           | -0,052         | 21           | -0,122         | 32           | -1,096         |
|                   | 11           | -0,074         | 22           | -0,351         | 33           | -1,270         |
| Kesit erkek-kalıp | AA = -1.406° |                | BB = -1.262° |                | CC = -1.236° |                |
| Kesit dişi-kalıp  | AA = -1.678° |                | BB = -1.430° |                | CC = -1.296° |                |

\* (Negatif değerler parça modelinin içine doğru (girişim) olan deformasyonları, pozitif değerler ise parça modelinin dışına doğru (uzaklaşma) olan deformasyonları tanımlamaktadır.)

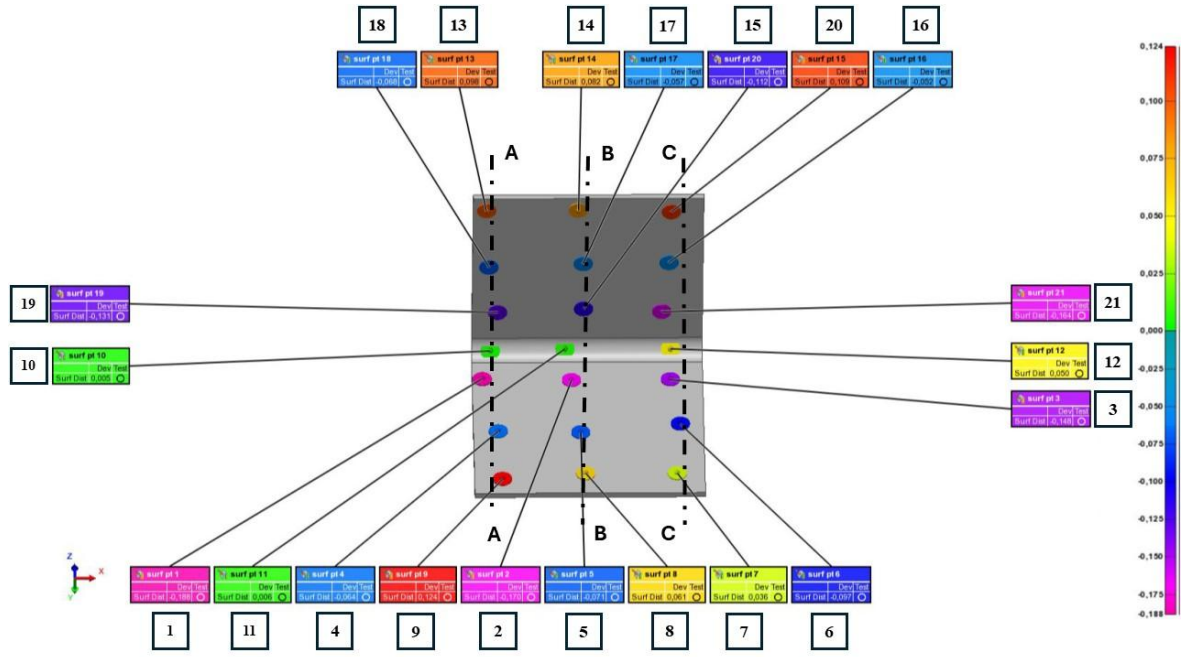


Şekil 4.34. T1.P3.2 numaralı parça ölçüm noktaları

Tablo 4.10. T1.P3.2 numaralı parça ölçüm noktaları deformasyonları

| Parça No.         | Nokta        | Sapma*<br>(mm) | Nokta        | Sapma*<br>(mm) | Nokta        | Sapma*<br>(mm) |
|-------------------|--------------|----------------|--------------|----------------|--------------|----------------|
| T1.P3.2           | 1            | 1,112          | 12           | -0,037         | 23           | -0,305         |
|                   | 2            | 1,048          | 13           | -0,088         | 24           | -0,296         |
|                   | 3            | 1,134          | 14           | -0,088         | 25           | -0,341         |
|                   | 4            | 0,492          | 15           | -0,077         | 26           | -0,366         |
|                   | 5            | 0,427          | 16           | -0,058         | 27           | -0,353         |
|                   | 6            | 0,413          | 17           | -0,064         | 28           | -0,783         |
|                   | 7            | 0,154          | 18           | -0,070         | 29           | -0,777         |
|                   | 8            | 0,138          | 19           | -0,041         | 30           | -0,732         |
|                   | 9            | 0,090          | 20           | -0,043         | 31           | -1,178         |
|                   | 10           | -0,081         | 21           | -0,017         | 32           | -1,012         |
|                   | 11           | -0,070         | 22           | -0,350         | 33           | -0,898         |
| Kesit erkek-kalıp | AA = -1.456° |                | BB = -1.372° |                | CC = -1.305° |                |
| Kesit dişi-kalıp  | AA = -1.104° |                | BB = -1.207° |                | CC = -1.297° |                |

\* (Negatif değerler parça modelinin içine doğru (girişim) olan deformasyonları, pozitif değerler ise parça modelinin dışına doğru (uzaklaşma) olan deformasyonları tanımlamaktadır.)

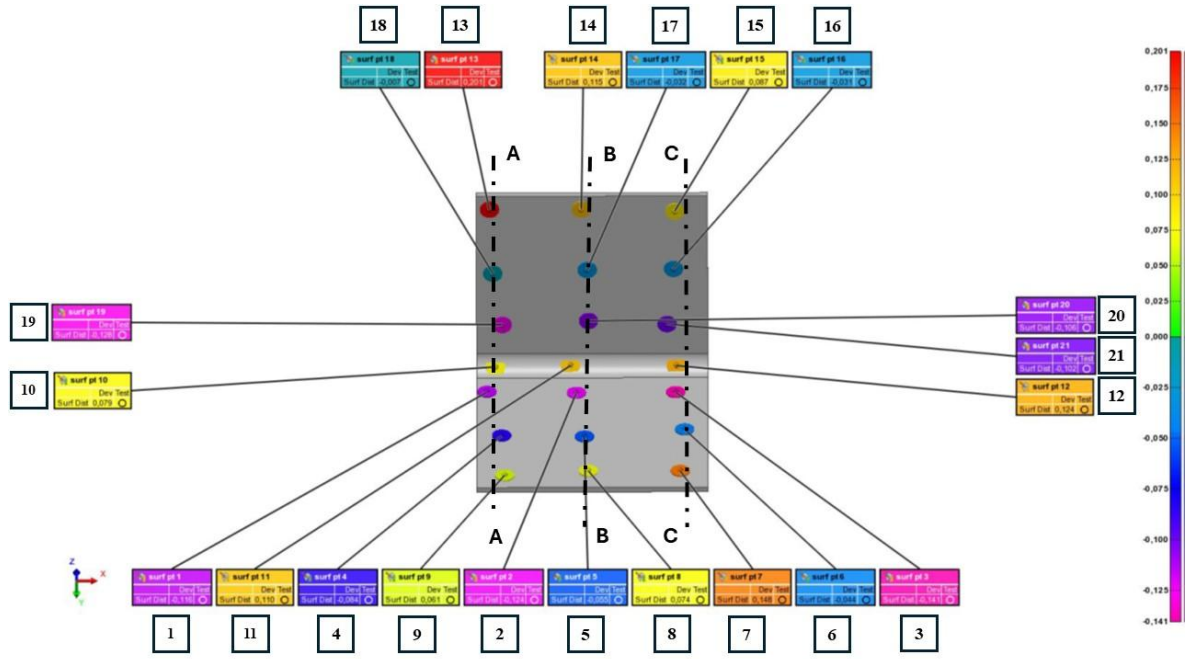


Şekil 4.35. T2.P1.1 numaralı parça ölçüm noktaları

Tablo 4.11. T2.P1.1 numaralı parça ölçüm noktaları deformasyonları

| Parça No. | Nokta        | Sapma* (mm)  | Nokta        | Sapma* (mm) |
|-----------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| T2.P1.1   | 1            | -0,188       | 12           | 0,050       |
|           | 2            | -0,170       | 13           | 0,098       |
|           | 3            | -0,148       | 14           | 0,082       |
|           | 4            | -0,064       | 15           | 0,109       |
|           | 5            | -0,071       | 16           | -0,052      |
|           | 6            | -0,097       | 17           | -0,057      |
|           | 7            | 0,036        | 18           | -0,068      |
|           | 8            | 0,061        | 19           | -0,131      |
|           | 9            | 0,124        | 20           | -0,112      |
|           | 10           | 0,005        | 21           | -0,164      |
|           | 11           | 0,006        |              |             |
| Kesit     | AA = -1.219° | BB = -0.938° | CC = -0.887° |             |

\* (Negatif değerler parça modelinin içine doğru (girişim) olan deformasyonları, pozitif değerler ise parça modelinin dışına doğru (uzaklaşma) olan deformasyonları tanımlamaktadır.)

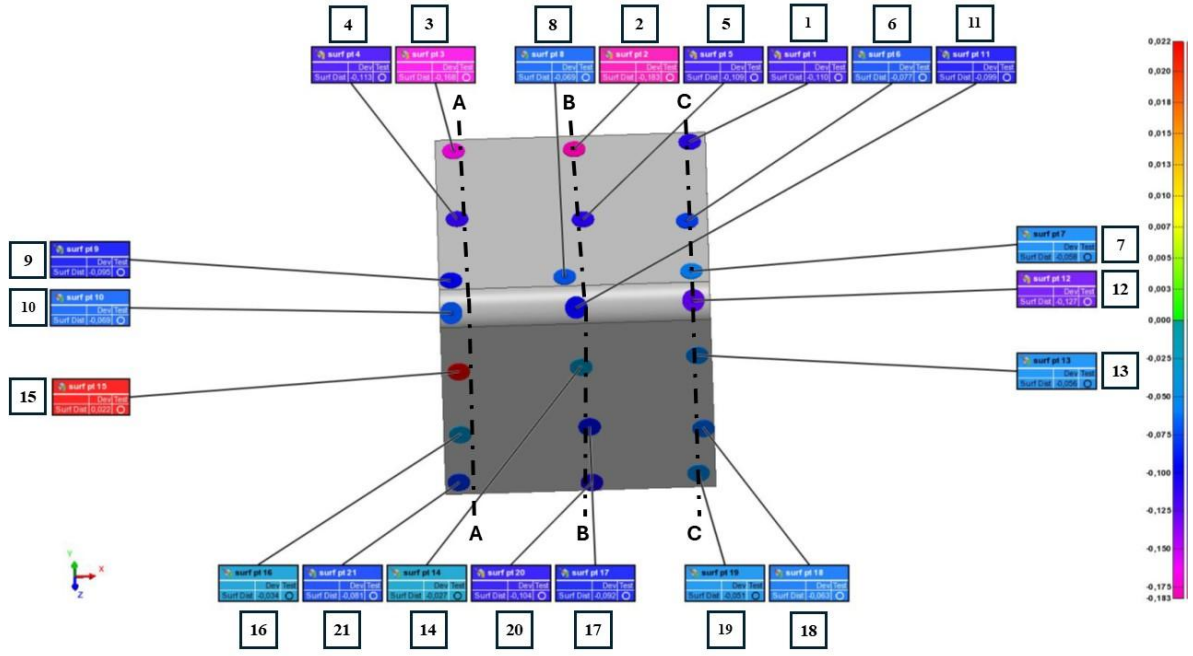


Şekil 4.36. T2.P1.2 numaralı parça ölçüm noktaları

Tablo 4.12. T2.P1.2 numaralı parça ölçüm noktaları deformasyonları

| Parça No. | Nokta        | Sapma* (mm)  | Nokta        | Sapma* (mm) |
|-----------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| T2.P1.2   | 1            | -0,116       | 12           | 0,124       |
|           | 2            | -0,124       | 13           | 0,201       |
|           | 3            | -0,141       | 14           | 0,115       |
|           | 4            | -0,084       | 15           | 0,087       |
|           | 5            | -0,055       | 16           | -0,031      |
|           | 6            | -0,044       | 17           | -0,032      |
|           | 7            | 0,148        | 18           | -0,007      |
|           | 8            | 0,074        | 19           | -0,128      |
|           | 9            | 0,061        | 20           | -0,106      |
|           | 10           | 0,079        | 21           | -0,102      |
|           | 11           | 0,110        |              |             |
| Kesit     | AA = -0.923° | BB = -1.128° | CC = -1.211° |             |

\* (Negatif değerler parça modelinin içine doğru (girişim) olan deformasyonları, pozitif değerler ise parça modelinin dışına doğru (uzaklaşma) olan deformasyonları tanımlamaktadır.)

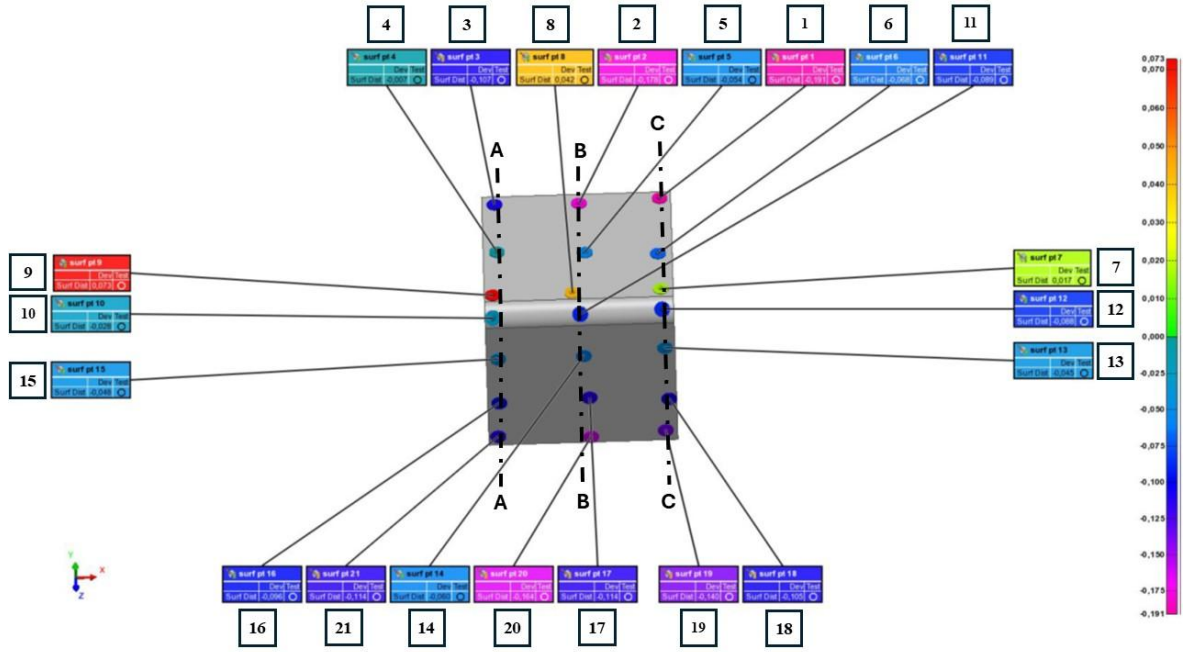


Şekil 4.37. T2.P2.1 numaralı parça ölçüm noktaları

Tablo 4.13. T2.P2.1 numaralı parça ölçüm noktaları deformasyonları

| Parça No. | Nokta        | Sapma* (mm)  | Nokta        | Sapma* (mm) |
|-----------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| T2.P2.1   | 1            | -0,110       | 12           | -0,127      |
|           | 2            | -0,183       | 13           | -0,056      |
|           | 3            | -0,168       | 14           | -0,027      |
|           | 4            | -0,113       | 15           | 0,022       |
|           | 5            | -0,109       | 16           | -0,034      |
|           | 6            | -0,077       | 17           | -0,092      |
|           | 7            | -0,058       | 18           | -0,063      |
|           | 8            | -0,069       | 19           | -0,051      |
|           | 9            | -0,095       | 20           | -0,104      |
|           | 10           | -0,069       | 21           | -0,081      |
|           | 11           | -0,099       |              |             |
| Kesit     | AA = -1.133° | BB = -1.129° | CC = -1.137° |             |

\* (Negatif değerler parça modelinin içine doğru (girişim) olan deformasyonları, pozitif değerler ise parça modelinin dışına doğru (uzaklaşma) olan deformasyonları tanımlamaktadır.)



