EKLEMELİ İMALAT ALANINDA ÇOK PARÇALI YAPILARIN ARAYÜZLERİNDE KULLANILAN KENETLENME GEOMETRİLERİNİN OPTİMİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Oktay Gökhan ÇELİK

Danışman
Doç. Dr. Özgür VERİM

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Nisan 2026

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EKLEMELİ İMALAT ALANINDA ÇOK PARÇALI YAPILARIN ARAYÜZLERİNDE KULLANILAN KENETLENME GEOMETRİLERİNİN OPTİMİZASYONU

Oktay Gökhan ÇELİK

Danışman
Doç. Dr. Özgür VERİM

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Nisan 2026

TEZ ONAY SAYFASI

Oktay Gökhan ÇELİK tarafından hazırlanan "EKLEMELİ İMALAT ALANINDA ÇOK PARÇALI YAPILARIN ARAYÜZLERİNDE KULLANILAN KENETLENME GEOMETRİLERİNİN OPTİMİZASYONU" adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 17 / 04 / 2026 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Anabilim Dalı Adı Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman **:** Doç. Dr. Özgür VERİM

Başkan **:** Doç. Dr. Onur ÖZBEK
Düzce Üniversitesi, Gümüşova M.Y.O …… İmza ……

Üye **:** Doç. Dr. Özgür VERİM
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fak. …… İmza ……

Üye **:** Doç. Dr. İbrahim YAVUZ
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fak. …… İmza ……

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
..... /..... /..... tarih ve
……. sayılı kararıyla onaylanmıştır.

…….
Prof. Dr. Bekir YALÇIN
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

17 / 04 / 2026

İmza

Oktay Gökhan ÇELİK

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

EKLEMELİ İMALAT ALANINDA ÇOK PARÇALI YAPILARIN ARAYÜZLERİNDE KULLANILAN KENETLENME GEOMETRİLERİNİN OPTİMİZASYONU

Oktay Gökhan ÇELİK

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Özgür VERİM

Eklemeli imalat teknolojilerindeki gelişmeler, farklı malzeme özelliklerinin tek bir yapıda birleştirilmesine olanak tanıyan Çoklu Malzeme Eklemeli İmalat (MMAM) yöntemini ön plana çıkarmıştır. Ancak, termoplastik malzemelerin kimyasal uyumsuzluğu ve termal genleşme farkları, malzeme arayüzlerinde zayıf yapışmaya ve mekanik performans kayıplarına neden olmaktadır. Bu tez çalışmasında, malzeme arayüzlerindeki bağ dayanımını artırmak ve gerilme dağılımını iyileştirmek amacıyla geometrik makro-kenetlenme stratejileri geliştirilmiş ve optimize edilmiştir. Çalışma kapsamında, T-bağlantı, Kırlangıç bağlantı ve Dairesel bağlantı olmak üzere üç farklı bağlantı modeli tasarlanmıştır. Bu geometrilerin mekanik davranışları, Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) kullanılarak simüle edilmiş ve von-Mises eşdeğer gerilme dağılımları analiz edilmiştir. Geometrik parametrelerin (açı, boyun genişliği, yarıçap, gömülme derinliği vb.) arayüz performansı üzerindeki etkilerini belirlemek için Box-Behnken deney tasarımı ve Yanıt Yüzey Metodu (YYM) kullanılmıştır. Elde edilen matematiksel modeller ışığında, Çok Amaçlı Genetik Algoritma (MOGA) kullanılarak her bir eklem tipi için optimum geometrik parametreler belirlenmiştir. Analiz sonuçları, T-Bağlantı modelinde keskin köşelerin ciddi gerilme yığılmalarına neden olduğunu; Kırlangıç kuyruğu Bağlantı modelinde ise kilitlenme derinliği artışının tutunmayı artırmasına rağmen boyun bölgesinde çentik etkisi yarattığını göstermiştir. MOGA ile optimize edilen Kırlangıç kuyruğu geometrisinde bu etki minimize edilmiştir. Çalışmanın en çarpıcı bulgusu ise

Dairesel Bağlantı modelinde elde edilmiştir. Dairesel formun sağladığı geometrik süreklilik sayesinde, optimize edilen Dairesel Bağlantı tasarımı, diğer modellere kıyasla gerilmeyi arayüz boyunca en homojen şekilde dağıtmış ve von-Mises gerilme değerlerinde önemli düşüşler sağlamıştır. Gerçekleştirilen optimizasyon çalışmaları sonucunda von-Mises eşdeğer gerilme değerlerinde belirgin iyileşmeler kaydedilmiş olup; bu azalma oranları T-Bağlantı modeli için %7.94, Kırlangıç kuyruğu Bağlantı modeli için %13.08 ve Dairesel Bağlantı modeli için ise %7.96 olarak gerçekleşmiştir. Bu çalışma, MMAM ile üretilen parçaların birleşim noktalarındaki kenetlenme arayüz geometrilerinin parametrik optimizasyonunun, yapısal bütünlüğü ve mekanik performansı artırmada kritik bir rol oynadığını ortaya koymaktadır.

2026, xi + 90 sayfa

Anahtar Kelimeler: Eklemeli İmalat, Çoklu Malzeme, Arayüz Optimizasyonu, Sonlu Elemanlar Analizi, Genetik Algoritma, Kenetlenme Geometrisi.

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

TITLE OPTIMIZATION OF INTERLOCKING GEOMETRIES USED IN THE INTERFACES OF MULTI-PART STRUCTURES IN ADDITIVE MANUFACTURING OF THESIS

Oktay Gökhan ÇELİK

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Özgür VERİM

Advancements in additive manufacturing technologies have brought Multi-Material Additive Manufacturing (MMAM) to the forefront, enabling the integration of distinct material properties within a single structure. However, the chemical incompatibility and thermal expansion mismatches of thermoplastic materials lead to weak adhesion at material interfaces and subsequent losses in mechanical performance. In this thesis study, geometric macro-interlocking strategies were developed and optimized to enhance bond strength at material interfaces and improve stress distribution. Within the scope of the study, three distinct connection models, namely T-Joint, Dovetail Joint, and Dairesel Joint, were designed. The mechanical behaviors of these geometries were simulated using the Finite Element Method (FEM), and von-Mises equivalent stress distributions were analyzed. Box-Behnken experimental design and Response Surface Methodology (RSM) were employed to investigate the influence of geometric parameters (angle, neck width, radius, embedding depth, etc.) on interface performance. Based on the derived mathematical models, the optimum geometric parameters for each joint type were determined using the Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA). The analysis results revealed that sharp corners in the T-Joint model caused severe stress concentrations, whereas in the Dovetail Joint model, although increasing the interlocking depth enhanced retention, it induced a notch effect in the neck region. This effect was minimized in the Dovetail geometry optimized via MOGA. The most notable finding of the study was

observed in the Dairesel Joint model. Owing to the geometric continuity provided by its circular form, the optimized Dairesel Joint design distributed the stress most homogeneously along the interface compared to the other models and achieved significant reductions in von-Mises stress values. As a result of the optimization studies conducted, significant improvements were observed in the von-Mises equivalent stress values; the reduction rates were 7.94% for the T-Joint model, 13.08% for the Dovetail Joint model, and 7.96% for the Dairesel Joint model. This study demonstrates that the parametric optimization of interlocking interface geometries at the connection regions of MMAM-manufactured parts plays a critical role in enhancing structural integrity and mechanical performance.

2026, xi + 90 pages

Keywords: Additive Manufacturing, Multi-Material, Interface Optimization, Finite Element Analysis, Genetic Algorithm, Interlocking Geometry.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın her aşamasında sevgisiyle bana güç veren, daima yanımda olan kıymetli aileme kalpten ve sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Her koşulda yanımda olan ailemin desteği, bu çalışmanın en büyük dayanağı olmuştur. Tez çalışmam boyunca bilgi ve tecrübeleriyle bana rehberlik eden danışmanım Doç. Dr. Özgür VERİM başta olmak üzere; bilimsel bakış açımı geliştirmeme katkı sunan, kıymetli görüş ve önerileriyle çalışmama yön veren tüm değerli hocalarıma ve çalışma arkadaşlarıma içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Oktay Gökhan ÇELİK

Afyonkarahisar 2026

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET i
ABSTRACT iii
TEŞEKKÜR v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ viii
ŞEKİLLER DİZİNİ ix
ÇİZELGELER DİZİNİ xii
1. GİRİŞ 1
1.1 İmalat Yöntemlerinin Tarihsel Gelişimi ve Endüstriyel Dönüşüm Süreci 1
1.2 Eklemeli İmalatın İmalat Sektöründeki Genişleyen Etkisi ve Önemi 2
1.3 Eriyik Biriktirme Yöntemi (FFF) ve Çalışma Prensibi 2
1.4 Modern Üretim Süreçlerinde Geometrik Kenetlenmeli Sökülebilir Bağlantıların Önemi 3
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ 6
3. MATERYAL ve METOT 21
3.1 Çalışmanın Metodolojisi 21
3.2 Kenetlenme Arayüz Geometrilerinin Belirlenmesi 22
3.2.1 T-bağlantı Kenetlenme Modeli 23
3.2.2 Kırlangıç kuyruğu Kenetlenme Modeli 25
3.2.3 Dairesel Bağlantı Kenetlenme Modeli 28
3.3 Nümerik Analiz 30
3.4 Parametrik Çalışma Uzayı ve DOE 31
3.4.1 T-Bağlantı Kenetlenme Modeli Deney Tasarımı 32
3.4.2 Kırlangıç kuyruğu Bağlantı Kenetlenme Modeli Deney Tasarımı 33
3.4.3 Dairesel Bağlantı Kenetlenme Modeli Deney Tasarımı 34
3.5 YYM Optimizasyonu 35
4. BULGULAR 37
4.1 Statik SEY Analizleri 38
4.1.1 T-Bağlantı Kenetlenme Modeli 38
4.1.2 Kırlangıç kuyruğu bağlantı Kenetlenme Modeli 39
4.1.3 Dairesel Bağlantı Kenetlenme Modeli 41
4.2. Tepki Yüzeyi 2D Analizleri 42

4.2.1 T-Bağlantı Kenetlenme Modeli 43
4.2.2 Kırlangıç kuyruğu Bağlantı Kenetlenme Modeli 46
4.2.3 Dairesel Bağlantı Kenetlenme Modeli 49
4.3. Tepki Yüzeyi 3B Analizleri 51
4.3.1 T-bağlantı Kenetlenme Modeli 51
4.3.2 Kırlangıç kuyruğu Bağlantı Kenetlenme Modeli 56
4.3.3 Dairesel Bağlantı Kenetlenme Modeli 60
4.4. Optimizasyon 64
4.4.1 T-Bağlantı Kenetlenme Modeli 64
4.4.2 Kırlangıç kuyruğu Bağlantı Kenetlenme Modeli 68
4.4.3 Dairesel Bağlantı Kenetlenme Modeli 72
5. TARTIŞMA ve SONUÇ 77
5.1. T-bağlantı Kenetlenme Modeli 80
5.2. Kırlangıç Kuyruğu Bağlantı Kenetlenme Modeli 81
5.3. Dairesel Bağlantı Kenetlenme Modeli 82
5.4. Optimum Kenetlenme Geometrilerinin Explicit Dynamics Çekme Testi 83
6. KAYNAKLAR 88
ÖZGEÇMİŞ 92

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar	
ABS	Akrilonitril Bütadien Stiren
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
DJP1	Kırlangıç Kuyruğu Bağlantı Boyun genişliği
DJP3	Kırlangıç Kuyruğu Bağlantı Gömme derinliği
DOE	Design of Experiment
Eİ	Eklemeli İmalat
FD1	Köşe radyusu
FFF	Fused Filament Fabrication
H86	Dairesel bağlantı Boyun uzunluğu
M1A1	T Bağlantı Alt kilit açısı
M1A2	T Bağlantı Üst kilit açısı
M1P1	T Bağlantı Boyun genişliği
M1P2	T Bağlantı Gömme derinliği
M1P3	T Bağlantı Kilit kafa genişliği
MMAM	Multi Material Additive Manufacturing
MOGA	Multi-Objective Genetic Algorithm
R85	Dairesel bağlantı başlık yarıçapı
RSO	Response Surface Optimization
SEY	Sonlu Elemanlar Yöntemi
V84	Dairesel bağlantı Boyun genişliği
YYM	Yanıt Yüzeyi Metodu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1 Sanayi devrimlerinin gelişim süreçleri 2

Şekil 1.2 FFF şematik gösterimi ve ekstrüzyon yöntemleri 3

Şekil 2.1 Dört farklı arayüz kenetlenmesinin geometrik modeli 11

Şekil 2.2 Geometrik kenetlenme arayüzlerinin tasarımının sayısal değerleri 12

Şekil 2.3 Araştırılan arayüzler (a) doğrudan birleşim arayüzü, (b) T şekli birleşim arayüzü, (c) Mickey Mouse birleşim arayüzü 13

Şekil 2.4 Farklı gömme mesafelerine sahip üç tür mekanik kilitli yapılar 14

Şekil 2.5 Test edilmiş arayüz geometrileri (a) T bağlantı şekli, (b) U bağlantı şekli, (c) kırlangıç kuyruğu bağlantı şekli 16

Şekil 2.6 1) Farklı arayüz geometrileri için PLA-PLA test numunelerinin kırılma bölgelerinin çizimi ve fotoğrafları, 2) farklı arayüz geometrileri için PLA-TPU test numunelerinin kırılma bölgelerinin çizimi ve fotoğrafları 17

Şekil 2.7 Çekme testi sonucunda hasar gören test numunelerinin üst üste binme mesafeleri ve görüntüleri 18

Şekil 2.8 R2 omega şekilli test numunesinin sonuçlarının karşılaştırılması 19

Şekil 2.9 R12 kırlangıç kuyruğu şekilli numunenin sonuçlarının karşılaştırılması 19

Şekil 3.1 (a) T-bağlantı kenetlenme modeli ve parametreleri (b) mesh modeli (c) sınır şartları 24

Şekil 3.2 (a) Kırlangıç kuyruğu bağlantı kenetlenme modeli ve parametreleri (b) mesh modeli (c) sınır şartları 26

Şekil 3.3 (a) Dairesel bağlantı kenetlenme modeli ve parametreleri (b) mesh modeli (c) sınır şartları 29

Şekil 4.1 T-bağlantı kenetlenme arayüzüne sahip numunenin çekme testi simülasyonuna ait sonuç çıktıları (a) von-Mises eşdeğer gerilme, (b) eşdeğer elastik birim şekil değiştirme, (c) toplam deformasyon, (d) maksimum kayma gerilmesi, (e) bağlantı noktasındaki sürtünme gerilmesi 39

Şekil 4.2 Kırlangıç kuyruğu bağlantı kenetlenme arayüzüne sahip numunenin çekme testi simülasyonuna ait sonuç çıktıları (a) von-Mises eşdeğer gerilme, (b) eşdeğer elastik birim şekil değiştirme, (c) toplam deformasyon, (d) maksimum kayma gerilmesi, (e) bağlantı noktasındaki sürtünme gerilmesi 40

Şekil 4.3 Dairesel bağlantı kenetlenme arayüzüne sahip numunenin çekme testi simülasyonuna ait sonuç çıktıları (a) von-Mises eşdeğer gerilme, (b) eşdeğer elastik birim şekil değiştirme, (c) toplam deformasyon, (d) maksimum kayma gerilmesi, (e) bağlantı noktasındaki sürtünme gerilmesi 42

Şekil 4.4 T-Bağlantı kenetlenme arayüzüne ait uyum iyiliği grafiği 44

Şekil 4.5 T-bağlantı kenetlenme arayüzüne ait girdi parametrelerinin çıktı parametreleri üzerine etkisini gösteren yerel hassasiyet grafikleri 45

Şekil 4.6 Kırlangıç kuyruğu bağlantı kenetlenme arayüzüne ait uyum iyiliği grafiği ... 47