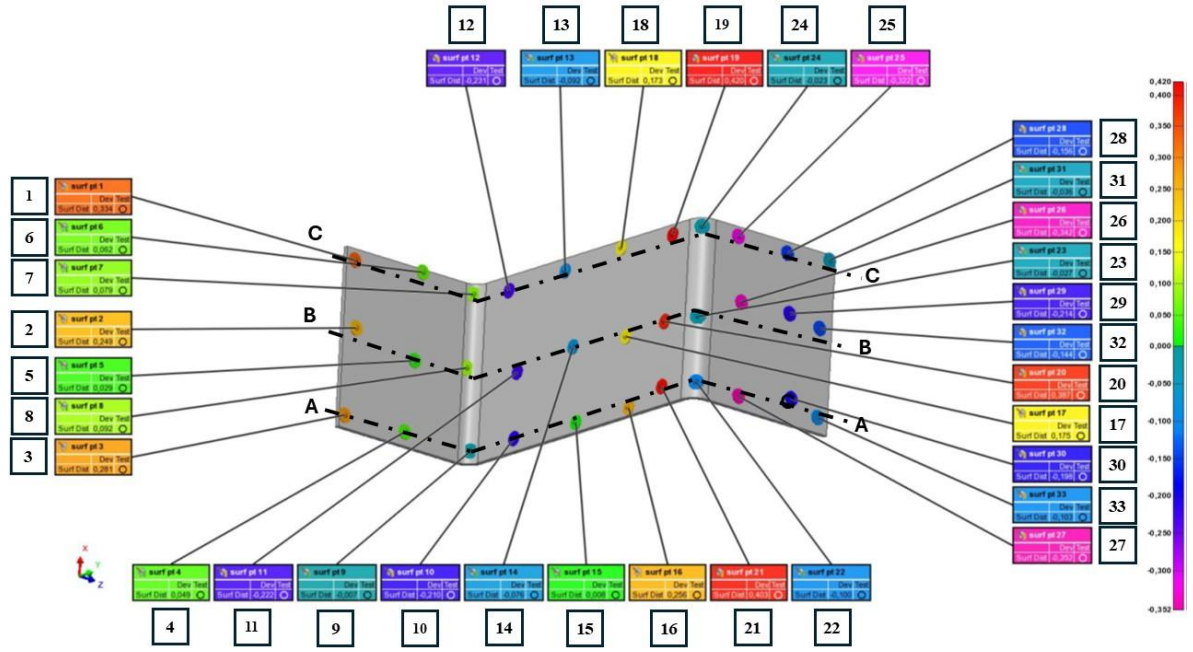
Şekil 4.38. T2.P2.2 numaralı parça ölçüm noktaları

Tablo 4.14. T2.P2.2 numaralı parça ölçüm noktaları deformasyonları

| Parça No. | Nokta        | Sapma* (mm)  | Nokta        | Sapma* (mm) |
|-----------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| T2.P2.2   | 1            | -0,191       | 12           | -0,088      |
|           | 2            | -0,178       | 13           | -0,045      |
|           | 3            | -0,107       | 14           | -0,060      |
|           | 4            | -0,007       | 15           | -0,048      |
|           | 5            | -0,054       | 16           | -0,096      |
|           | 6            | -0,068       | 17           | -0,114      |
|           | 7            | 0,017        | 18           | -0,105      |
|           | 8            | 0,042        | 19           | -0,140      |
|           | 9            | 0,073        | 20           | -0,164      |
|           | 10           | -0,028       | 21           | -0,114      |
|           | 11           | -0,089       |              |             |
| Kesit     | AA = -1.253° | BB = -1.241° | CC = -1.264° |             |

\* (Negatif değerler parça modelinin içine doğru (girişim) olan deformasyonları, pozitif değerler ise parça modelinin dışına doğru (uzaklaşma) olan deformasyonları tanımlamaktadır.)



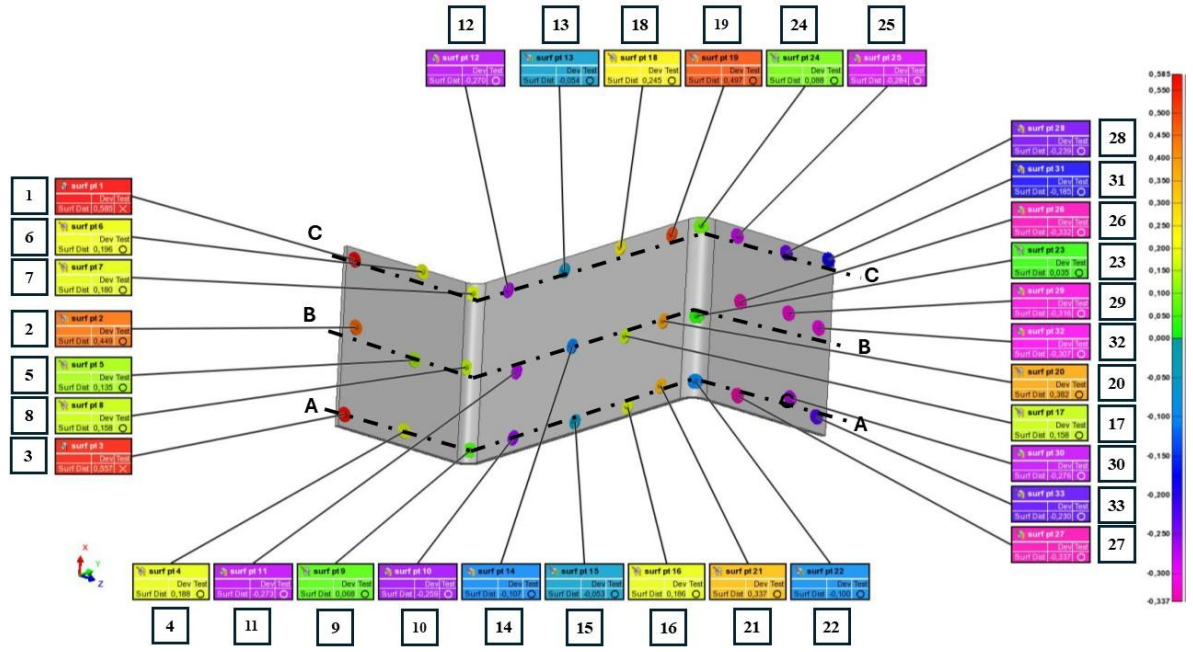


Şekil 4.39. T2.P3.1 numaralı parça ölçüm noktaları

Tablo 4.15. T2.P3.1 numaralı parça ölçüm noktaları deformasyonları

| Parça No.         | Nokta        | Sapma*<br>(mm) | Nokta        | Sapma*<br>(mm) | Nokta        | Sapma*<br>(mm) |
|-------------------|--------------|----------------|--------------|----------------|--------------|----------------|
| T2.P3.1           | 1            | 0,334          | 12           | -0,231         | 23           | -0,027         |
|                   | 2            | 0,249          | 13           | -0,092         | 24           | -0,023         |
|                   | 3            | 0,281          | 14           | -0,076         | 25           | -0,322         |
|                   | 4            | 0,049          | 15           | 0,008          | 26           | -0,342         |
|                   | 5            | 0,029          | 16           | 0,256          | 27           | -0,352         |
|                   | 6            | 0,062          | 17           | 0,175          | 28           | -0,156         |
|                   | 7            | 0,079          | 18           | 0,173          | 29           | -0,214         |
|                   | 8            | 0,092          | 19           | 0,420          | 30           | -0,198         |
|                   | 9            | -0,007         | 20           | 0,387          | 31           | -0,036         |
|                   | 10           | -0,210         | 21           | 0,403          | 32           | -0,144         |
|                   | 11           | -0,222         | 22           | -0,100         | 33           | -0,103         |
| Kesit erkek-kalıp | AA = -0.940° |                | BB = -0.808° |                | CC = -0.839° |                |
| Kesit dişi-kalıp  | AA = -0.954° |                | BB = -0.998° |                | CC = -1.024° |                |

\* (Negatif değerler parça modelinin içine doğru (girişim) olan deformasyonları, pozitif değerler ise parça modelinin dışına doğru (uzaklaşma) olan deformasyonları tanımlamaktadır.)



Şekil 4.40. T2.P3.2 numaralı parça ölçüm noktaları

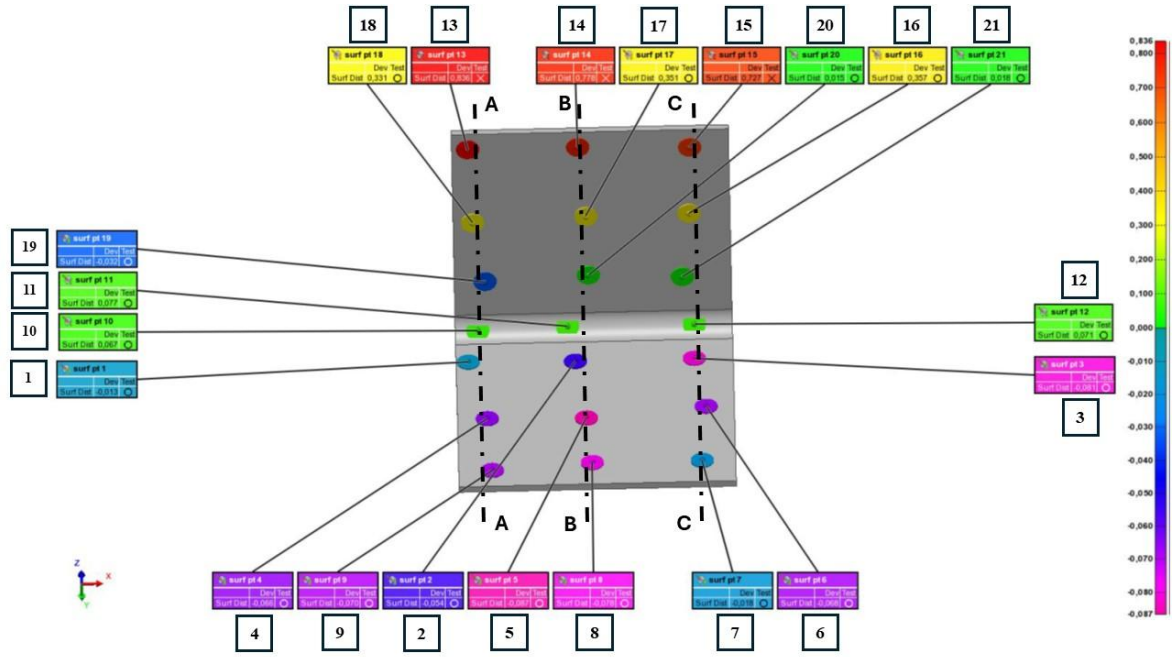
Tablo 4.16. T2.P3.2 numaralı parça ölçüm noktaları deformasyonları

| Parça No.         | Nokta        | Sapma*<br>(mm) | Nokta        | Sapma*<br>(mm) | Nokta        | Sapma*<br>(mm) |
|-------------------|--------------|----------------|--------------|----------------|--------------|----------------|
| T2.P3.2           | 1            | 0,585          | 12           | -0,270         | 23           | 0,035          |
|                   | 2            | 0,449          | 13           | -0,054         | 24           | 0,088          |
|                   | 3            | 0,557          | 14           | -0,107         | 25           | -0,284         |
|                   | 4            | 0,188          | 15           | -0,053         | 26           | -0,332         |
|                   | 5            | 0,135          | 16           | 0,186          | 27           | -0,337         |
|                   | 6            | 0,196          | 17           | 0,158          | 28           | -0,239         |
|                   | 7            | 0,180          | 18           | 0,245          | 29           | -0,316         |
|                   | 8            | 0,158          | 19           | 0,497          | 30           | -0,276         |
|                   | 9            | 0,068          | 20           | 0,382          | 31           | -0,185         |
|                   | 10           | -0,259         | 21           | 0,337          | 32           | -0,307         |
|                   | 11           | -0,273         | 22           | -0,100         | 33           | -0,230         |
| Kesit erkek-kalıp | AA = -1.230° |                | BB = -1.063° |                | CC = -1.236° |                |
| Kesit dişi-kalıp  | AA = -0.720° |                | BB = -0.727° |                | CC = -0.697° |                |

\* (Negatif değerler parça modelinin içine doğru (girişim) olan deformasyonları, pozitif değerler ise parça modelinin dışına doğru (uzaklaşma) olan deformasyonları tanımlamaktadır.)





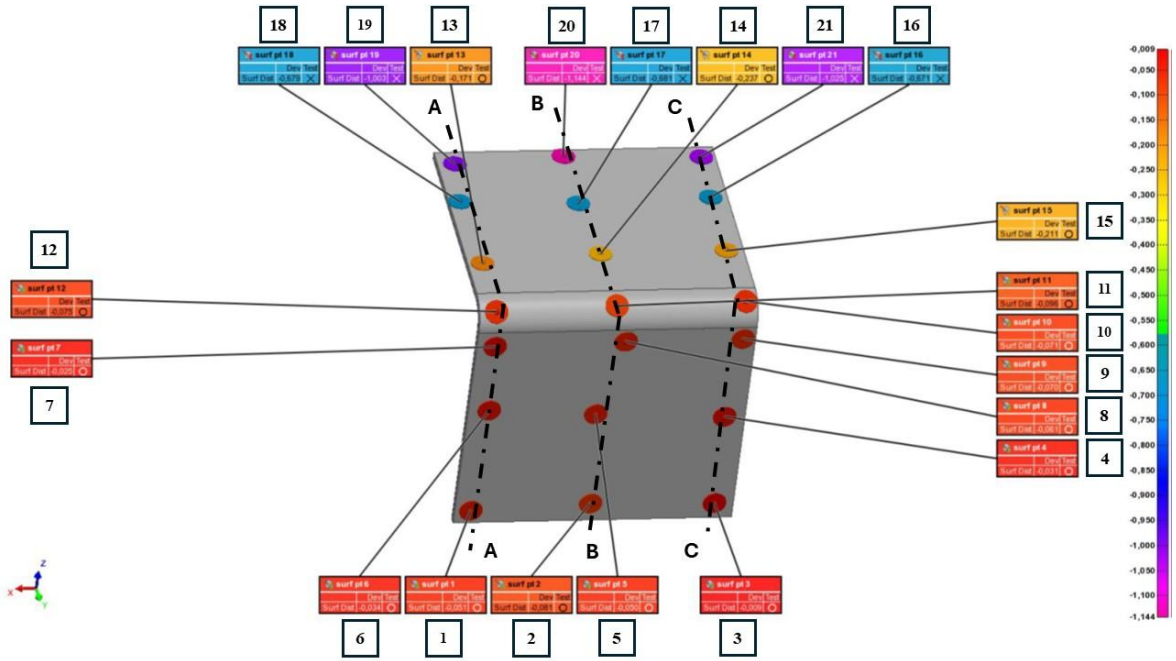


Şekil 4.42. T3.P1.2 numaralı parça ölçüm noktaları

Tablo 4.18. T3.P1.2 numaralı parça ölçüm noktaları deformasyonları

| Parça No. | Nokta        | Sapma* (mm)  | Nokta        | Sapma* (mm) |
|-----------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| T3.P1.2   | 1            | -0,013       | 12           | 0,071       |
|           | 2            | -0,054       | 13           | 0,836       |
|           | 3            | -0,081       | 14           | 0,778       |
|           | 4            | -0,066       | 15           | 0,727       |
|           | 5            | -0,087       | 16           | 0,357       |
|           | 6            | -0,068       | 17           | 0,351       |
|           | 7            | -0,018       | 18           | 0,331       |
|           | 8            | -0,078       | 19           | -0,032      |
|           | 9            | -0,070       | 20           | 0,015       |
|           | 10           | 0,067        | 21           | 0,018       |
|           | 11           | 0,077        |              |             |
| Kesit     | AA = -1.172° | BB = -0.924° | CC = -1.450° |             |

\* (Negatif değerler parça modelinin içine doğru (girişim) olan deformasyonları, pozitif değerler ise parça modelinin dışına doğru (uzaklaşma) olan deformasyonları tanımlamaktadır.)

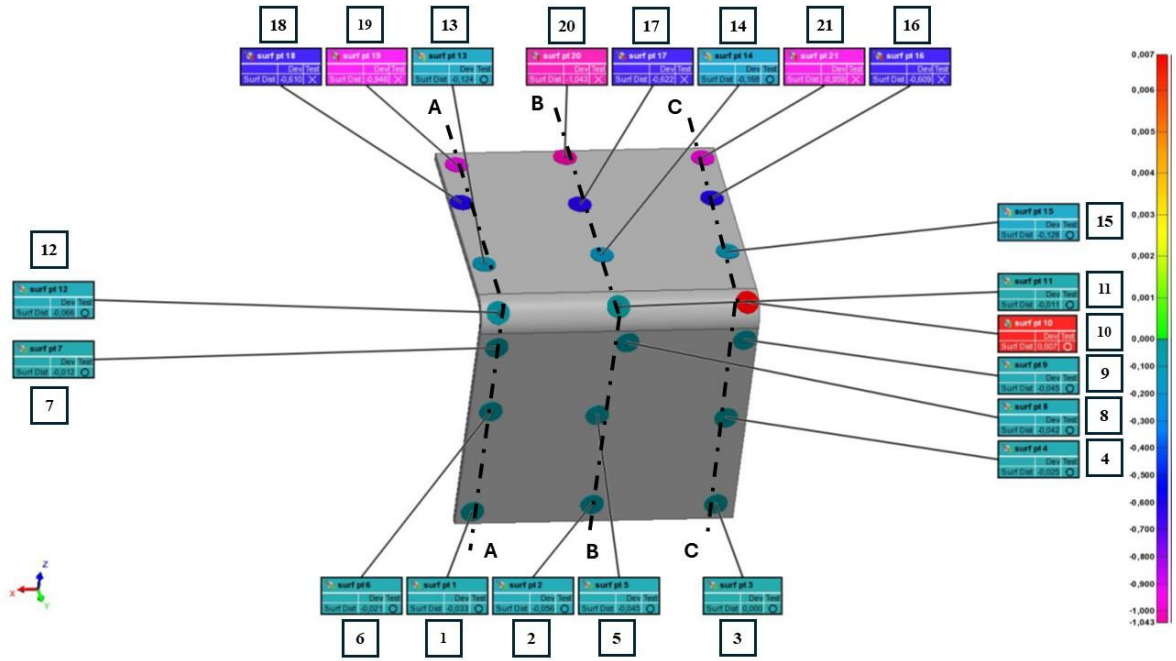


Şekil 4.43. T3.P2.1 numaralı parça ölçüm noktaları

Tablo 4.19. T3.P2.1 numaralı parça ölçüm noktaları deformasyonları

| Parça No. | Nokta        | Sapma* (mm)  | Nokta        | Sapma* (mm) |
|-----------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| T3.P2.1   | 1            | -0,051       | 12           | -0,075      |
|           | 2            | -0,081       | 13           | -0,171      |
|           | 3            | -0,009       | 14           | -0,237      |
|           | 4            | -0,031       | 15           | -0,211      |
|           | 5            | -0,050       | 16           | -0,671      |
|           | 6            | -0,034       | 17           | -0,681      |
|           | 7            | -0,025       | 18           | -0,679      |
|           | 8            | -0,061       | 19           | -1,003      |
|           | 9            | -0,070       | 20           | -1,144      |
|           | 10           | -0,071       | 21           | -1,025      |
|           | 11           | -0,096       |              |             |
| Kesit     | AA = -1.385° | BB = -1.657° | CC = -1.463° |             |

\* (Negatif değerler parça modelinin içine doğru (girişim) olan deformasyonları, pozitif değerler ise parça modelinin dışına doğru (uzaklaşma) olan deformasyonları tanımlamaktadır.)

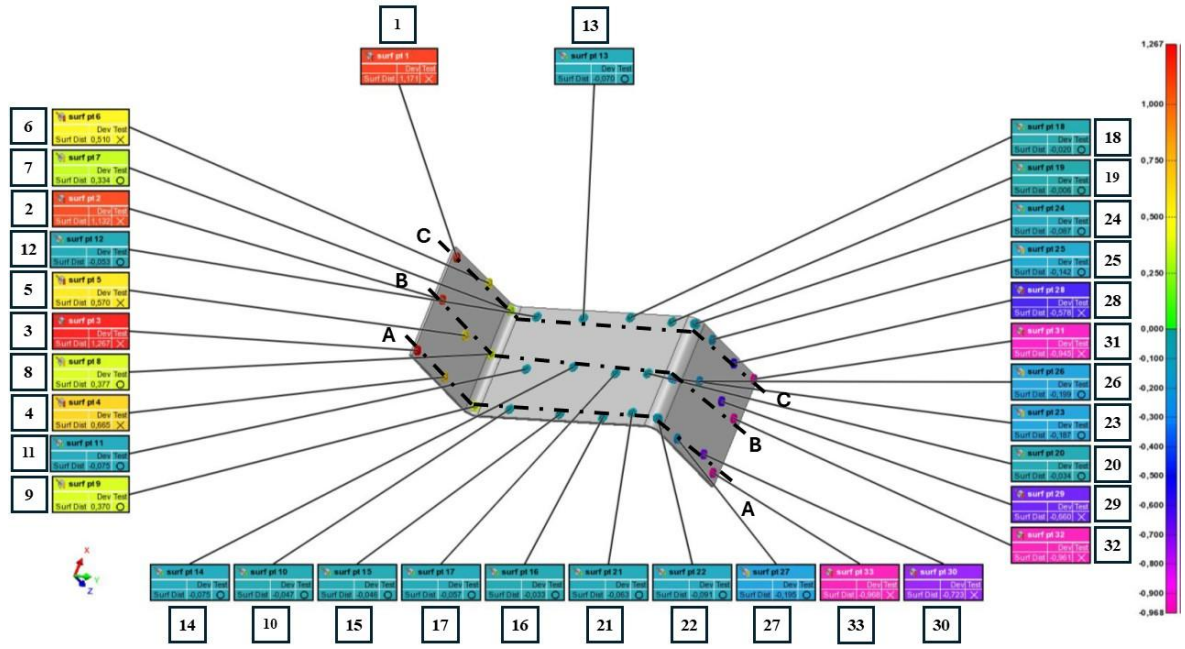


Şekil 4.44. T3.P2.2 numaralı parça ölçüm noktaları

Tablo 4.20. T3.P2.2 numaralı parça ölçüm noktaları deformasyonları

| Parça No. | Nokta        | Sapma* (mm)  | Nokta        | Sapma* (mm) |
|-----------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| T3.P2.2   | 1            | -0,033       | 12           | -0,066      |
|           | 2            | -0,056       | 13           | -0,124      |
|           | 3            | 0,000        | 14           | -0,168      |
|           | 4            | -0,025       | 15           | -0,128      |
|           | 5            | -0,045       | 16           | -0,609      |
|           | 6            | -0,021       | 17           | -0,622      |
|           | 7            | -0,012       | 18           | -0,610      |
|           | 8            | -0,042       | 19           | -0,946      |
|           | 9            | -0,045       | 20           | -1,043      |
|           | 10           | 0,007        | 21           | -0,959      |
|           | 11           | -0,011       |              |             |
| Kesit     | AA = -1.351° | BB = -1.471° | CC = -1.538° |             |

\* (Negatif değerler parça modelinin içine doğru (girişim) olan deformasyonları, pozitif değerler ise parça modelinin dışına doğru (uzaklaşma) olan deformasyonları tanımlamaktadır.)

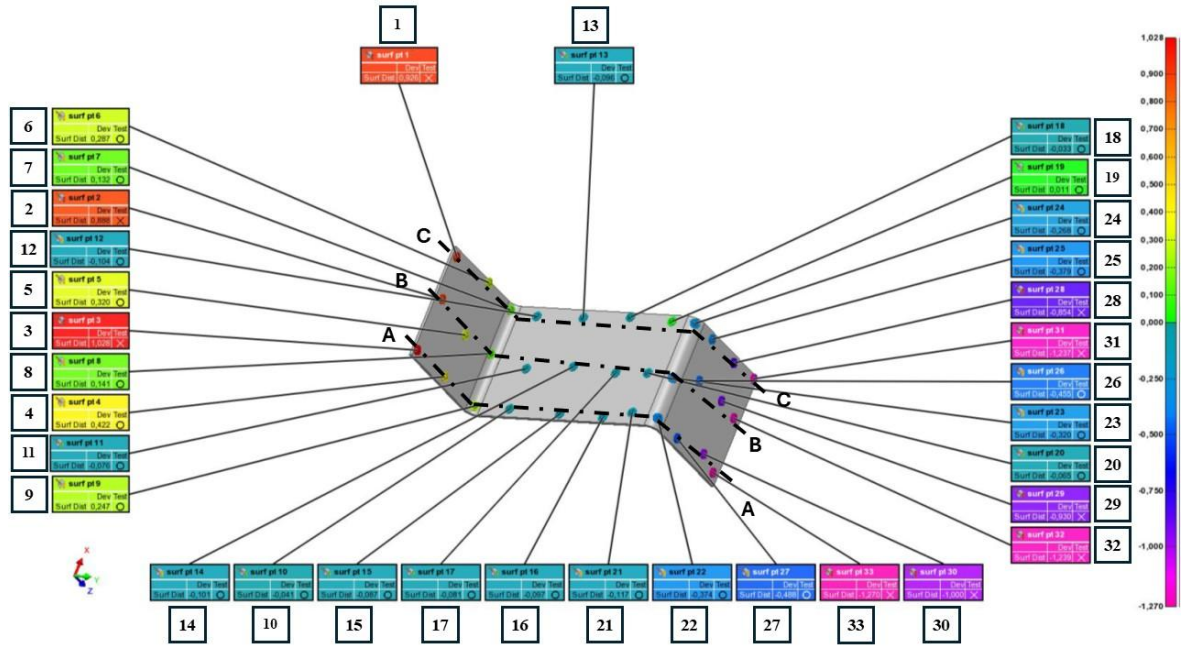


Şekil 4.45. T3.P3.1 numaralı parça ölçüm noktaları

Tablo 4.21. T3.P3.1 numaralı parça ölçüm noktaları deformasyonları

| Parça No.         | Nokta        | Sapma*<br>(mm) | Nokta        | Sapma*<br>(mm) | Nokta        | Sapma*<br>(mm) |
|-------------------|--------------|----------------|--------------|----------------|--------------|----------------|
| T3.P3.1           | 1            | 1,171          | 12           | -0,053         | 23           | -0,187         |
|                   | 2            | 1,132          | 13           | -0,070         | 24           | -0,087         |
|                   | 3            | 1,267          | 14           | -0,075         | 25           | -0,142         |
|                   | 4            | 0,665          | 15           | -0,046         | 26           | -0,199         |
|                   | 5            | 0,570          | 16           | -0,033         | 27           | -0,195         |
|                   | 6            | 0,510          | 17           | -0,057         | 28           | -0,578         |
|                   | 7            | 0,334          | 18           | -0,020         | 29           | -0,660         |
|                   | 8            | 0,377          | 19           | -0,006         | 30           | -0,723         |
|                   | 9            | 0,370          | 20           | -0,034         | 31           | -0,945         |
|                   | 10           | -0,047         | 21           | -0,063         | 32           | -0,961         |
|                   | 11           | -0,075         | 22           | -0,091         | 33           | -0,968         |
| Kesit erkek-kalıp | AA = -1.371° |                | BB = -1.276° |                | CC = -1.299° |                |
| Kesit dişi-kalıp  | AA = -1.443° |                | BB = -1.398° |                | CC = -1.247° |                |

\* (Negatif değerler parça modelinin içine doğru (girişim) olan deformasyonları, pozitif değerler ise parça modelinin dışına doğru (uzaklaşma) olan deformasyonları tanımlamaktadır.)