Şekil 4.7 Kırlangıç kuyruğu bağlantı kenetlenme arayüzüne ait girdi parametrelerinin çıktı parametreleri üzerine etkisini gösteren yerel hassasiyet grafikleri 48

Şekil 4.8 Dairesel bağlantı kenetlenme arayüzüne ait uyum iyiliği grafiği 49

Şekil 4.9 Dairesel bağlantı kenetlenme arayüzüne ait girdi parametrelerinin çıktı parametreleri üzerine etkisini gösteren yerel hassasiyet grafikleri..... 50

Şekil 4.10 T-bağlantı hassasiyet grafiği 52

Şekil 4.11 T-bağlantı kenetlenme arayüzüne ait girdi parametrelerinin çıktı parametresi üzerine etkisini gösteren 3B grafikleri 54

Şekil 4.12 Kırlangıç kuyruğu bağlantı hassasiyet grafiği 57

Şekil 4.13 Kırlangıç kuyruğu bağlantı kenetlenme arayüzüne ait girdi parametrelerinin çıktı parametresi üzerine etkisini gösteren 3B grafikleri 59

Şekil 4.14 Dairesel bağlantı hassasiyet grafiği..... 61

Şekil 4.15 Dairesel bağlantı kenetlenme arayüzüne ait girdi parametrelerinin çıktı parametresi üzerine etkisini gösteren 3B grafikleri 63

Şekil 4.16 T-bağlantı kenetlenme arayüzüne ait beş optimizasyon aday noktası ve bu noktalara karşılık gelen doğrulanmış eşdeğer gerilme dağılımı görselleri ... 66

Şekil 4.17 T-bağlantı aday noktaları grafiği (P1=M1A1, P2=M1A2, P3=M1P1, P4=M1P3, P5=M1P2, P14=FD1, P11= von-Mises Stres)..... 67

Şekil 4.18 T-bağlantı tradeoff grafiği (P2= M1A2, P11= von-Mises Stres)..... 68

Şekil 4.19 Kırlangıç kuyruğu bağlantı kenetlenme arayüzüne ait beş optimizasyon aday noktası ve bu noktalara karşılık gelen doğrulanmış eşdeğer gerilme dağılımı görselleri..... 70

Şekil 4.20 Kırlangıç kuyruğu bağlantı aday noktaları grafiği (P14=DJP1, P16=DJP3, P19=FD1, P11= von-Mises Stres) 71

Şekil 4.21 Kırlangıç kuyruğu bağlantı tradeoff grafiği (P11= von-Mises Stres) 72

Şekil 4.22 Dairesel bağlantı kenetlenme arayüzüne ait beş optimizasyon aday ve noktası bu noktalara karşılık gelen doğrulanmış eşdeğer gerilme dağılımı görselleri 74

Şekil 4.23 Dairesel bağlantı aday noktaları grafiği (P19=V84, P21=H86, P22=R85, P23=FD1, P11= von-Mises Stres) 75

Şekil 4.24 Dairesel bağlantı tradeoff grafiği (P11= von-Mises Stres) 76

Şekil 5.1 T bağlantı kenetlenme modelleri için optimize edilmiş geometriler ve maksimum von-Mises gerilme dağılımlarının karşılaştırmalı analizi 78

Şekil 5.2 Kırlangıç kuyruğu ve dairesel kenetlenme modelleri için optimize edilmiş geometriler ve maksimum von-Mises gerilme dağılımlarının karşılaştırmalı analizi 79

Şekil 5.3 von-Mises gerilmesini maksimize eden kenetlenme geometrilerinin dinamik çekme yükü altındaki deformasyon aşamaları ve eşdeğer gerilme dağılımları83

Şekil 5.4 Maksimum von-Mises gerilmesini minimize eden optimize kenetlenme geometrilerinin dinamik çekme yükü altındaki deformasyon aşamaları ve eşdeğer gerilme dağılımları 84

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 1.1 T-bağlantı, kırlangıç kuyruğu ve dairesel bağlantı türlerinin kullanım alanları 4

Çizelge 3.1 ABS genel malzeme özellikleri..... 21

Çizelge 3.2 T-bağlantı kenetlenme modeli şekil bağlantısı parametre sınır şartları 23

Çizelge 3.3 Kırlangıç kuyruğu bağlantı kenetlenme modeli şekil bağlantısı parametre sınır şartları 26

Çizelge 3.4 Dairesel bağlantı kenetlenme modeli şekil bağlantısı parametre sınır şartları 28

Çizelge 3.5 T-bağlantı kenetlenme modeli Box-Behnken deney tasarımı girdileri 32

Çizelge 3.6 Kırlangıç kuyruğu bağlantı kenetlenme modeli Box-Behnken deney tasarımı girdileri..... 34

Çizelge 3.7 Dairesel bağlantı kenetlenme modeli Box-Behnken deney tasarımı girdileri 35

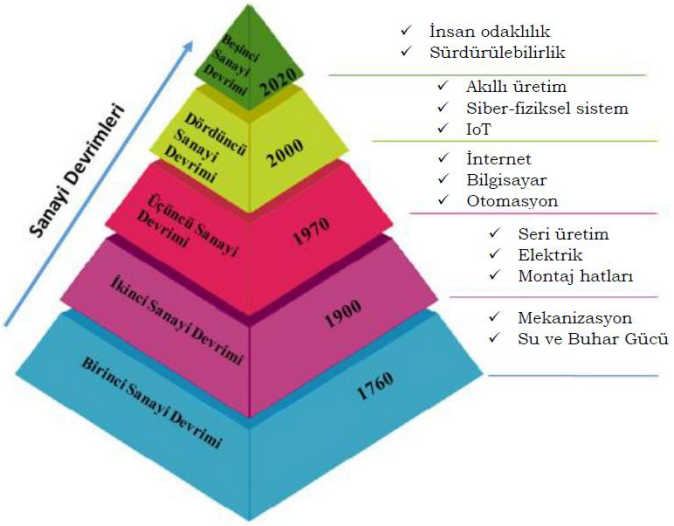
1. GİRİŞ

1.1 İmalat Yöntemlerinin Tarihsel Gelişimi ve Endüstriyel Dönüşüm Süreci

İmalat yöntemleri, insanlığın yaşayış biçimi ve endüstriyel gelişim üzerinde doğrudan etkili olan temel unsurlardan biri olarak kabul edilmiştir. Bu alandaki en köklü dönüşüm, 18. yüzyılın sonlarında buhar gücünün mekanik üretimle birleştirilmesiyle tetiklenen Sanayi Devrimi ile yaşanmış; el işçiliğinden makineleşmeye geçiş, kitlesel üretimin ve modern endüstriyel toplumun temellerini atmıştır. Zaman içinde daha da sistemli hale getirilen bu süreç, 20. yüzyılın başlarında Henry Ford'un otomobil montaj hatlarıyla somutlaştırılan seri üretim modeline evrilmiş ve günümüzdeki geleneksel imalat yöntemlerinin temellerinin atılmasını sağlamıştır (Dengiz 2017).

Geleneksel imalat yöntemleri, genellikle talaşlı imalat veya şekillendirme prensiplerine dayandırılırken, Endüstri 3.0 dönemi, bilgisayar destekli tasarım (Computer Aided Design - CAD) ve bilgisayar destekli üretimin (Computer Aided Manufacturing - CAM) yaygınlaştırılmasına tanık olmuştur (Kılıç 2023).

Geleneksel üretim kısıtlamalarını ortadan kaldıran bu teknoloji, karmaşık geometrilerin yüksek hassasiyetle ve minimum firesiyle üretilmesine olanak tanır. Özellikle kişiselleştirilmiş ürün talebinin ivme kazandığı Endüstri 5.0 paradigmasında eklemeli imalat, sürdürülebilirlik hedeflerine doğrudan katkı sağlamaktadır. Böylece dijital altyapıyla entegre çalışan bu yöntem, modern imalatın ihtiyaç duyduğu esnek ve verimli üretim modelinin temel yapı taşı olmuştur. Hannover 2011 Fuarında ortaya atılan Endüstri 4.0 kavramı ile dijitalleşme ve entegre akıllı teknolojilerin internet aracılığıyla doğrudan bağlantılı ve etkileşimli bir imalat sisteminin başlangıcı olarak kabul edilmiştir. Endüstri 4.0, son yıllarda teknolojide, endüstride ve toplumda yaşanan çok hızlı değişim, Endüstri 5.0'a geçiş sürecinin temelini oluşturmaktadır. Endüstri 5.0'a geçiş süreci, insan ve makinenin yetenekleri yapay zekâ destekli sistemlerle birleşerek, akıllı ve sürdürülebilir malzemeler sayesinde enerji verimliliği yüksek, kişiselleştirilmiş ve insan merkezli bir imalat ekosistemini ortaya çıkarmaktadır. 21. yüzyılın ilk çeyreğine damgasını vuran imalat yöntemi ise Eklemeli İmalat (Eİ) olmuştur (Güdek 2023, Groumpos 2021).



Şekil 1.1 Sanayi devrimlerinin gelişim süreçleri (Kılıç 2023).

1.2 Eklemeli İmalatın İmalat Sektöründeki Genişleyen Etkisi ve Önemi

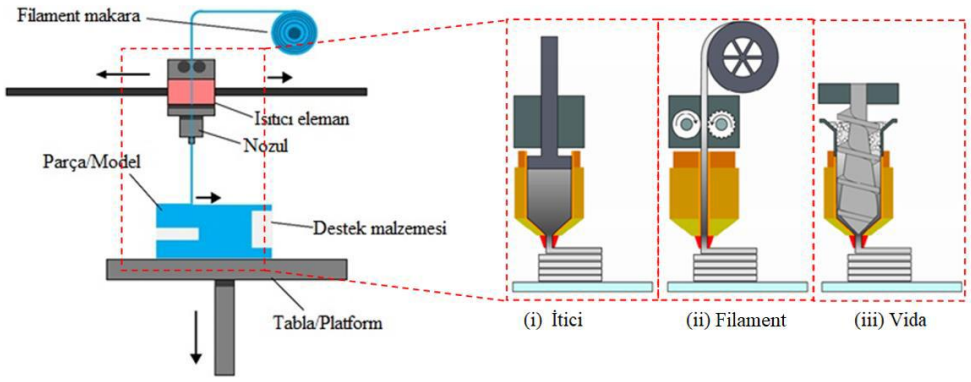
Eklemeli imalatın (Eİ) sağladığı esnek tasarım imkanının yanı sıra geleneksel imalat yöntemlerinin aksine stok parçanın işlenmesine gereksinim duymadan nokta atışı bir şekilde iş parçasını imal edebilmesi, malzeme fire oranının düşük olması, karmaşık geometrilerin tek seferde üretebilmesi ve kişiselleştirilmiş parça üretiminde sağladığı avantajlar ile imalat sektöründeki payını giderek arttırmaktadır.

Günümüzde kritik bir öneme sahip olan eklemeli imalat; biyomedikal alanında her hasta için kişiselleştirilmiş ve tam uyumlu tedavi olanağının sunulması, savunma sanayisi için daha hızlı ve esnek üretime bağlı verimlilik artışının sağlanması, otomotiv sektöründe hızlı prototipleme olanağı ile yedek parça geliştirme süresinin ve maliyetlerinin düşürülmesi, havacılık ve uzay sanayisi için iş parçasında topoloji optimizasyonu ile parça sayısında ve ağırlığında düşüş sağlanması gibi, insanlığın hayatını doğrudan ya da dolaylı olarak etkileyen birçok sektörde hayatımızı değiştiren ve kolaylaştıran bir imalat yöntemi olarak aktif bir rol üstlenmektedir (Raschke 2022, Tezel 2019).

1.3 Eriyik Biriktirme Yöntemi (FFF) ve Çalışma Prensibi

Eklemeli imalatın en yaygın türü olan Eriyik Biriktirme Yöntemi (Fused Filament Fabrication - FFF), çoğunlukla termoplastik bir filamentin eritilerek katmanlar halinde biriktirilmesi prensibine dayandırılır. FFF yöntemi için, imalatı gerçekleştirilecek olan iş

parçasının CAD programları yardımıyla 3B dijital modeli oluşturulur ve STL dosya formatında kaydedilir. Oluşturulan model, dilimleme programı ile imal edilecek katman verilerine dönüştürülür ve yazıcının hareket yolları G-koduna dönüştürülür. Daha sonra filamentin katman katman eklenmesiyle üç boyutlu iş parçası imal edilmiş olur. Bu yöntemle, polimer esaslı parçaların yanı sıra metal ve kompozit malzemelerin de imalatı yapılabilmektedir.



Şekil 1.2 FFF şematik gösterimi ve ekstrüzyon yöntemleri (Karagöz vd. 2021).

1.4 Modern Üretim Süreçlerinde Geometrik Kenetlenmeli Sökülebilir Bağlantıların Önemi

Eklemeli imalat, geleneksel yekpare üretim yöntemlerine önemli bir alternatif olarak öne çıkarılan modern bir teknolojidir. Bu alandaki gelişmeler, üretim ve montaj yöntemlerinde köklü değişimlere yol açmaktadır. Tasarım stratejileri açısından değerlendirildiğinde; tasarım esnekliği, çoklu malzeme kullanımı, montaj ve bakım kolaylığı ile düşük üretim maliyeti sayesinde, sökülebilir bağlantı yöntemleriyle parça üretimi birçok alanda tercih edilmektedir.

İmal edilen parçaların mekanik dayanımı ve mukavemet değerleri, iş parçasının mekanik güvenilirliğini göstermektedir. Mekanik güvenilirlik; belirli yükler, gerilmeler ve kuvvetler altında yapısal değişime karşı gösterilen direnç veya işlevini koruyarak çalışabilme yeteneği olarak tanımlanır. İmal edilen parçanın yekpare, sökülebilir veya sökülemez bağlantı tiplerinde üretilmesi mümkün kılınmış olup bağlantı türlerine göre parçanın mekanik dayanım değeri değişebilmektedir.

Sökülebilir ve sökülemez bağlantı türleri arasında, parçaların montajı aşamasında birçok sökülebilir yöntem kullanılmaktadır. Sökülebilir montaj yöntemlerinde vida ve cıvata bağlantıları, somunlu bağlantılar, pim bağlantıları, klipsli bağlantıların yanı sıra geometrik kenetlenmeli sökülebilir bağlantılar bulunmaktadır (Kadiroğlu vd. 2025).Vida, somun gibi ek bağlantı elemanlarına ihtiyaç duyulmayan geometrik kenetlenmeli sökülebilir bağlantıların en önemli avantajı ise yüksek mekanik kenetlenme gücüne ve yüksek tolerans değerlerinde hassas hizalama imkanına sahip olmasıdır. Sökülebilir bağlantı tipleri arasında T-bağlantı, Kırlangıç kuyruğu bağlantı ve Dairesel bağlantı önemli bir yer tutmaktadır. T-bağlantı, kırlangıç kuyruğu ve dairesel bağlantı türlerinin mühendislik ve endüstri alanlarındaki uygulama örnekleri Çizelge 1.1'de detaylandırılmıştır.