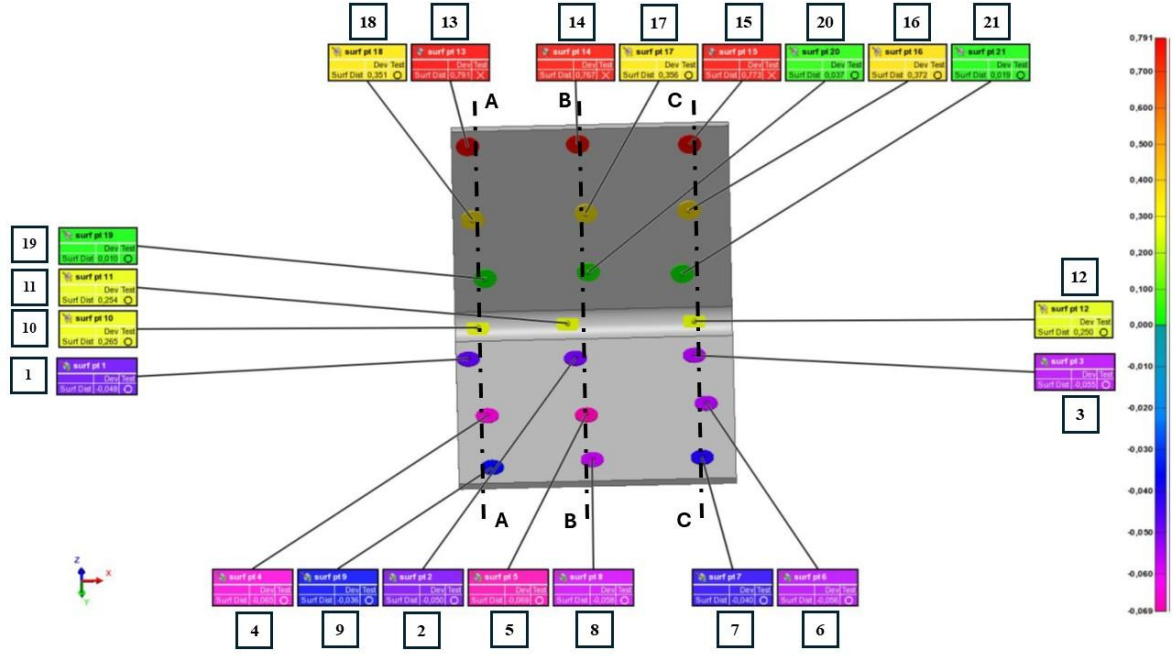
Şekil 4.46. T3.P3.2 numaralı parça ölçüm noktaları

Tablo 4.22. T3.P3.2 numaralı parça ölçüm noktaları deformasyonları

| Parça No.         | Nokta        | Sapma*<br>(mm) | Nokta        | Sapma*<br>(mm) | Nokta        | Sapma*<br>(mm) |
|-------------------|--------------|----------------|--------------|----------------|--------------|----------------|
| T3.P3.2           | 1            | 0,926          | 12           | -0,104         | 23           | -0,320         |
|                   | 2            | 0,888          | 13           | -0,096         | 24           | -0,268         |
|                   | 3            | 1,028          | 14           | -0,101         | 25           | -0,379         |
|                   | 4            | 0,422          | 15           | -0,087         | 26           | -0,455         |
|                   | 5            | 0,320          | 16           | -0,097         | 27           | -0,488         |
|                   | 6            | 0,287          | 17           | -0,081         | 28           | -0,854         |
|                   | 7            | 0,132          | 18           | -0,033         | 29           | -0,930         |
|                   | 8            | 0,141          | 19           | 0,011          | 30           | -1,000         |
|                   | 9            | 0,247          | 20           | -0,065         | 31           | -1,237         |
|                   | 10           | -0,041         | 21           | -0,117         | 32           | -1,239         |
|                   | 11           | -0,076         | 22           | -0,374         | 33           | -1,270         |
| Kesit erkek-kalıp | AA = -1.295° |                | BB = -1.237° |                | CC = -1.273° |                |
| Kesit dişi-kalıp  | AA = -1.433° |                | BB = -1.416° |                | CC = -1.423° |                |

\* (Negatif değerler parça modelinin içine doğru (girişim) olan deformasyonları, pozitif değerler ise parça modelinin dışına doğru (uzaklaşma) olan deformasyonları tanımlamaktadır.)



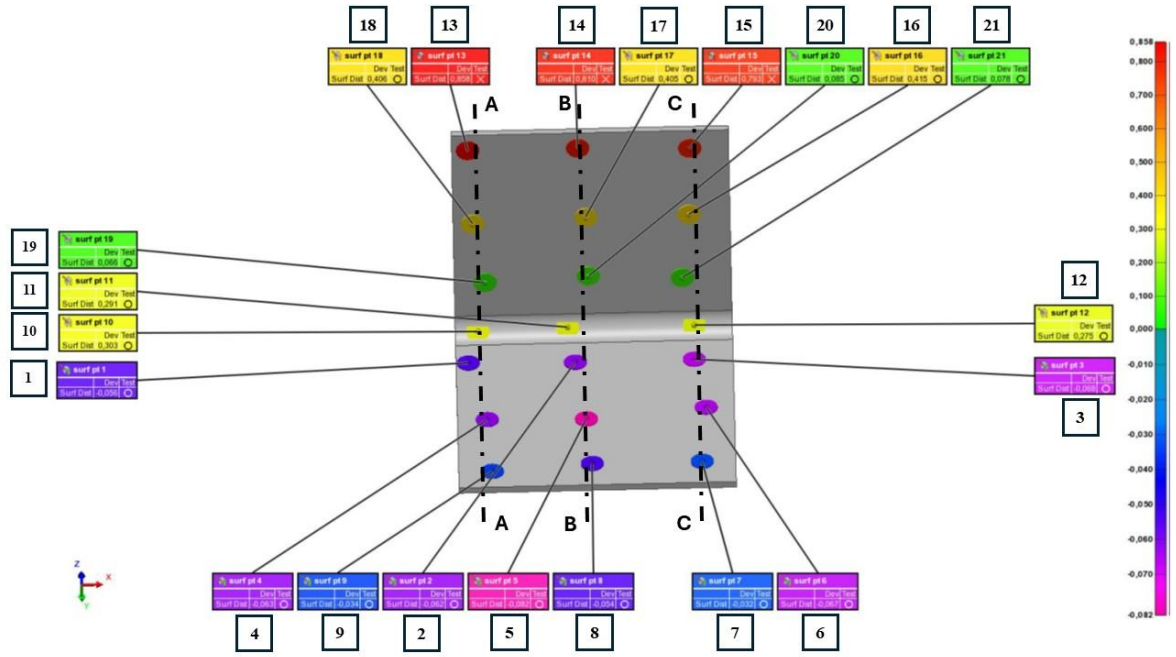


Şekil 4.47. T4.P1.1 numaralı parça ölçüm noktaları

Tablo 4.23. T4.P1.1 numaralı parça ölçüm noktaları deformasyonları

| Parça No. | Nokta        | Sapma* (mm)  | Nokta        | Sapma* (mm) |
|-----------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| T4.P1.1   | 1            | -0,048       | 12           | 0,250       |
|           | 2            | -0,050       | 13           | 0,791       |
|           | 3            | -0,055       | 14           | 0,767       |
|           | 4            | -0,065       | 15           | 0,773       |
|           | 5            | -0,069       | 16           | 0,372       |
|           | 6            | -0,056       | 17           | 0,356       |
|           | 7            | -0,040       | 18           | 0,351       |
|           | 8            | -0,058       | 19           | 0,010       |
|           | 9            | -0,036       | 20           | 0,037       |
|           | 10           | 0,265        | 21           | 0,019       |
|           | 11           | 0,254        |              |             |
| Kesit     | AA = -1.267° | BB = -0.907° | CC = -1.126° |             |

\* (Negatif değerler parça modelinin içine doğru (girişim) olan deformasyonları, pozitif değerler ise parça modelinin dışına doğru (uzaklaşma) olan deformasyonları tanımlamaktadır.)



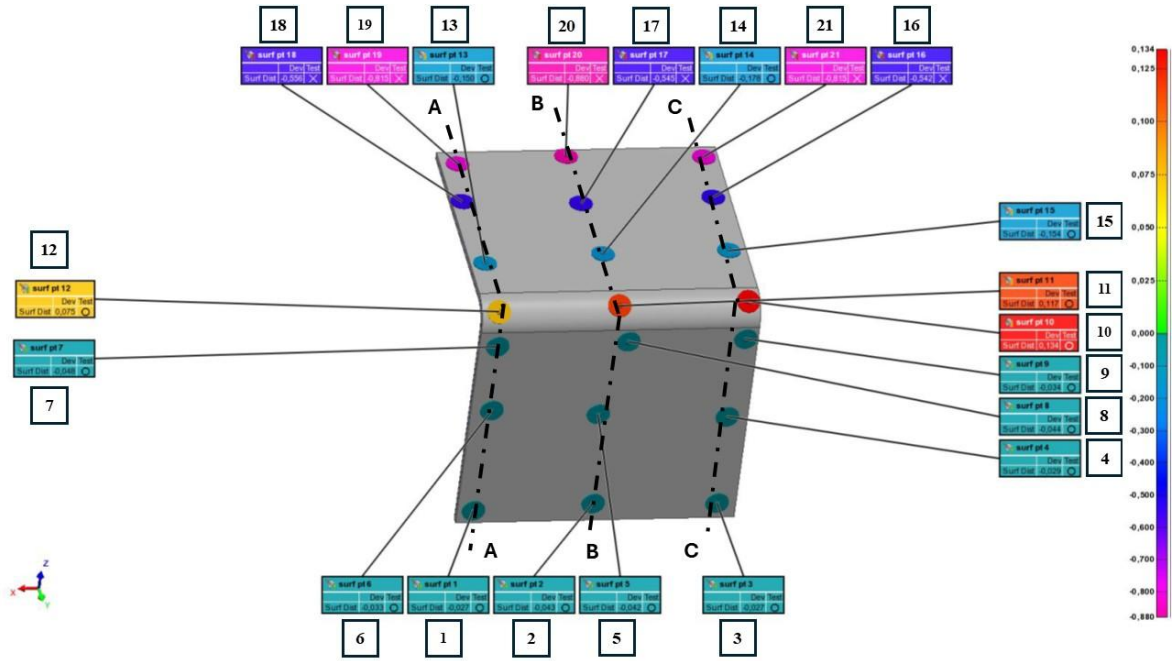
Şekil 4.48. T4.P1.2 numaralı parça ölçüm noktaları

Tablo 4.24. T4.P1.2 numaralı parça ölçüm noktaları deformasyonları

| Parça No. | Nokta        | Sapma* (mm)  | Nokta        | Sapma* (mm) |
|-----------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| T4.P1.2   | 1            | -0,056       | 12           | 0,275       |
|           | 2            | -0,062       | 13           | 0,858       |
|           | 3            | -0,068       | 14           | 0,810       |
|           | 4            | -0,063       | 15           | 0,793       |
|           | 5            | -0,082       | 16           | 0,415       |
|           | 6            | -0,067       | 17           | 0,405       |
|           | 7            | -0,032       | 18           | 0,406       |
|           | 8            | -0,054       | 19           | 0,066       |
|           | 9            | -0,034       | 20           | 0,085       |
|           | 10           | 0,303        | 21           | 0,078       |
|           | 11           | 0,291        |              |             |
| Kesit     | AA = -1.146° | BB = -0.748° | CC = -1.181° |             |

\* (Negatif değerler parça modelinin içine doğru (girişim) olan deformasyonları, pozitif değerler ise parça modelinin dışına doğru (uzaklaşma) olan deformasyonları tanımlamaktadır.)



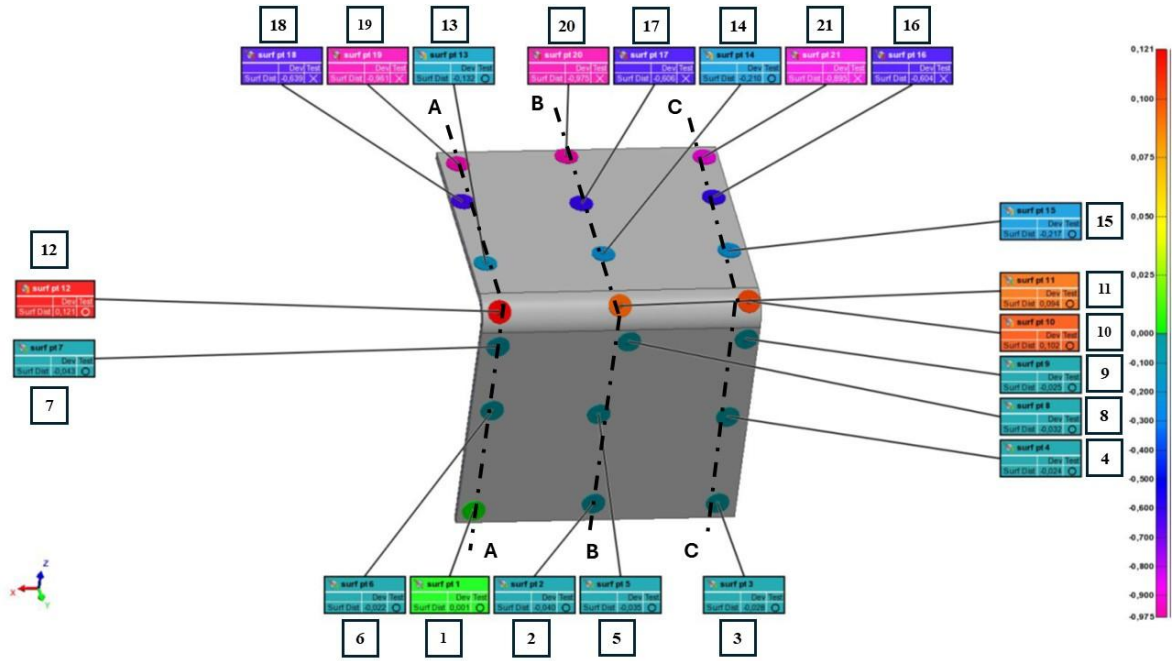


Şekil 4.49. T4.P2.1 numaralı parça ölçüm noktaları

Tablo 4.25. T4.P2.1 numaralı parça ölçüm noktaları deformasyonları

| Parça No. | Nokta        | Sapma* (mm)  | Nokta        | Sapma* (mm) |
|-----------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| T4.P2.1   | 1            | -0,027       | 12           | 0,075       |
|           | 2            | -0,043       | 13           | -0,150      |
|           | 3            | -0,027       | 14           | -0,178      |
|           | 4            | -0,029       | 15           | -0,154      |
|           | 5            | -0,042       | 16           | -0,542      |
|           | 6            | -0,033       | 17           | -0,545      |
|           | 7            | -0,048       | 18           | -0,556      |
|           | 8            | -0,044       | 19           | -0,815      |
|           | 9            | -0,034       | 20           | -0,880      |
|           | 10           | 0,134        | 21           | -0,815      |
|           | 11           | 0,117        |              |             |
| Kesit     | AA = -1.113° | BB = -1.152° | CC = -1.197° |             |

\* (Negatif değerler parça modelinin içine doğru (girişim) olan deformasyonları, pozitif değerler ise parça modelinin dışına doğru (uzaklaşma) olan deformasyonları tanımlamaktadır.)