Çizelge 1.1 T-bağlantı, kırlangıç kuyruğu ve dairesel bağlantı türlerinin kullanım alanları

Bağlantı Yöntemi	Uygulama Alanları	Referanslar
T-bağlantı	Havacılık ve uzay sanayi, deniz mühendisliği ve gemi inşası	Davaasambuu vd. 2025, Hisada vd. 2020, Li vd. 2020, S. Yadav vd. 2024.
Kırlangıç kuyruğu bağlantı	Mobilya ve endüstriyel ahşap mühendisliği, yapısal ve modüler sistemler	Demirel ve Manav 2025, Ilgin ve Karjalainen 2024, Sebera ve Šimek 2014, Wu vd. 2024.
Dairesel bağlantı	Robotik ve otomotiv mühendisliği, metamalzeme tasarımı, biyomedikal mühendisliği	Nursultan vd. 2023, Urai vd. 2016

Bu bağlamda, söz konusu bağlantı mekanizmalarının yapısal performanslarını optimize etmeyi hedefleyen bu tez çalışmasında; bahsedilen T-bağlantı, Kırlangıç kuyruğu bağlantı ve Dairesel bağlantı geometrik kenetlenme mekanizmalarının arayüzlerindeki yük taşıma kapasitesini belirleyen geometrik faktörler bütüncül bir yaklaşımla ele alınmış ve bu farklı bağlantı geometrilerinin mekanik performansa etkisi sayısal ortamda parametrik olarak incelenmiştir. Bu kapsamda, çoklu malzeme arayüzlerinin davranışları Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) kullanılarak modellenmiş ve bağlantı mekanizmalarının yapısal bütünlüğünü artırmaya yönelik bir optimizasyon metodolojisi geliştirilmiştir. Gerçekleştirilen optimizasyon çalışmaları sonucunda maksimum von-Mises eşdeğer gerilme değerlerinde belirgin iyileşmeler kaydedilmiştir. Optimizasyon öncesi ve sonrası değerler karşılaştırıldığında; bu gerilme T-bağlantı modelinde 37.157 MPa değerinden 34.206 MPa'ya düşerek %7.94 oranında, Kırlangıç kuyruğu bağlantı modelinde 41.261

MPa değerinden 35.864 MPa'ya düşerek %13.08 oranında ve Dairesel bağlantı modelinde ise 36.450 değerinden 33.548 MPa'ya düşerek %7.96 oranında bir azalma göstermiştir. Elde edilen bu sayısal bulgular, bağlantı geometrilerinin parametrik optimizasyonunun, eklemeli imalat tabanlı çoklu malzeme uygulamalarında mekanik performansı ve yapısal dayanımı artırmada kritik bir rol oynadığını ortaya koymaktadır.

Bu tez çalışmasında von-Mises eşdeğer gerilmesinin optimizasyon aşamalarında ön planda tutulmasının temel nedeni, sünek malzemelerin çok eksenli gerilme durumları altındaki akma davranışını tek bir skaler değerle temsil eden en yaygın ve güvenilir hasar kriteri olmasıdır. Eklemeli imalatla üretilen çok parçalı yapılarda arayüzler, genellikle karmaşık gerilme dağılımlarına maruz kalmakta; basitçe normal veya kayma gerilmesi gibi bileşenler üzerinden yapılan değerlendirmeler, toplam deformasyon enerjisini ve malzemenin akma sınırına yaklaşımını tam olarak yansıtamamaktadır. Von-Mises kriteri, hem basma hem de çekme yükleri altında simetrik bir davranış sergileyen polimer ve metal malzemeler için literatürde kabul görmüş bir standarttır. Ayrıca, bu çalışmanın temel amacı geometrik optimizasyon yoluyla gerilme yığılmalarını azaltmak olduğundan, von-Mises eşdeğer gerilmesi optimizasyon algoritmalarının hedef fonksiyonu olarak doğrudan kullanılabilen, sonlu elemanlar analizlerinden kolayca elde edilen ve farklı geometriler arasında anlamlı karşılaştırmalara olanak tanıyan bir büyüklüktür. Bu nedenle, tez boyunca maksimum von-Mises gerilme değerlerinin minimize edilmesi, yapısal bütünlüğün ve arayüz dayanımının artırılmasında birincil performans metriği olarak benimsenmiştir.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

Bu bölümde, eklemeli imalat ile üretilen çok parçalı yapılarda geometrik kenetlenme mekanizmaları, arayüz davranışları ve bağlantı optimizasyonu üzerine ulusal ve uluslararası alanda gerçekleştirilen çalışmalar incelenmiştir. Literatür araştırmaları sonucunda, eklemeli imalatın artan kullanımına rağmen, çok parçalı yapıların arayüz optimizasyonuna yönelik bütüncül çalışmaların sınırlı olduğu görülmüş; özellikle farklı bağlantı geometrilerinin mekanik performansa etkisinin, sayısal ortamda parametrik olarak değerlendirilmesine yönelik araştırmaların oldukça kısıtlı olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, yalnızca eklemeli imalatla üretilen parçalar üzerine değil, aynı zamanda çoklu malzeme arayüzlerinin mekanik davranışını inceleyen sayısal modelleme, çekme testi simülasyonları ve bağlantı geometrisi optimizasyonu gibi benzer metodolojik yaklaşımlara sahip çalışmalara da bu bölümde yer verilmiştir. Literatür incelemeleri kapsamında, arayüzlerin yük taşıma kapasitesini belirleyen geometrik faktörlerin nasıl ele alındığı, farklı SEY karşılaştırılması ve parametrik optimizasyon stratejilerindeki farklılıklar ortaya konulmaya çalışılmıştır.

Eklemeli üretim, çok malzemeli ve çok parçalı yapıların mekanik performansının incelenmesinde etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Literatürde, arayüz geometrisi ve malzeme dağılımının yapısal dayanım üzerinde belirleyici olduğu; baskı yönü ve katman kalınlığının çekme dayanımı ve sertlik üzerinde kritik etkiye sahip olduğu rapor edilmektedir. Bu bulgular, çoklu parçalı eklemeli yapılar için arayüz tasarımının parametrik olarak optimize edilmesinin önemini vurgulamaktadır (F. Liu vd. 2020).

Eklemeli üretim, çok malzemeli ve çok parçalı yapıların mekanik performansının incelenmesinde etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Literatürde, arayüz geometrisi ve malzeme dağılımının yapısal dayanım üzerinde belirleyici olduğu; baskı yönü ve katman kalınlığının çekme dayanımı ve sertlik üzerinde kritik etkiye sahip olduğu rapor edilmektedir. Bu bulgular, çoklu parçalı eklemeli yapılar için arayüz tasarımının parametrik olarak optimize edilmesinin önemini vurgulamaktadır (Fenollosa vd. 2019).

Eklemeli üretimle üretilen çok parçalı yapılar ve arayüzler üzerindeki mekanik

performans, üretim parametrelerinden güçlü biçimde etkilenmektedir. Analizler, çekme dayanımının özellikle arayüz geometrisi ve katman yerleşimi ile şekillendiğini göstermekte ve parametrik optimizasyon yaklaşımlarının bu performansı artırmada etkili olabileceğini ortaya koymaktadır. Bu bulgular, çok parçalı yapıların arayüz tasarımının mekanik dayanım üzerinde kritik rol oynadığını vurgulamaktadır (Yadav vd. 2020).

MMAM, karmaşık geometriler ve çok parçalı yapılar ile yüksek mekanik performans sağlama potansiyeli sunmaktadır. Literatürde, arayüz geometrisi ve malzeme dağılımının yapısal dayanım üzerinde belirleyici olduğu; katman yerleşimi, dolgu yoğunluğu ve baskı parametrelerinin mekanik özellikler üzerindeki etkisi vurgulanmıştır. Bununla birlikte, MMAM bileşenlerinin tasarımına, parametrik optimizasyona ve arayüz özelliklerinin sistematik analizine odaklanan çalışmalar sınırlıdır. Ayrıca mevcut çalışmaların çoğu yalnızca temel çekme ve basınç özelliklerini incelemekte olup, farklı arayüz konfigürasyonları ve çok parçalı yapıların performansını karşılaştırmalı olarak değerlendiren sistematik araştırmalar yeterince yapılmamıştır. Bu bulgular, çok parçalı yapılar ve arayüz tasarımının mekanik performans üzerindeki kritik rolünü ortaya koymakta ve parametrik analizlerin bu alandaki önemini göstermektedir (Nazir vd. 2023).