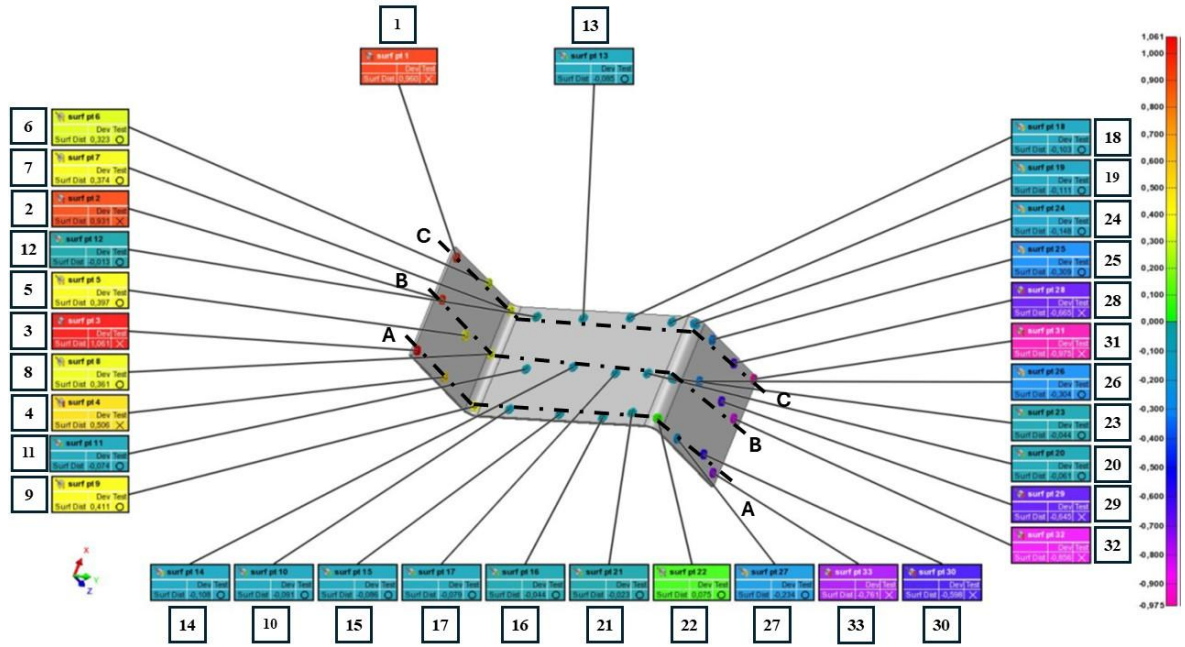


Şekil 4.50. T4.P2.2 numaralı parça ölçüm noktaları

Tablo 4.26. T4.P2.2 numaralı parça ölçüm noktaları deformasyonları

| Parça No. | Nokta        | Sapma* (mm)  | Nokta        | Sapma* (mm) |
|-----------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| T4.P2.2   | 1            | 0,001        | 12           | 0,121       |
|           | 2            | -0,040       | 13           | -0,132      |
|           | 3            | -0,028       | 14           | -0,210      |
|           | 4            | -0,024       | 15           | -0,217      |
|           | 5            | -0,035       | 16           | -0,604      |
|           | 6            | -0,022       | 17           | -0,606      |
|           | 7            | -0,043       | 18           | -0,639      |
|           | 8            | -0,032       | 19           | -0,961      |
|           | 9            | -0,025       | 20           | -0,975      |
|           | 10           | 0,102        | 21           | -0,895      |
|           | 11           | 0,094        |              |             |
| Kesit     | AA = -1.406° | BB = -1.282° | CC = -1.191° |             |

\* (Negatif değerler parça modelinin içine doğru (girişim) olan deformasyonları, pozitif değerler ise parça modelinin dışına doğru (uzaklaşma) olan deformasyonları tanımlamaktadır.)

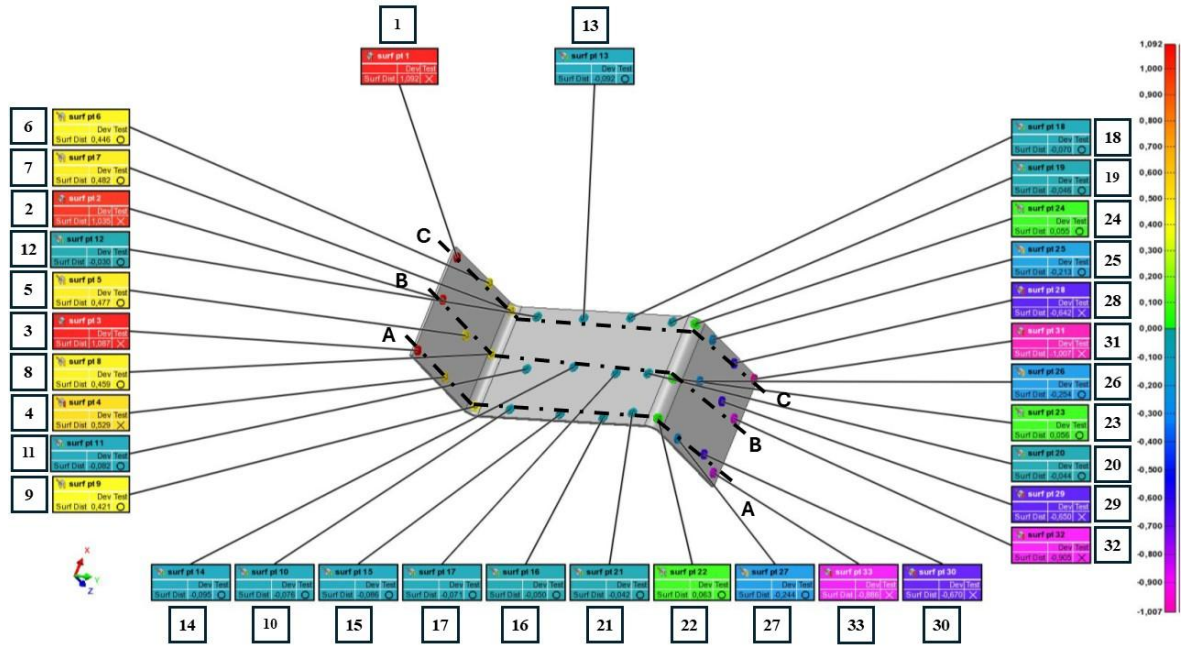


Şekil 4.51. T4.P3.1 numaralı parça ölçüm noktaları

Tablo 4.27. T4.P3.1 numaralı parça ölçüm noktaları deformasyonları

| Parça No.         | Nokta        | Sapma*<br>(mm) | Nokta        | Sapma*<br>(mm) | Nokta        | Sapma*<br>(mm) |
|-------------------|--------------|----------------|--------------|----------------|--------------|----------------|
| T4.P3.1           | 1            | 0,960          | 12           | -0,013         | 23           | -0,044         |
|                   | 2            | 0,931          | 13           | -0,085         | 24           | -0,148         |
|                   | 3            | 1,061          | 14           | -0,108         | 25           | -0,309         |
|                   | 4            | 0,506          | 15           | -0,086         | 26           | -0,304         |
|                   | 5            | 0,397          | 16           | -0,044         | 27           | -0,234         |
|                   | 6            | 0,323          | 17           | -0,079         | 28           | -0,665         |
|                   | 7            | 0,374          | 18           | -0,103         | 29           | -0,645         |
|                   | 8            | 0,361          | 19           | -0,111         | 30           | -0,598         |
|                   | 9            | 0,411          | 20           | -0,061         | 31           | -0,975         |
|                   | 10           | -0,091         | 21           | -0,023         | 32           | -0,856         |
|                   | 11           | -0,074         | 22           | 0,075          | 33           | -0,761         |
| Kesit erkek-kalıp | AA = -1.257° |                | BB = -1.114° |                | CC = -1.136° |                |
| Kesit dişi-kalıp  | AA = -0.837° |                | BB = -0.913° |                | CC = -0.974° |                |

\* (Negatif değerler parça modelinin içine doğru (girişim) olan deformasyonları, pozitif değerler ise parça modelinin dışına doğru (uzaklaşma) olan deformasyonları tanımlamaktadır.)



Şekil 4.52. T4.P3.2 numaralı parça ölçüm noktaları

Tablo 4.28. T4.P3.2 numaralı parça ölçüm noktaları deformasyonları

| Parça No.         | Nokta        | Sapma*<br>(mm) | Nokta        | Sapma*<br>(mm) | Nokta        | Sapma*<br>(mm) |
|-------------------|--------------|----------------|--------------|----------------|--------------|----------------|
| T4.P3.2           | 1            | 1,092          | 12           | -0,030         | 23           | 0,056          |
|                   | 2            | 1,035          | 13           | -0,092         | 24           | 0,055          |
|                   | 3            | 1,087          | 14           | -0,095         | 25           | -0,213         |
|                   | 4            | 0,529          | 15           | -0,086         | 26           | -0,254         |
|                   | 5            | 0,477          | 16           | -0,050         | 27           | -0,244         |
|                   | 6            | 0,446          | 17           | -0,071         | 28           | -0,642         |
|                   | 7            | 0,482          | 18           | -0,070         | 29           | -0,650         |
|                   | 8            | 0,459          | 19           | -0,046         | 30           | -0,670         |
|                   | 9            | 0,421          | 20           | -0,044         | 31           | -1,007         |
|                   | 10           | -0,076         | 21           | -0,042         | 32           | -0,905         |
|                   | 11           | -0,082         | 22           | 0,063          | 33           | -0,886         |
| Kesit erkek-kalıp | AA = -1.254° |                | BB = -1.240° |                | CC = -1.175° |                |
| Kesit dişi-kalıp  | AA = -1.145° |                | BB = -1.219° |                | CC = -1.250° |                |

\* (Negatif değerler parça modelinin içine doğru (girişim) olan deformasyonları, pozitif değerler ise parça modelinin dışına doğru (uzaklaşma) olan deformasyonları tanımlamaktadır.)

## 5. BULGULAR VE DEĞERLENDİRMELER

Temel olarak kompozit parçalar, anizotropik yapıları nedeniyle üretim süreçleri sonunda tasarım geometrilerinden farklılaşır. Üretim süreçleri parametreleri ise farkın büyüklüğüne etki eder. Bölüm 2’de süreç deformasyonlarını etki eden iç ve dış faktörler, literatürdeki çalışmalar temel alınarak sınıflandırılmıştır.

Dış faktörlerden kalıp (takım) etkisinin değerlendirilmesi için test parçaları tasarımları yapılmış, bu test parçaları için iç faktörlerden kaynaklanan deformasyonların analitik hesaplaması 3’te gerçekleştirilmiş, Tablo 3.7’de elde edilen değerler paylaşılmıştır.

Deneyssel çalışmalar kapsamında üretimi tamamlanan toplam 24 test parçası, parça tiplerine göre Şekil 4.26, Şekil 4.27 ve Şekil 4.28’de belirtilen metodoloji ile ölçülmüş, P1, P2 ve P3 parçalarına ait toplam deformasyon değerleri sırasıyla Tablo 5.1, Tablo 5.2 ve Tablo 5.3’de sunulmuştur.

Tablolarda bulunan “ $\Delta\theta_x$ ” değerleri, her bir parça özelinde, üzerinde alınan üç kesitte elde edilen deformasyon açılarının ortalamasıdır. Aynı takım üzerinde üretilen ve aynı parça grubunda bulunan numunelerin ortalama açısal deformasyon değerleri ise “Ort.  $\Delta\theta_x$ ” olarak belirtilmiştir.

**Tablo 5.1.** P1 numaralı parça deformasyon değerleri

| P1      | $\Delta\theta_{P1}$ (°) | Ort. $\Delta\theta_{P1}$ (°) |
|---------|-------------------------|------------------------------|
| T1.P1.1 | 1.323                   | 1.321                        |
| T1.P1.2 | 1.318                   |                              |
| T2.P1.1 | 1.079                   | 1.083                        |
| T2.P1.2 | 1.087                   |                              |
| T3.P1.1 | 1.322                   | 1.252                        |
| T3.P1.2 | 1.182                   |                              |
| T4.P1.1 | 1.100                   | 1.063                        |
| T4.P1.2 | 1.025                   |                              |

**Tablo 5.2.** P2 numaralı parça deformasyon değerleri

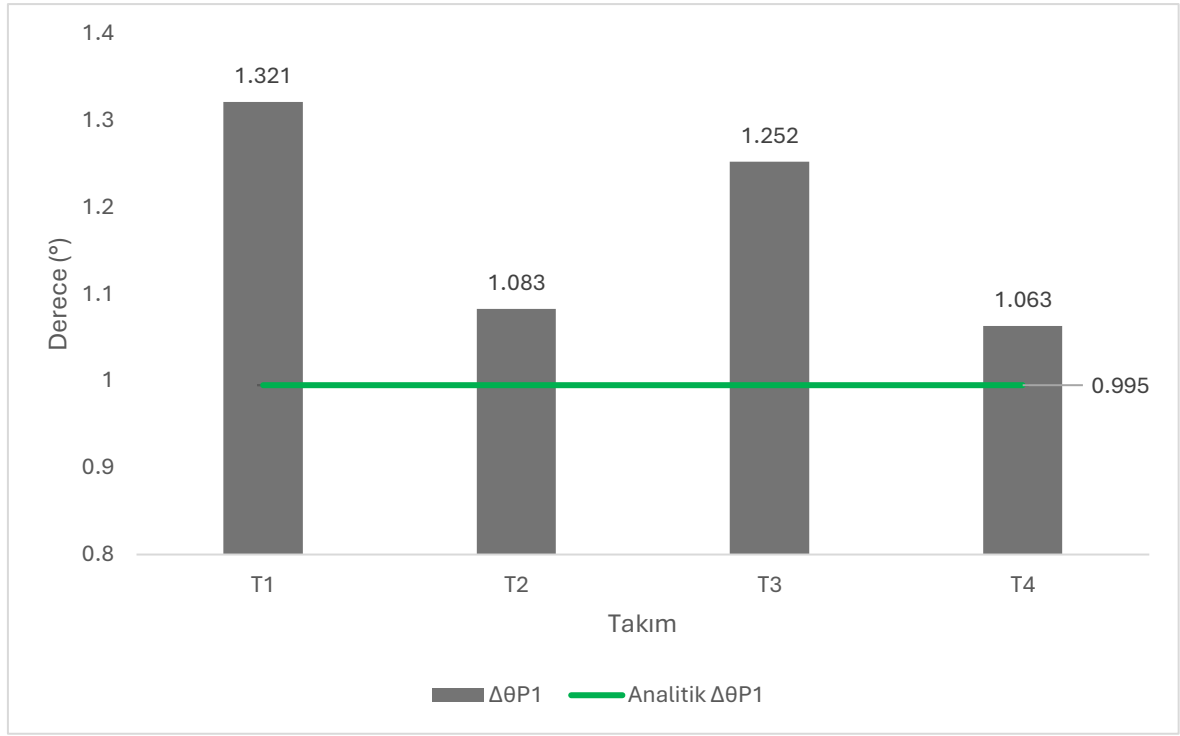
| P2      | $\Delta\theta_{P2}$ (°) | Ort. $\Delta\theta_{P2}$ (°) |
|---------|-------------------------|------------------------------|
| T1.P2.1 | 1.434                   | 1.473                        |
| T1.P2.2 | 1.511                   |                              |
| T2.P2.1 | 1.133                   | 1.193                        |
| T2.P2.2 | 1.253                   |                              |
| T3.P2.1 | 1.502                   | 1.478                        |
| T3.P2.2 | 1.453                   |                              |
| T4.P2.1 | 1.154                   | 1.224                        |
| T4.P2.2 | 1.293                   |                              |