MMAM'deki ilerlemeler, farklı mekanik özelliklere sahip malzemelerin aynı yapı içinde birleştirilmesini mümkün kılarken, bu yapılarda arayüz davranışının genel mekanik performans üzerinde belirleyici olduğu gösterilmiştir. Literatürde, malzeme biriktirme temelli çok malzemeli yapılarda arayüz dayanımının hem malzeme kombinasyonuna hem de baskı yönelimine güçlü biçimde bağlı olduğu rapor edilmektedir. Özellikle sert–esnek malzeme geçişlerinde arayüz dayanımının çoğu durumda malzemenin kendisine yakın seviyelerde korunduğu görülürken, sert–sert birleşimlerde belirli yönelimlerde mukavemetin %50'ye kadar düşebildiği belirtilmektedir. Buna karşılık, uygun malzeme eşleşmesi ve optimum baskı yönü seçildiğinde arayüz dayanımında %20'ye kadar artış sağlanabildiği gösterilmiştir. Mikro ölçekte elde edilen bu bulguların işlem bağımsız nitelikte olması, arayüz davranışının daha doğru modellenmesine, yapısal simülasyonların geliştirilmesine ve yüksek performans gerektiren uygulamalar için daha güvenilir çok malzemeli tasarımların oluşturulmasına önemli katkı sunmaktadır (Lumpe vd. 2019).

MMAM, malzeme çeşitliliği ve geometrik serbestliğin eş zamanlı kontrolü sayesinde çok işlevli yapıların geliştirilmesine önemli bir altyapı sunmaktadır. Bununla birlikte, düşük üretim hacmi, sınırlı malzeme seçimi, arayüz bağ kalitesinin zayıflığı ve süreç kontrolündeki yetersizlikler gibi teknik kısıtlar, çok malzemeli yapıların güvenilirliğini ve performansını doğrudan etkilemeye devam etmektedir. Malzeme geçiş bölgelerindeki bağlanma mekanizmalarının anlaşılması, arayüz davranışının iyileştirilmesi ve sürecin yazılım–algoritma boyutunda geliştirilmesi, yüksek performanslı çok malzemeli bileşenlerin üretimi için kritik görülmektedir. Bu bağlamda MMAM, artan tasarım serbestliğiyle önemli olanaklar sağlasa da, bu teknolojinin yapısal bütünlük gerektiren uygulamalarda daha etkin biçimde kullanılabilmesi için arayüz kalitesi ve süreç stabilitesine yönelik kapsamlı araştırmalara ihtiyaç bulunmaktadır (Han ve Lee 2020).

Literatürde, farklı mekanik davranışlara sahip malzemelerin tek bir yapıda güvenilir biçimde birleştirilmesine yönelik yaklaşımlar, özellikle yumuşak ve sert bileşenlerin birlikte kullanıldığı uygulamalarda önem kazanmıştır. Bu kapsamda, silikon gibi esnek malzemeler ile sert termoplastikler arasında güçlü bir arayüz oluşturmanın zorlukları çeşitli çalışmalarla ele alınmıştır. Mekanik kilitleme temelli hibrit üretim stratejilerinin, malzemeler arası bağlanma dayanımını artırarak çok malzemeli yapılarda bütünleşik ve dayanıklı bir geometri elde etmeye imkan sağladığı gösterilmiştir. Tasarım parametrelerinin arayüz performansı üzerindeki etkisinin modellenmesi ve deneysel olarak doğrulanması, çok malzemeli bileşenlerde arayüz mühendisliğinin kritik önemini vurgulamakta; ayrıca bu yapıların farklı yük durumlarına göre optimize edilebilmesinin fonksiyonel üretim potansiyelini artırdığı belirtilmektedir (Rossing vd. 2020).

MMAM ile bir bileşen içerisinde sertlik, dayanım ya da çevresel direnç gibi özelliklerin hedef bölgelerde tanımlanabilmesi mümkün hale gelmekte; bu da geleneksel tek malzemeli baskıyla elde edilemeyen karmaşık ve çok işlevli yapıların üretimini sağlamaktadır. Polimer, metal ve seramik kombinasyonlarını içeren farklı MMAM uygulamalarında, malzeme entegrasyonunun sağladığı tasarım serbestliği vurgulanırken, arayüz kalitesi, malzeme uyumu ve süreç kontrolü gibi zorlukların teknolojinin geliştirilmesinde temel belirleyiciler olduğu gösterilmektedir. Çok malzemeli üretimin giderek genişleyen uygulama alanı, yapısal performansı artırılmış ve fonksiyonel

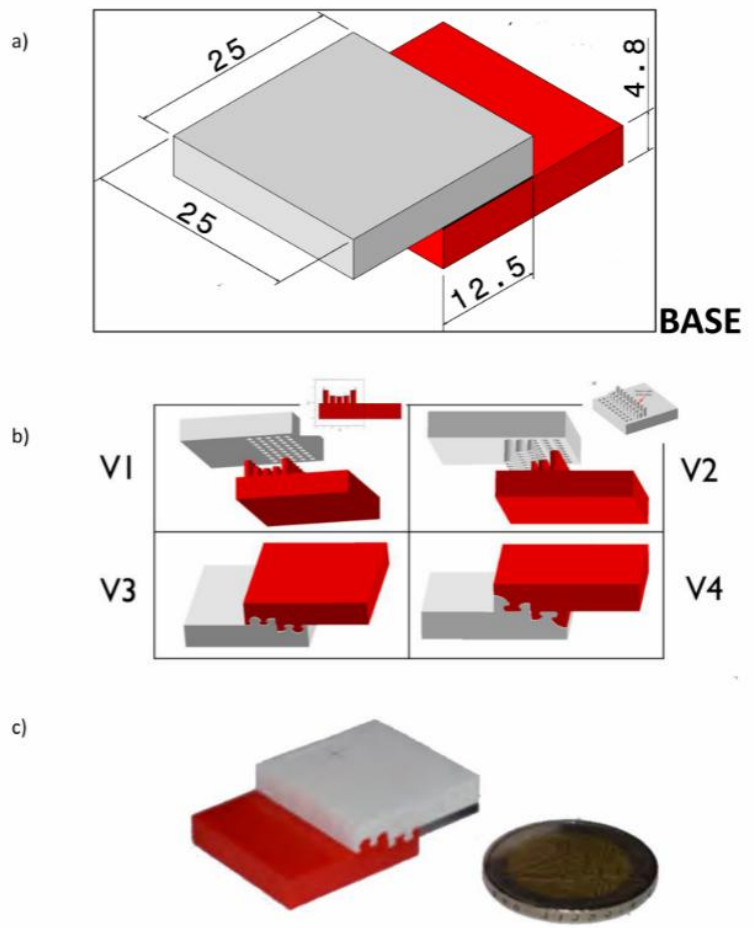
bileşenlerin tek bir üretim sürecinde oluşturulmasına olanak tanıyarak, bu teknolojinin araştırma düzeyinden endüstriyel kullanıma doğru hızla ilerlediğine işaret etmektedir (Bandyopadhyay ve Heer 2018).

MMAM için arayüz dayanımı, yapı bütünlüğünü doğrudan belirleyen kritik bir tasarım parametresidir. Literatürde, farklı malzemelerin bir araya geldiği bölgelerde dayanım kayıplarının çoğunlukla sınırlı difüzyon ve yetersiz temas alanından kaynaklandığı, bu nedenle arayüzün çoğu zaman yapının en zayıf bölgesi olarak davrandığı belirtilmektedir. Bu duruma yönelik olarak, malzemelerin üst üste bindirilmesi ve geometrik olarak iç içe geçirilmesine dayanan yeni yaklaşımların arayüz performansını anlamlı düzeyde artırdığı gösterilmiştir. Deneysel çalışmalar, iç içe geçen dolgu ve benzer mekanik kilitleme stratejilerinin geleneksel birleştirme yöntemlerine kıyasla daha yüksek dayanım sağladığını; hatta bazı numunelerde kırılmanın arayüz dışında gerçekleşmesiyle bağlantının malzemelerin kendisi kadar güçlü olabildiğini ortaya koymuştur. Bu artışın, temas yüzeyinin genişlemesine bağlı olarak arayüzde oluşan sürtünme etkisinin güçlenmesiyle ilişkili olduğu rapor edilmektedir. Ayrıca, uygun bindirme boyutu ve geçmeli dolgu geometrilerinin arayüz dayanımını optimize edebildiği; bu sayede farklı malzeme çiftleri arasında bile kararlı bir bağ oluşabildiği belirtilmektedir. Bulgular, çok malzemeli yapılarda arayüzün zayıf bölge olmaktan çıkarılarak genel mekanik performansın artırılabileceğini ve geometrik olarak mühendislik edilmiş geçiş bölgelerinin MMAM için etkili bir tasarım stratejisi sunduğunu göstermektedir (Mustafa ve Kwok 2022).

MMAM ile üretilen parçalarda arayüz davranışı incelenmiş ve PETG–PLA malzeme çiftinde yatay katman içi bağlanma dayanımının 6.404 MPa, dikey katmanlar arası bağlanmanın ise 0.400 MPa olduğu; yatay dayanımda standart sapmanın 1.351 MPa, dikey dayanımda ise 0.338 MPA ile yüksek varyasyon gösterdiği bulunmuştur. Tek malzemeli numunelerde çekme dayanımı PETG için 27.211 MPa, PLA için 28.677 MPa olarak elde edilmiştir. Karmaşık ters trapez sınır geometrisinde geliştirilen sayısal model, yatay baskılarda 9 testten 4'ünde, dikey baskılarda 9 testten 5'inde hata aralığının dışında kalmış olup, bu hatalar baskı sırasında değişen boncuk genişliği ve düzlemsel olmayan kırılma modlarından kaynaklanmaktadır. Ters trapez geometrisine sahip PETG–PLA

birleşimlerinde düzlemsel olmayan kırılma, yatay baskılarda 45 numunenin 12'sinde, dikey baskılarda ise 45 numunenin 7'sinde gözlenmiştir. Bu sonuçlar, çok malzemeli sınırların mekanik performansını tahmin eden sanal prototipleme yaklaşımının değerli öngörüler sunduğunu, ancak baskı sürecindeki yüksek bağlanma varyansının model doğruluğunu sınırlayan temel faktörlerden biri olduğunu göstermektedir (Kakaraparthi ve Chen 2023).

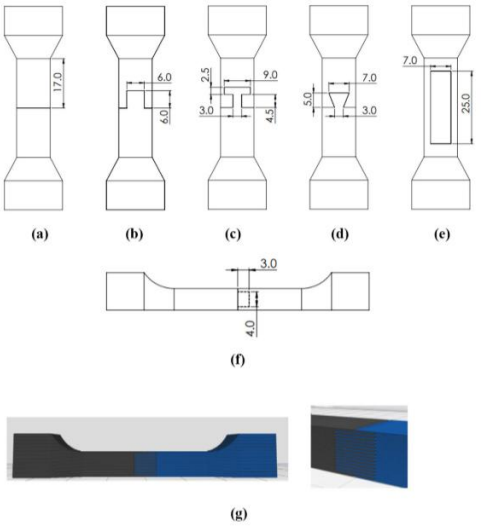
MMAM'de arayüz dayanımını artırmak amacıyla karmaşık geometrili iç içe geçen bağlantılar tasarlanmış ve bu yapıların kayma gerilmesi dağılımını iyileştirdiği gösterilmiştir. Eklemeli imalat teknolojilerinin sunduğu tasarım özgürlüğü, geleneksel yöntemlerle üretilmesi zor olan bu makro-mekanik kilit mekanizmalarının hayata geçirilmesine olanak tanımıştır. Farklı yapıların birbirine kenetlenen tasarımlarının SEY analizleri, özellikle Şekil 2.1'deki V1, V2 ve V4 yapılandırmalarında bağlanan yüzey boyunca maksimum kayma gerilmesi değerlerinin belirgin biçimde azaldığını ve gerilmenin daha homojen dağıldığını ortaya koymuştur. Deneysel doğrulamada, V1–V4 prototiplerinin yapıştırıcı kullanılmadan test edilmesi durumunda bile arayüzün, bağlanan yüzeyleri oluşturan malzemelerden daha yüksek dayanım gösterdiği görülmüş; bu durum, arayüzün zayıf bölge olmaktan çıktığını göstermiştir. Yapıştırıcı ile güçlendirilen V4 tasarımında ise kırılma gözlenmemiş ve yükler 5000–7000 N aralığına kadar taşınabilmiştir. Buna karşın, düz geometride kırılmalar 2200–4100 N aralığında ve tipik gevrek davranışla gerçekleşmiştir. Bu çarpıcı fark, kenetlenen geometrilerin sadece statik yük taşıma kapasitesini artırmakla kalmayıp, aynı zamanda yapının hasar toleransını ve mekanik enerji yutma kabiliyetini de iyileştirdiğine işaret etmektedir. Sayısal analizler, kenetlenme geometrisinin yalnızca maksimum gerilmelerini düşürmekle kalmadığını, aynı zamanda malzeme değişiminden kaynaklanan gerilme artışlarını da büyük ölçüde bastırdığını göstermiş; böylece arayüzün farklı malzeme çiftlerinde dahi stabil kaldığı görülmüştür. Dolayısıyla, geliştirilen bu yenilikçi birleştirme stratejileri, yapısal bütünlük ile hafifletmenin eşzamanlı talep edildiği ileri mühendislik uygulamaları için güçlü bir alternatif sunmaktadır. Bu sonuçlar, geometrik kilitleme tabanlı arayüz tasarımlarının çok malzemeli yapılarda kayma gerilmesi kaynaklı problemleri azaltarak daha güvenilir bağlantılar oluşturduğunu doğrulamaktadır (Peralta Marino vd. 2022).



Şekil 2.1 Dört farklı arayüz kenetlenmesinin geometrik modeli. (Peralta Marino vd. 2022).

Literatürde, kimyasal olarak uyumsuz termoplastiklerin bir araya getirildiği çok malzemeli FFF yapılarında makro geometrik kilitleme tasarımlarının arayüzey dayanımını belirgin biçimde artırdığı gösterilmiştir. ASA ve TPU malzemeleri kullanılarak oluşturulan kırlangıç kuyruğu, omega ve T-şekli gibi farklı geometrik arayüzeyler üzerinde yapılan çekme ve darbe deneyleri, düz birleşimlere kıyasla kayda değer iyileşmeler rapor etmektedir. En yüksek çekme dayanımı T-şekilli arayüzeyde 10.22 MPa olarak elde edilmiş; en yüksek birim uzama %1.77 ile T-şekli ve T-şekli uyarlanmış tasarımlarda görülmüştür. Darbe dayanımında ise ok biçimli arayüzey 4.91 kJ/m² ile en yüksek değeri vermiştir. Geometrik kilitleme ve örtüşme miktarının çekme dayanımını doğrudan etkilediğini, kilitleme yönünün ise özellikle uzama ve darbe dayanımında belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, makro düzeyde tasarlanan arayüzey geometrilerinin, malzemeler arasındaki kimyasal uyumsuzluğu büyük ölçüde telafi ederek çok malzemeli bileşenlerde arayüzey mukavemetinin artırılmasında etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir (Ermolai vd. 2024).