**Tablo 5.3.** P3 numaralı parça deformasyon değerleri

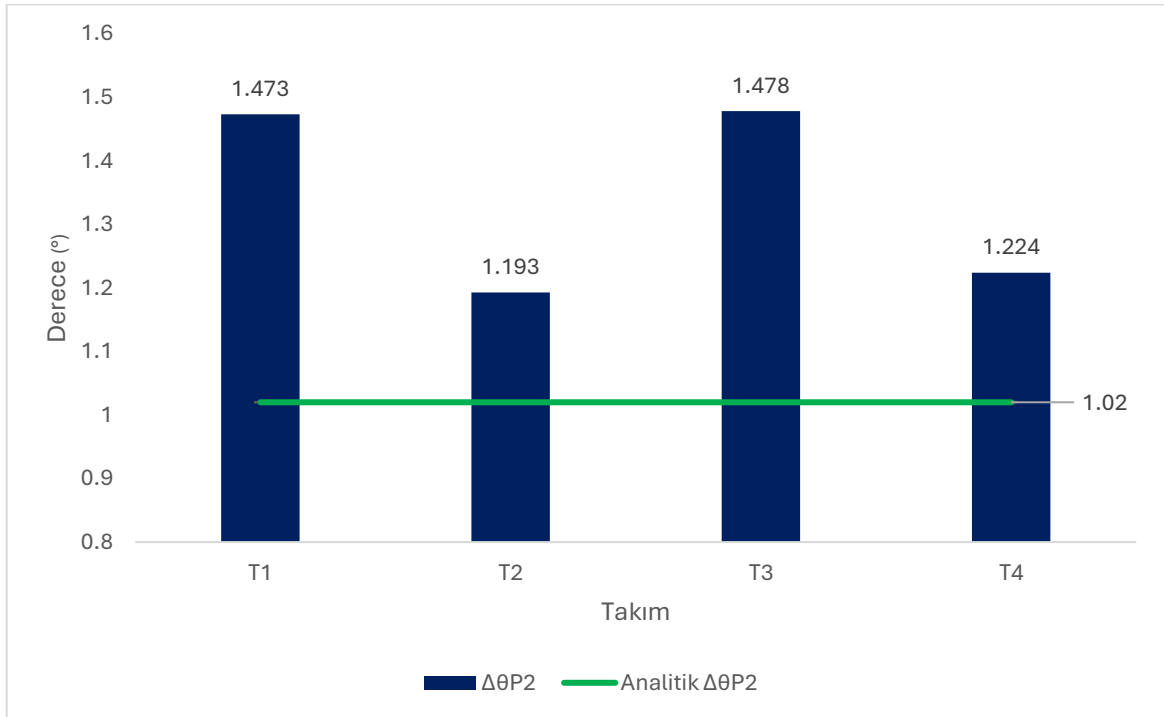
| P3      | $\Delta\theta_{P3-P1}$ (°) | Ort. $\Delta\theta_{P3-P1}$ (°) | $\Delta\theta_{P3-P2}$ (°) | Ort. $\Delta\theta_{P3-P2}$ (°) |
|---------|----------------------------|---------------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| T1.P3.1 | 1.301                      | 1.341                           | 1.468                      | 1.335                           |
| T1.P3.2 | 1.378                      |                                 | 1.203                      |                                 |
| T2.P3.1 | 0.862                      | 1.019                           | 0.992                      | 0.853                           |
| T2.P3.2 | 1.176                      |                                 | 0.715                      |                                 |
| T3.P3.1 | 1.315                      | 1.292                           | 1.363                      | 1.393                           |
| T3.P3.2 | 1.268                      |                                 | 1.424                      |                                 |
| T4.P3.1 | 1.169                      | 1.196                           | 0.908                      | 1.056                           |
| T4.P3.2 | 1.223                      |                                 | 1.205                      |                                 |

Şekil 5.1, P1 test parçalarına ait deformasyon değerleri ile Tablo 3.7’de üretimi erkek kalıp üzerinde yapılan parçalar için analitik hesaplanan deformasyon değerini karşılaştırmaktadır.

Şekil 5.2, ise P2 test parçalarına ait deformasyon değerleri ile Tablo 3.7’de üretimi dişi kalıp üzerinde yapılan parçalar için analitik hesaplanan deformasyon değerini karşılaştırmaktadır.



Şekil 5.1. Takım bazlı P1 parça deformasyonları



Şekil 5.2. Takım bazlı P2 parça deformasyonları

Her iki şekilde de (Şekil 5.1 ve Şekil 5.2) görülebileceği gibi deneyler sonucu elde edilen açısal deformasyon değerleri, analitik hesaplama ile elde edilenlerin üzerinde gerçekleşmiştir. Bu durumun eşitlik (2.15)'in sadece iç parametreleri hesaba katması kaynaklı olduğu ve bu değerlerin üzerindeki miktarların dış faktörler tarafından oluştuğu değerlendirilmiştir.

$$\Delta\theta = \text{Analitik } \Delta\theta_i + \text{Analitik } \Delta\theta_d \quad (5.1)$$

|                             |                                                                               |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| $\Delta\theta$ :            | Toplam açısal deformasyon (derece)                                            |
| Analitik $\Delta\theta_i$ : | Analitik olarak hesaplanan iç faktörler kaynaklı toplam deformasyon (derece)  |
| Analitik $\Delta\theta_d$ : | Analitik olarak hesaplanan dış faktörler kaynaklı toplam deformasyon (derece) |

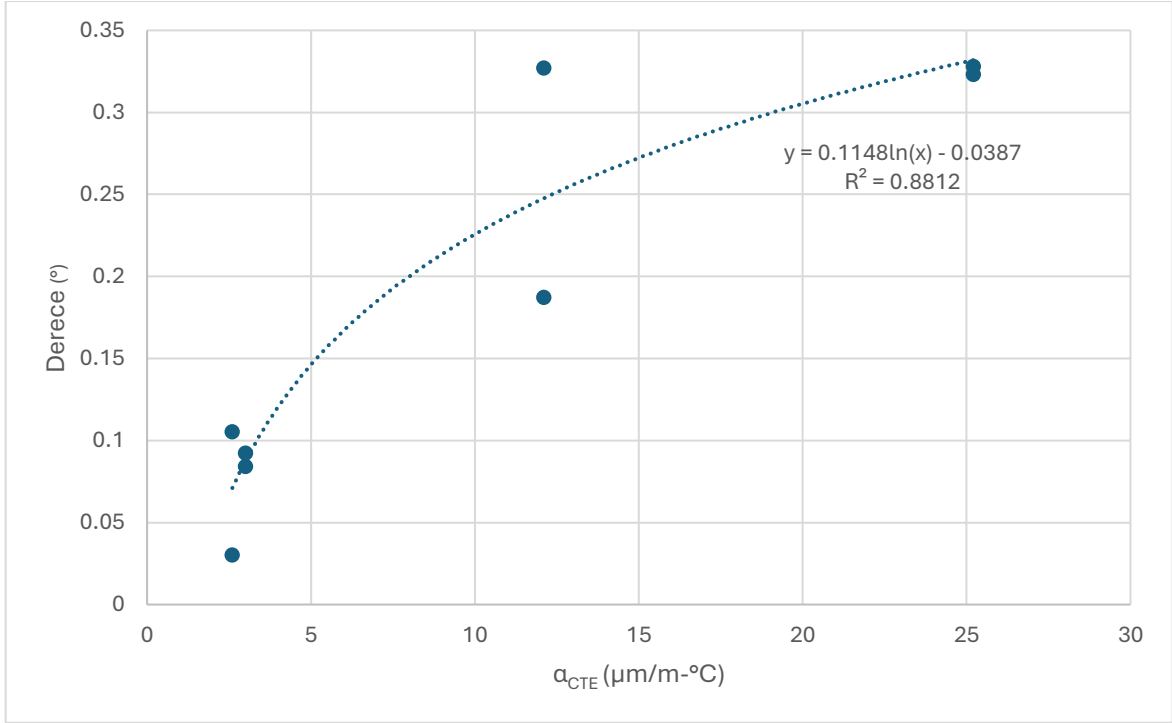
Bu çalışma kapsamında üretimi gerçekleştirilen tüm P1 parçaları için, toplam deformasyon ile analitik formül ile hesaplanan iç faktörler kaynaklı süreç deformasyonu farkı, dış faktörlerden kaynaklanan değerleri vermektedir. Değerler, Tablo 5.4'de belirtilmiştir.

**Tablo 5.4.** Erkek kalıp ile üretilen parça (P1) deformasyonu ile takım malzemesi ilişkisi

| P1      | Lineer Isıl Genleşme<br>Katsayısı ( $\alpha_{CTE}$ ) ( $\mu\text{m/m-}^\circ\text{C}$ ) | $\Delta\theta_{P1}$ ( $^\circ$ ) | Analitik<br>$\Delta\theta_{P1}$ ( $^\circ$ ) | $\Delta\theta_{P1}$ - Analitik<br>$\Delta\theta_{P1}$ Farkı( $^\circ$ ) |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| T1.P1.1 | 25.2                                                                                    | 1.323                            | 0.995                                        | 0.328                                                                   |
| T1.P1.2 | 25.2                                                                                    | 1.318                            |                                              | 0.323                                                                   |
| T2.P1.1 | 3.0                                                                                     | 1.079                            |                                              | 0.084                                                                   |
| T2.P1.2 | 3.0                                                                                     | 1.087                            |                                              | 0.092                                                                   |
| T3.P1.1 | 12.1                                                                                    | 1.322                            |                                              | 0.327                                                                   |
| T3.P1.2 | 12.1                                                                                    | 1.182                            |                                              | 0.187                                                                   |
| T4.P1.1 | 2.6                                                                                     | 1.100                            |                                              | 0.105                                                                   |
| T4.P1.2 | 2.6                                                                                     | 1.025                            |                                              | 0.030                                                                   |



Erkek kalıp kullanılarak üretilen P1 parçalarının dış faktörlere bağlı süreç deformasyonu ile parçaların üretildikleri kalıp malzemesi lineer ısı genleşme katsayısı arasında bulunan ilişki Şekil 5.3'te gösterilmiştir.



**Şekil 5.3.** Dış faktörler kaynaklı  $\Delta\theta_{P1}$  ( $^{\circ}$ ) ile takım malzemesi  $\alpha_{CTE}$  karşılaştırma

Analitik olarak hesaplanan iç faktörler kaynaklı deformasyonların, deneysel sonuçlara yakınsamasını sağlamak için dış faktörlerin etkilerinin de dahil edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla Şekil 5.3 referans alınarak erkek kalıp kullanımında eşitlik (5.2) önerilmiştir.

$$\Delta\theta = \text{Analitik } \Delta\theta_i + 0.1148 \ln(\alpha_{CTE}) - 0.0387 \quad (5.2)$$

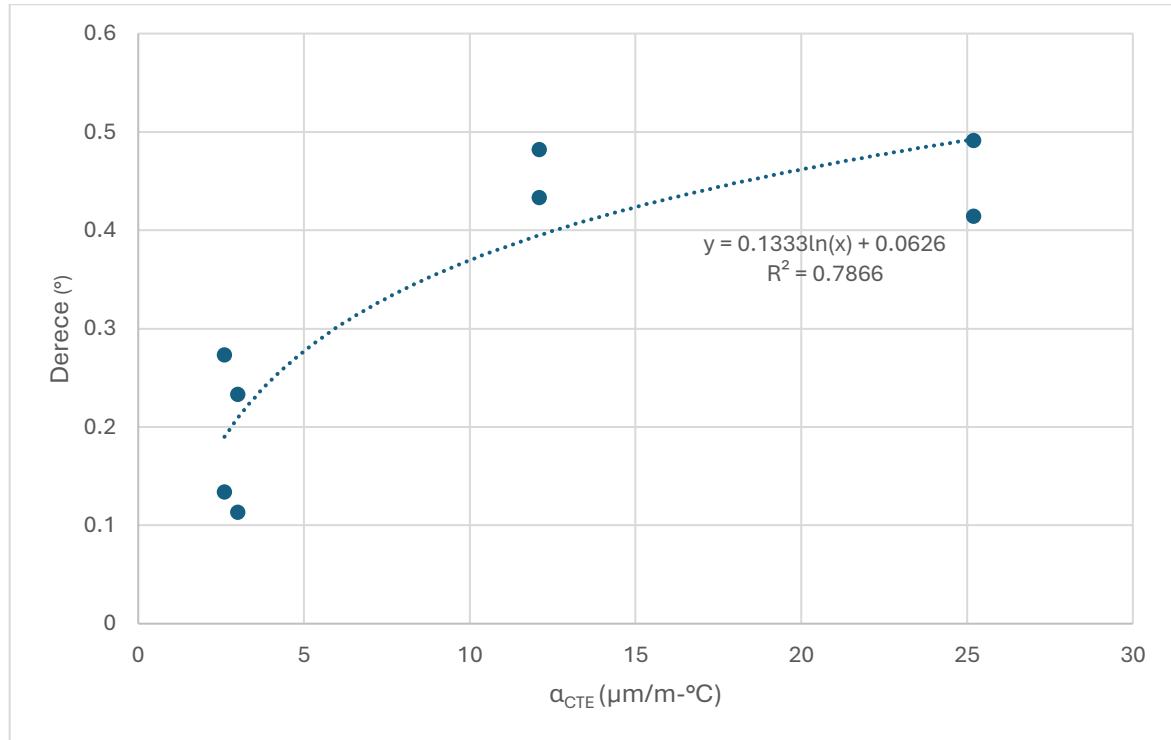
$\alpha_{CTE}$ : Parça üretiminde kullanılan erkek kalıp malzemesi ( $\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$ )

P1 parçalarına benzer şekilde, P2 parçaları için de toplam deformasyon ile analitik formül ile hesaplanan iç faktörler kaynaklı süreç deformasyonu farkı, dış faktörlerden kaynaklanan değerleri vermektedir. Değerler, Tablo 5.4'de belirtilmiştir.

**Tablo 5.5.** Dişı kalıp ile üretilen parça (P2) deformasyonu ile takım malzemesi ilişkisi

| P2      | Lineer Isıl Genleşme<br>Katsayısı ( $\alpha_{CTE}$ ) ( $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ ) | $\Delta\theta_{P2}$ ( $^\circ$ ) | Analitik<br>$\Delta\theta_{P2}$ ( $^\circ$ ) | $\Delta\theta_{P2}$ - Analitik<br>$\Delta\theta_{P2}$ Farkı( $^\circ$ ) |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| T1.P2.1 | 25.2                                                                                               | 1.434                            |                                              | 0.414                                                                   |
| T1.P2.2 | 25.2                                                                                               | 1.511                            |                                              | 0.491                                                                   |
| T2.P2.1 | 3.0                                                                                                | 1.133                            |                                              | 0.113                                                                   |
| T2.P2.2 | 3.0                                                                                                | 1.253                            | 1.020                                        | 0.233                                                                   |
| T3.P2.1 | 12.1                                                                                               | 1.502                            |                                              | 0.482                                                                   |
| T3.P2.2 | 12.1                                                                                               | 1.453                            |                                              | 0.433                                                                   |
| T4.P2.1 | 2.6                                                                                                | 1.154                            |                                              | 0.134                                                                   |
| T4.P2.2 | 2.6                                                                                                | 1.293                            |                                              | 0.273                                                                   |

Dişı kalıp kullanılarak üretilen P2 parçalarının dış faktörlere bağlı süreç deformasyonu ile parçaların üretildikleri kalıp malzemesi lineer ısı genleşme katsayısı arasında ilişki ise Şekil 5.4'te gösterilmiştir.

**Şekil 5.4.** Dış faktörler kaynaklı  $\Delta\theta_{P2}$  ( $^\circ$ ) ile takım malzemesi  $\alpha_{CTE}$  karşılaştırma

Dişi kalıp kullanıldığı durumda, dış faktörler kaynaklı deformasyonların, iç faktörler kaynaklı deformasyonlara ilave edilebilmesi için eşitlik (5.3) önerilmiştir.

$$\Delta\theta = \text{Analitik } \Delta\theta_i + 0.1333 \ln(\alpha_{CTE}) + 0.0626 \quad (5.3)$$

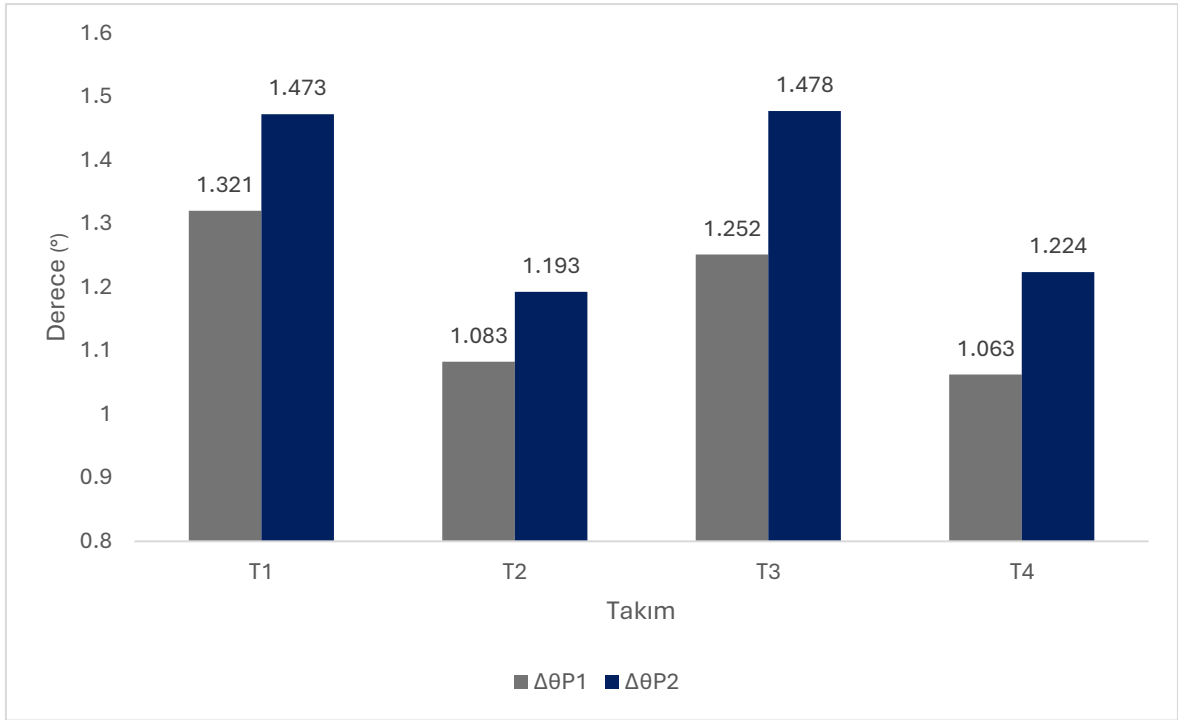
Tablo 5.6, erkek kalıp (P1) ve dişi kalıp (P2) kullanımına göre, numunelerin deney sonuçlarından elde edilen ortalama deformasyon değerinin, analitik deformasyon değerine göre yüzdesel artış oranlarını göstermektedir.

**Tablo 5.6.** Takım malzemesi ile süreç deformasyonu artışı

| Kalıp | Lineer Isıl Genleşme                               | P1                                                            | P2                                                            |
|-------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Kodu  | Katsayısı ( $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$ ) | $\Delta\theta_{P1} / \text{Analitik } \Delta\theta_{P1} (\%)$ | $\Delta\theta_{P2} / \text{Analitik } \Delta\theta_{P2} (\%)$ |
| T1    | 25.2                                               | 32.8                                                          | 44.4                                                          |
| T2    | 3.0                                                | 8.8                                                           | 17.0                                                          |
| T3    | 12.1                                               | 25.8                                                          | 44.9                                                          |
| T4    | 2.6                                                | 6.8                                                           | 20.0                                                          |

P1 numaralı test numuneleri için Tablo 5.6’da belirtilen takım malzemelerine ait ısı genleşme katsayılarına paralel olarak ısı genleşme katsayısı en büyük olan alüminyum (T1) takımındaki deformasyon en fazla görülmüş, ısı genleşme katsayısı en düşük olan çelik ve kompozit takımda (T2 ve T4) ise deformasyon analitik olarak hesaplanan değere yakın (%6.8 ila %8.8 üzerinde) gerçekleşmiştir.

P2 numaralı test numunelerinde ise Tablo 5.6’da belirtilen takım malzemelerine ait ısı genleşme katsayılarına göre, ısı genleşme katsayısı en düşük olan çelik ve kompozit takımda (T2 ve T4), deformasyon diğer numunelere göre daha az gerçekleşmiş, ancak analitik formülden %17 ila %20 daha fazla olmuştur. Alüminyum (T1) ve çelik (T3) takımlarda ise lineer ısı genleşme katsayıları arasında yaklaşık iki kat fark olmasına rağmen, elde edilen sonuçlar birbirine çok yakındır ve analitik formülün yaklaşık %45 üzerinde gerçekleşmiştir.



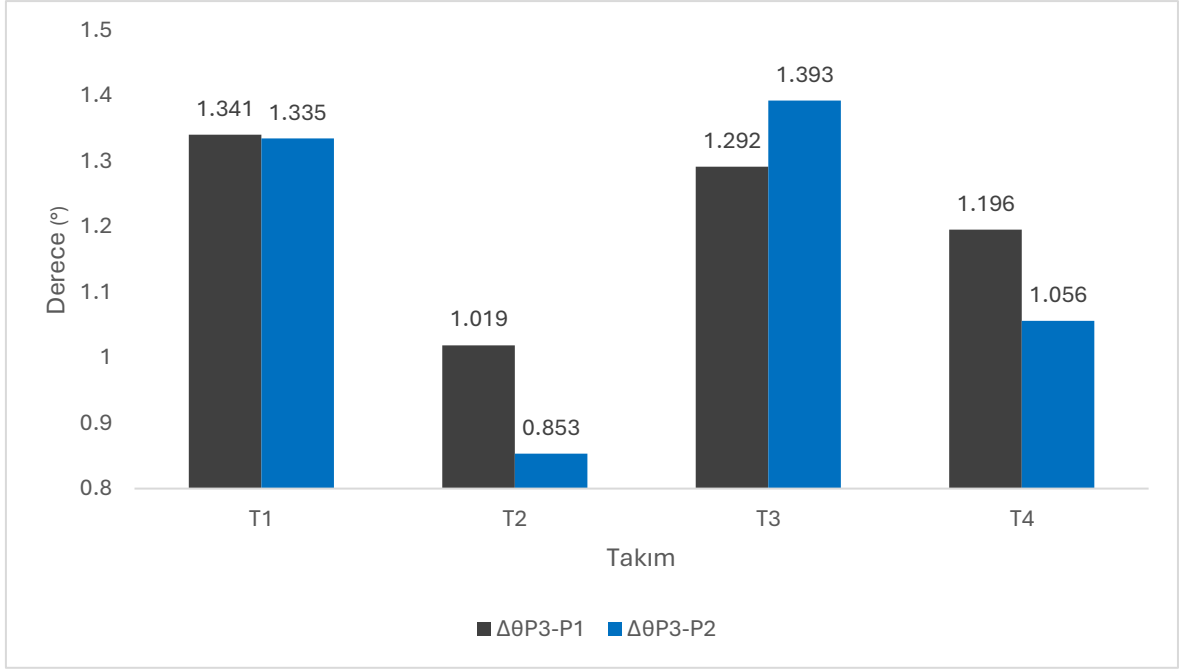
**Şekil 5.5.** Takım bazlı erkek-dişi takım karşılaştırması

Bire bir aynı geometri ve iç özelliklere sahip parçaların erkek veya dişi kalıplar üzerinde üretilmesi (P1 ve P2 parçaları) sonucunda gerçekleşen deformasyonlar incelendiğinde (Şekil 5.5) dişi kalıplar üzerinde üretilen parçalardaki deformasyonlar, erkek kalıp üzerinde üretilenlerden %10 ila %18 arasında değişen oranlarda daha fazla olmaktadır (Tablo 5.7).

**Tablo 5.7.** Erkek-dişi kalıp deformasyon artışı

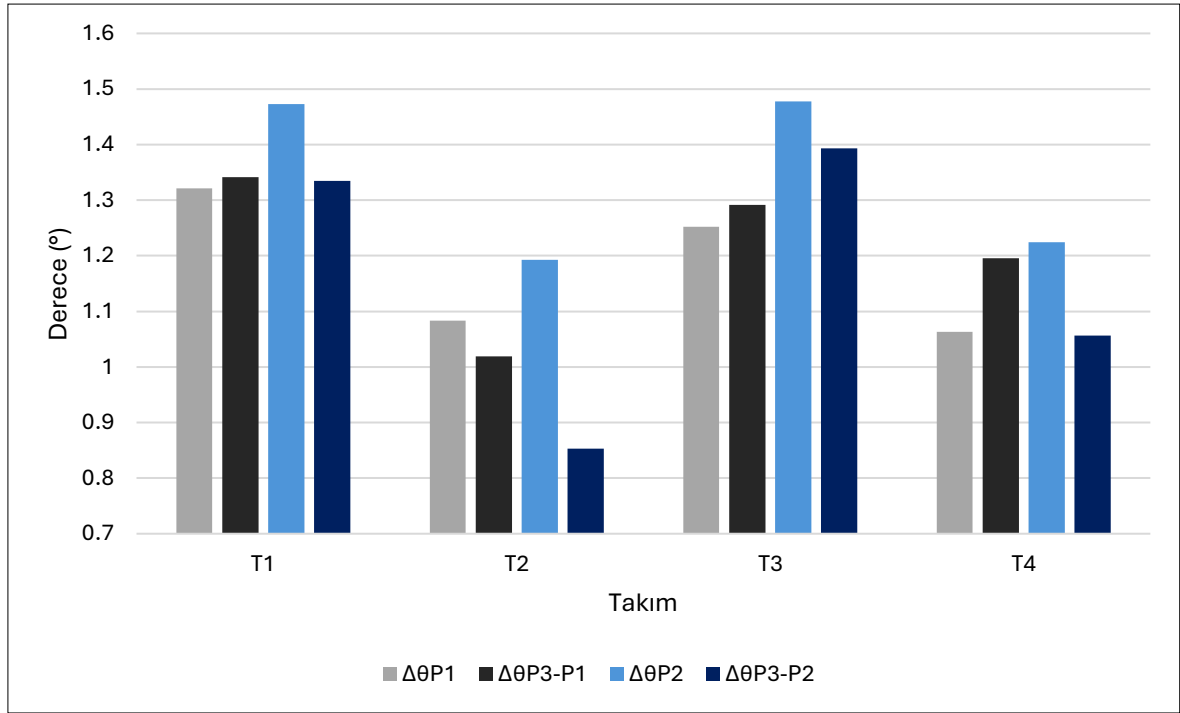
| Kalıp Kodu | Erkek-Dişi Kalıp Farkı (%) |
|------------|----------------------------|
| T1         | 11.5                       |
| T2         | 10.2                       |
| T3         | 18.1                       |
| T4         | 15.2                       |

P1 ve P2 parçalarının geometrik bileşkesi olan P3 parçasının (Şekil 4.4), P1 ve P2 parçalarına denk gelen açısal deformasyon değerleri  $\Delta\theta_{P3-P1}$  ile  $\Delta\theta_{P3-P2}$ , Tablo 5.3’de belirtilen değerler baz alınarak, Şekil 5.6’da sunulmuştur.



**Şekil 5.6.** Takım bazlı P3 parça deformasyonu

P1 parçasında meydana gelen deformasyon  $\Delta\theta_{P1}$  ile P3 parçasının ilgili flanş deformasyonu  $\Delta\theta_{P3-P1}$ , P2 parçasında meydana gelen deformasyon  $\Delta\theta_{P2}$  ile P3 parçasının ilgili flanş deformasyonu  $\Delta\theta_{P3-P2}$  karşılaştırması (“L” ve “Z” parçaların karşılaştırılması) Şekil 5.7’de görülmektedir. Kompozit takım (T2) hariç diğer takımlarda  $\Delta\theta_{P3-P1}$  açılarında artış, tüm takımlarda  $\Delta\theta_{P3-P2}$  açılarında düşüş görülmüştür.



**Şekil 5.7.** "L" ve "Z" geometrili parçalar üzerindeki açısal deformasyon değerleri karşılaştırması

Tablo 5.8, P3 parçası deformasyon değerlerinin ( $\Delta\theta_{P3-P1}$  ile  $\Delta\theta_{P3-P2}$ ), P1 ( $\Delta\theta_{P1}$ ) ve P2 ( $\Delta\theta_{P2}$ ) parça deformasyonlarına göre değişimini yüzdesel olarak göstermektedir.

**Tablo 5.8.** P3 parçası ile P1 ve P2 parçaları açı değişim yüzdeleri

| Kalıp Kodu | $\Delta\theta_{P3-P1} / \Delta\theta_{P1} (\%)$ | $\Delta\theta_{P3-P2} / \Delta\theta_{P2} (\%)$ |
|------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| T1         | 1.5                                             | -9.4                                            |
| T2         | -5.9                                            | -28.5                                           |
| T3         | 3.2                                             | -5.6                                            |
| T4         | 12.5                                            | -13.7                                           |

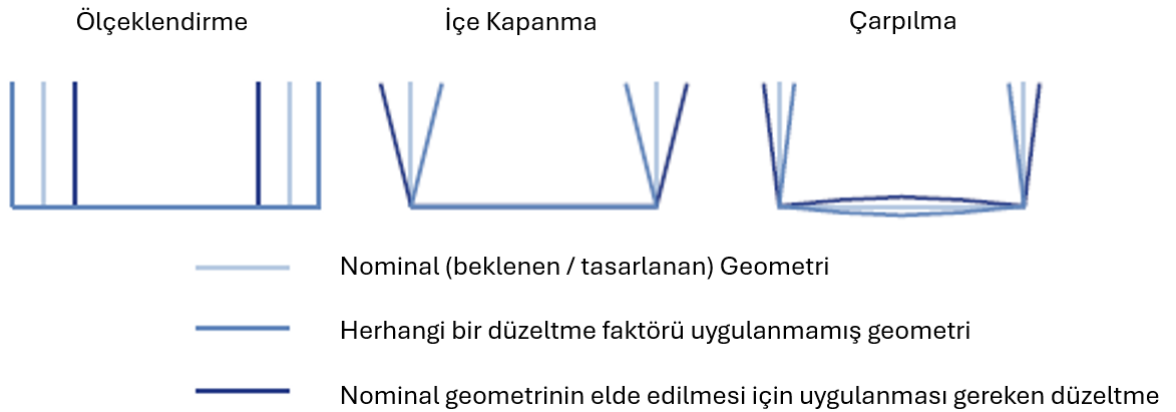
“L” geometriye sahip parçalar için önerilen eşitlik (5.2) ve (5.3), “Z” geometrili parçalarda hem erkek hem de dişi kalıbın birlikte kullanımı nedeniyle, Tablo 5.8’de sunulan kalıp malzemelerine göre değişim oranları göz önüne alınarak değerlendirilmelidir.

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Karbon fiber ile takviye edilmiş termoset matris yapısına sahip kompozit malzemelerin havacılık standartlarında üretimleri için ihtiyaç duyulan hassas geometrik toleransların yakalanabilmesi ancak süreç deformasyonlarının öngörülebilmesi ve kontrol altında tutulması ile mümkündür.

Havacılık endüstrisinde kompozit parça tasarımlarına, mekanik gereksinimler (mukavemet, yorulma dayanımı vb.) ile alan limitasyonları ve maliyet yön vermektedir. Kompozit parçaların süreç deformasyonlarına etki eden iç faktörlerin değiştirilmesi bu tasarım kriterlerini etkilediği için çoğunlukla dar sınırlar dahilinde kalmaktadır. Süreç deformasyonuna etki eden dış faktörlerinden kurlenme parametreleri ise parça mekanik özelliklerini doğrudan etkilediği için yine iç faktörlerde olduğu gibi limitasyona tabiidir. Bu nedenle süreç deformasyonlarının kompanse edilebilmesinin en verimli ve etkili yöntemi kalıp tasarımları olarak ortaya çıkmaktadır. Kalıp kompanzasyonu ise süreç başında deformasyon tahminin doğru yapılabilmesi ile mümkün olmaktadır.

Karbon takviyeli termoset kompozit yapıların üretim süreci boyunca karşılaştıkları üç temel deformasyon türü Şekil 6.1’de tanımlanmıştır [28].



Şekil 6.1. Temel deformasyon türleri

Bu çalışma kapsamında, test parçaları üretiminde kullanılan takımlara ısı genleşmeden kaynaklanan ölçeklendirme, takım malzemelerine bağlı olarak takım tasarım aşamasında uygulanmıştır. Test parçalarının boyutları ise literatürdeki çalışmalara istinaden

çarpılmanın baskın deformasyon olmayacağı şekilde sınırlandırılmıştır. Bu nedenle Tablo 5.1, Tablo 5.2 ve Tablo 5.3’de elde edilen değerler baskın deformasyon türünün içe kapanma olduğu öngörülerek değerlendirilmiştir.

### 6.1. Sonuçlar

- Karbon fiber ile güçlendirilmiş kompozit parçaların süreç deformasyonları, iç faktörler ve dış faktörler kaynaklı deformasyonların toplamıdır (Eşitlik (5.1)).
- “L” geometriye sahip, karbon fiber ile güçlendirilmiş kompozit parçaların, erkek serim kalıpları üzerinde üretilmesi durumunda, takım malzemesi lineer ısı genleşme katsayısı ile dış faktörlere bağlı süreç deformasyonu arasında eşitlik (5.2) ile tanımlanan bir ilişki bulunmaktadır. Üretim sürecinde dişi kalıp kullanılması durumunda ise takım malzemesi lineer ısı genleşme katsayısı ile dış faktörlere bağlı süreç deformasyonu arasında eşitlik (5.3) ile tanımlanan ilişki bulunmaktadır. Kalıp kompanzasyonu için ihtiyaç duyulan düzeltici katsayı hesabı için iç faktörlere bağlı parametreler ile hesaplanan analitik deformasyon değerlerine, erkek kalıp kullanılması durumunda önerilen eşitlik (5.2), dişi kalıp kullanılması durumunda önerilen eşitlik (5.3) kullanılarak kalıp malzeme parametrelerinin eklenmesi halinde üretilen parçanın istenilen ölçülere yakınsaması sağlanabilecektir.
- “L” geometrili parça üretimlerinde, dişi kalıp kullanıldığı durumlarda erkek kalıp kullanımına göre dış faktörler kaynaklı deformasyonlarda artış gerçekleşmektedir (Şekil 5.5). Artış oranları tüm test parçalarında %10 ila % 18 aralığında gerçekleşmiştir (Tablo 5.7). Erkek takımlarda parça iç yüzeyi (içe kapanmanın gerçekleştiği yüzey) kalıp yüzeyine temas etmekte ancak dişi kalıplarda bu yüzey vakum torbası ile temas halinde bulunmaktadır. Vakum torbasının, kalıp yüzeyi kadar sağlam bir baskı yüzeyi oluşturmaması bu farka neden olmaktadır. Artış oranları ile kalıp ısı genleşme faktörleri korelasyonu bulunmamaktadır.
- Dişi kalıp düzeltme faktörü hesaplarında eşitlik (5.3) kullanılabildiği gibi, eşitlik (5.2) ile erkek kalıp için hesaplamalar gerçekleştirildikten sonra Tablo 5.7’de belirtildiği gibi bulunan değerlerin %10 ila %18 arasında artırılması halinde gerçek değerlere yakınsama sağlanabilecektir.



- Erkek kalıp üzerinde üretilen “L” parça ve dişi takım üzerinde üretilen “L” parça deformasyon değerleri ile bu iki “L” parçanın geometrik bileşkesi olan “Z” geometrili parçalarda,  $[0]_x$  konfigürasyonunda serilen (prepreg) katmanların, fiberlerin sürekliliği nedeniyle, karşılıklı büküm açılarında değişikliğe neden olduğu ve birbirini etkilediği gözlemlenmiştir. Parçaların ayrı ayrı “L” geometriler ile üretilmesi ile bir bütün halinde “Z” geometride üretilmesi durumunda erkek kalıp açısai deformasyon değerlerinde artma, dişi kalıp açısai değerlerinde azalma gerçekleşmektedir (Tablo 5.8).
- Tek bükümlü parça geometrileri için 6061 T6, S355J2 çelik, LTM 217 prepreg ve Invar® 36 malzeme kalıp tasarımlarında tercih edilmektedir. Takım malzemelerine göre takım tasarım aşamasında ısıl genişmeden doğan ölçeklendirme faktörü, seçilen malzeme lineer ısıl genişme katsayısına göre uygulanmalı, iç kapanma açısai değerinin iç faktörler nedeniyle oluşan deformasyon analitik hesaplanmasına ise kalıp kullanımının erkek veya dişi olmasına göre önerilen eşitlik (5.2) ve eşitlik (5.3) kullanılarak takım malzemesi etkisi dahil edilmelidir. Analitik olarak hesaplanan toplam açısai süreç deformasyonu değeri, takım modellerine deformasyona ters yönde uygulanmalıdır. Bu düzeltici faktör üretim süreçleri sonrasında elde edilen parça ile tasarım geometrilerinin yakınsamasını sağlayacaktır.
- Çok bükümlü ve kompleks geometrili parçalarda ise açısai deformasyon mekanizmalarını etkileyen faktörlerin artması nedeniyle, deformasyonların minimize edilmesi için takım, lineer genişme faktörü en küçük olan malzeme tercih edilerek üretilmelidir. Bu tip parçalar için LTM 217 prepreg ve Invar® 36 malzemeler, çelik ve alüminyum malzemelere tercih edilmelidir.
- Kalıplar üzerinde üretimi gerçekleştirilecek parça sayısı (kalıpların kür – oda sıcaklığı döngüsü) arttıkça kalıp malzemesi olarak lineer genişme faktörü en küçük olan malzemeler tercih edilmelidir. Burada metalik ve lineer genişme faktörü görece düşük malzemeler Invar® 36 ve diğer çelik alaşımları kullanılmalıdır.
- Aynı geometriye sahip parçalarda erkek kalıpların, dişi kalıplara göre tercih edilmesi süreç deformasyonlarını azaltacaktır.

- Prototip veya üretim adedi düşük parçalar için maliyet göz önüne alındığında alüminyum kalıp malzemeleri kullanılabilir. Bu durumda süreç deformasyonlarının yönetilebilmesi için analitik deformasyon hesabı erkek – dişi kalıp kullanımına göre eşitlik (5.2) veya eşitlik (5.3) ile genişletilerek, takımlara uygulanmalıdır.

## 6.2. Gelecek Çalışmalar

Eşitlik (5.2) ve eşitlik (5.3) ile önerilen karbon fiber ile güçlendirilmiş kompozit “L” geometrili parçaların süreç deformasyonu açısal analitik değeri düzeltme faktörünün, erkek ve dişi kalıplar üzerinde üretilen test numune sayısının arttırılarak doğrulanması ve yine “L” geometriye sahip ancak farklı flanş boyu, kalınlık, genişlik ve farklı fiber dizilimine sahip parçalar için de test edilmesi faydalı olacaktır.

İleride yapılması planlanan süreç deformasyonu çalışmalarında kullanılacak takımların, iç özellikleri aynı parçalarda erkek ve dişi kalıp olarak denenmesi, farkın netleştirilmesi ve kural kümesi oluşturulmasında faydalı olacaktır.

“Z” geometriye sahip parçalarda üretim süreç parametrelerinin dış faktörler kaynaklı kısmı için veri olgunluğunu arttırmak üzere, test numune sayısının arttırılması karşılıklı flanş açılarının etkilerini öngörebilmeyi sağlayacaktır.

## KAYNAKLAR

- [1] W. G. Roeseler, S. Branko ve M. U. Kismarton, «Composite Structures: The First 100 Years,» 16th International Conference on Composite Materials, Kyoto, 2007.
- [2] R. P. L. Nijssen, Composites - An Introduction, Inholland University of Applied Sciences: CompositesNL, 2015.
- [3] S. Kesarwani, «Polymer Composites in Aviation Sector - A Brief Review Article,» International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), cilt 6, no. 06, pp. 518-525, 2017.
- [4] Y. Li, Y. Xiao, Y. Yu, K. Ji ve D. Li, «A review on the tooling technologies for composites manufacturing of aerospace structures: materials, structures and processes,» ScienceDirect Composites Part A, p. 154, 2021.
- [5] C. Red, «The Outlook for Thermoplastic in Aerospace Composite, 2014-2023,» High-Performance Composites, pp. 54-63, 2014.
- [6] B. Wang, S. Fan, J. Chen, W. Yang, W. Liu ve Y. Li, «A review on prediction and control of curing process-induced deformation of continuous fiber-reinforced thermosetting composite structures,» Elsevier, cilt Composites: Part A, no. 165, pp. 1-32, 2023.
- [7] R. Flanagan, «The dimensional stability of composite laminates and structures,» Queen's University, Belfast, 1998.
- [8] E. Kappel, «Compensating process-induced distortions of composite structures: A short communication,» Composite Structures, no. 192, pp. 67-71, 2018.
- [9] E. Kappel, D. Stefaniak ve G. Fernlund, «Predicting process-induced distortions in composite manufacturing - A pheno-numerical simulation strategy,» Composite Structures, cilt 120, pp. 98-106, 2015.
- [10] S.-F. Hwang, «An Overview of Angle Deviations of Fiber-Reinforced Polymer Composite Angular Laminates,» Materials, cilt 4844, pp. 1-16, 2023.
- [11] C. Albert ve G. Fernlund, «Spring-in and warpage of angled composite laminates,» Composites Science and Technology, cilt 62, pp. 1895-1912, 2002.

- [12] E. Kappel, D. Stefaniak ve C. Hühne, «Process distortions in prepreg manufacturing - An experimental study on CFRP L-profiles,» *Composite Structures*, pp. 615-625, 18 07 2013.
- [13] J.-y. Lian, Z.-b. Xu ve X.-d. Ruan, «Analysis and control of cured deformation of fiber-reinforced thermosetting composites: a review,» *Journal of Zhejiang University-Science A*, cilt 5, no. 20, pp. 311-333, 2019.
- [14] G. Twigg, A. Poursartip ve G. Fernlund, «Tool-Part Interaction in Composites Processing. Part I: Experimental Investigation and Analytical Model,» *Composites*, cilt Part A, no. 35, pp. 121-133, 2003.
- [15] G. Twigg, A. Poursartip ve G. Fernlund, «Tool-part interaction in composites processing. Part II: numerical modelling,» *Composites Part A*, no. 35, pp. 135-141, 2004.
- [16] G. Fernlund, N. Rahman, R. Courdji, M. Bresslauer, A. Poursartip, K. Willden ve K. Nelson, «Experimental and numerical study of the effect of cure cycle, tool surface, geometry and lay-up on the dimensional fidelity of autoclave-processes composite parts,» *Elsevier*, cilt *Composites: Part A*, no. 33, pp. 341-351, 2002.
- [17] C. K. Huang ve S. Y. Yang, «Warping in advanced composite tools with varying angles and radii,» *Composites Part A*, pp. 891-893, 04 04 1997.
- [18] D. W. Radford ve T. S. Rennick, «Separating Sources of Manufacturing Distortion in Laminated Composites,» *Reinforced Plastics and Composites*, no. 19, pp. 621-641, 2000.
- [19] E. Hörberg, «An experimental investigation of shape distortions in aerospace composites,» *Licentiate Thesis in Aerospace Engineering*, Stockholm, 2020.
- [20] M. R. Wisnom, K. D. Potter ve N. Ersoy, «Shear-lag Analysis of the Effect of Thickness on Spring-in of Curved Composites,» *Composite Materials*, cilt 41, pp. 1311-1322, 2007.
- [21] E. Hörberg, T. Nyman, M. Akermo ve S. Hallström, «Thickness effect on spring-in of prepreg composite L-profiles - An experimental study,» *Elsevier*, no. 209, pp. 499-507, 2019.

- [22] A. Ding, J. Wang, A. Ni ve S. Li, «A new analytical solution for cure-induced spring-in of L-shaped composite parts,» *Composites Science and Technology*, no. 171, pp. 1-12, 2019.
- [23] A. Ding, J. Wang ve S. Li, «Understanding process-induced spring-in of L-shaped composite parts using analytical solution,» *Composite Structures*, cilt 250, no. 112629, 2020.
- [24] G. Fernlund ve A. Poursartip, «The Effect of Tooling Material, Cure Cycle, and Tool Surface Finish on Spring-in of Autoclave Processed Curved Composite Parts,» Department of Metals and Materials Engineering, The University of British Columbia, Vancouver, 2002.
- [25] E. Kappel, D. Stefaniak ve C. Hühne, «Process-induced distortions in CFRP manufacturing: A bottleneck for high-rate production scenarios,» CFK-Valley Stade Convention, 2014.
- [26] G. Twigg, «Tool-part interaction in composites processing,» The University of British Columbia, Vancouver, 2001.
- [27] K. Potter, M. Campbell, C. Langer ve M. Wisnom, «The Generation of Geometrical Deformations due to Tool/Part Interaction in the Manufacture of Composite Components,» *Composites A*, pp. 301-308, 02 06 2004.
- [28] E. Kappel, «Forced-interaction and spring-in-relevant initiators of process-induced distortions in composite manufacturing,» *Composite Structures*, pp. 217-229, 11 January 2016.
- [29] N. Traiforos, M. Matveev, D. Chronopoulos ve T. Turner, «Spring-in of composite L-shape specimens: An experimental and numerical investigation,» *Composite Structures*, no. 310, pp. 1-18, 2023.
- [30] A. Ding, S. Fang, X. Li, S. Liangliang, J. Wang ve H. Chen, «Experimental and numerical investigation of tool-part interaction on the process-induced distortions in composite structures,» *Composite Structures*, no. 279, pp. 1-10, 2022.
- [31] C. Bellini, L. Sorrentino, P. W. ve C. A., «Spring-in analysis of CFRP thin laminates: numerical and experimental results,» *Composite Structures*, no. 173, pp. 17-24, 2017.

- [32] N. Ersoy, T. Garstka, K. Potter, R. M. Wisnom, D. Porter, M. Clegg ve G. Stringer, «Development of the properties of a carbon fibre reinforced thermosetting composite through cure,» Composites: Part A, no. 41, pp. 401-409, 2010.
- [33] K. Marlett, Y. Ng, J. Tomblin ve E. Hooper, «Hexcel 8552S AS4 Plain Weave Fabric Prepreg 193 gsm & 38% RC Qualification Material Property Data Report,» National Institute for Aviation Research, Wichita, 2011.
- [34] E. Clarkson, «Hexcel 8552 AS4 Unidirectional Prepreg Qualification Statistical Analysis Report,» National Institute for Aviation Research, Wichita, 2011.