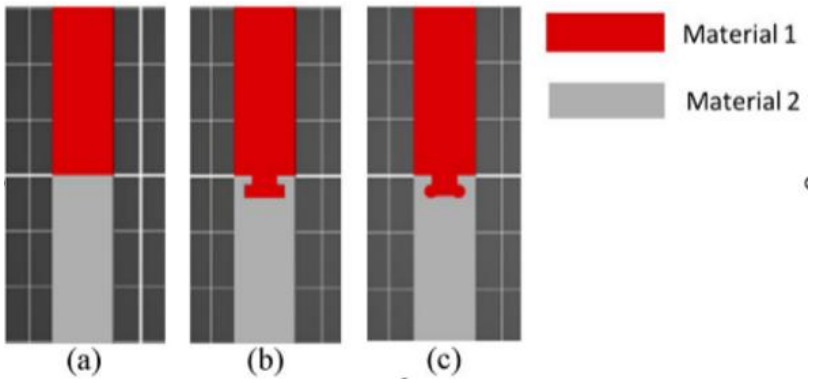
Çok malzemeli FFF üretimde zayıf arayüz bağlanmasının mekanik performansı sınırladığı bilinmekte olup, son çalışmalar makroskobik arayüz geometrilerinin bu sorunu önemli ölçüde azaltabileceğini göstermektedir. Tough PLA ile TPU'nun bir arada kullanıldığı deneylerde, yüz yüze, U şekli, T şekli, Kırlangıç kuyruğu, iç içe gömme arayüzü, mekanik kilitlenme ve bindirme gibi özel bağlantı geometrileri tasarlanmış ve bu yapıların çekme dayanımı üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır. Kullanılan arayüz geometrileri Şekil 2.2'de gösterilmiştir. Çalışmanın bulgularına göre, T şekilli arayüz geometrisi çok malzemeli numunelerde en yüksek çekme dayanımını sağlamış (10.22 MPa) ve sert–yumuşak malzeme çiftinde kayma gerilmelerini daha homojen dağıtarak arayüzdeki gerilme yığılmalarını azaltmıştır. Mekanik kilitlenme geometrisi, tek malzemeli Tough PLA ve TPU numunelerinde en sağlam bağlantıyı oluşturarak malzemenin kendi gövdesi kırılana kadar arayüzün bütünlüğünü korumuştur. Buna karşılık, iç içe gömme arayüzü, nihai çekme dayanımında yüksek değerler üretmiş olsa da bağlantı bütünlüğü açısından T-şekli ve bindirme kadar sağlam bulunmamıştır; kopma yüzeylerinde yalnızca ince bir TPU tabakasının PLA üzerinde kaldığı rapor edilmiştir. Genel olarak, mekanik kısıtlama içeren arayüz tasarımları, malzemeler arası uyumsuzlukların etkisini azaltarak çok malzemeli yapıların dayanımını anlamlı şekilde artırmış ve konfigürasyon seçiminin mekanik performansı doğrudan belirlediği gösterilmiştir (Dairabayeva vd. 2023).



Şekil 2.2 Geometrik kenetlenme arayüzlerinin tasarımının sayısal değerleri (Dairabayeva vd. 2023).

Çok malzemeli FFF numuneler üzerinde yapılan deneysel değerlendirmeler, düz arayüzlü

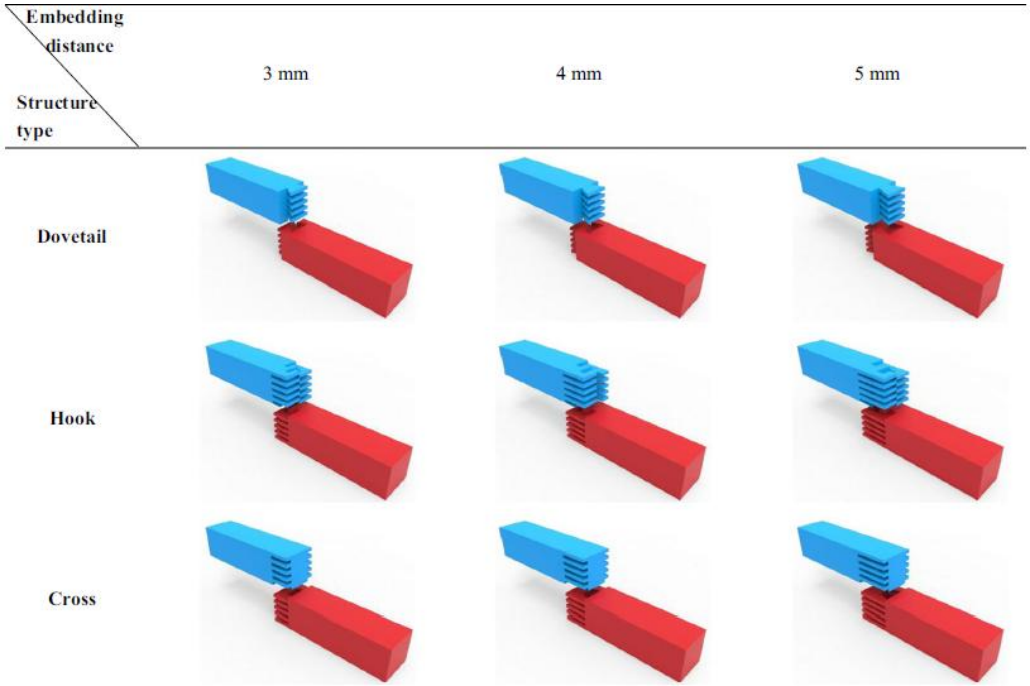
yapıların mekanik performansının tek malzemeli referans numunelere kıyasla ciddi biçimde düştüğünü göstermiş; bu yapıların dayanımı homojen malzemede referans değerinin yaklaşık %60'ına, PLA–PET çiftinde ise yalnızca %10'una kadar gerilemiştir. Geometrik kenetlenme sağlayan T-şekilli arayüz, çok malzemeli numunelerde çekme dayanımını düz arayüze göre %58 oranında artırmış; buna karşın daha yumuşak geçişli eğrisel arayüz tasarımı çekme dayanımında yalnızca %7'lik bir iyileşme sağlasa da toplam şekil değiştirme kabiliyetinde belirgin bir artış oluşturmuştur. Eğrisel tasarım, yük aktarımını geniş bir hacme yaydığı için düz arayüze kıyasla yaklaşık %183 daha yüksek uzama değerlerine ulaşmıştır. Mickey Mouse tipi olarak adlandırılan geniş başlıklı çift çıkıntılı arayüz geometrisinde ise malzemeler arasında kayma ve dönme bileşenlerinin daha stabil bir şekilde aktarılması sayesinde ayrılma davranışı, düz arayüzlerde görülen ani kopmanın aksine, önce arayüz boyunca başlayan kısmi ayrılma ardından çıkıntı bölgeleri çevresinde gelişen karma bir kırılma mekanizması ile gerçekleşmiştir. T-şekilli arayüzün dayanımı artırmada en etkili çözüm olduğu, buna karşın eğrisel ve Mickey Mouse tipindeki geniş hacimli kenetlenme geometrilerinin daha yüksek deformasyon kapasitesi sunsa da hedeflenen dayanım artışı için ek optimizasyona ihtiyaç duyduğu anlaşılmaktadır (Frascio vd. 2024).



Şekil 2.3 Araştırılan arayüzler (a) doğrudan birleşim arayüzü, (b) T şekli birleşim arayüzü, (c) Mickey Mouse birleşim arayüzü (Frascio vd. 2024).

Çok malzemeli FFF yapılar için geliştirilen mekanik kilitlenme geometrilerinin performansı, hem arayüz dayanımı hem de gömülme derinliği açısından sistematik olarak incelenmiş ve birbirinden belirgin farklar gösterdiği rapor edilmiştir. Özellikle kırlangıç kuyruğu, kanca ve çapraz kilitlenme yapılarına ait üç farklı gömülme derinliği (3 mm, 4 mm ve 5 mm) kullanılarak üretilen numunelerde, gömülme mesafesinin artışıyla birlikte

taşıma kapasitesinin anlamlı biçimde yükseldiği görülmüştür. Örneğin kırlangıç kuyruğu yapısında 3 mm gömülme derinliğinde elde edilen arayüz dayanımı referans alınarak değerlendirildiğinde, 5 mm gömülmeye geçildiğinde dayanımın yaklaşık %40–60 aralığında arttığı bildirilmiştir; benzer şekilde kanca yapısı 5 mm gömülmede 3 mm'ye kıyasla yaklaşık %35 daha yüksek kopma yüküne ulaşmış, çapraz geometri ise en yüksek gömülme seviyesinde önceki derinliğe göre yaklaşık %30 daha yüksek arayüz dayanımı sergilemiştir. Kopma incelemeleri, düşük gömülme mesafelerinde kırılmanın çoğunlukla arayüz boyunca ilerleyen ayrılma şeklinde gerçekleştiğini, 5 mm gömülmede ise yükün kilitlenme hacmine daha etkin biçimde aktarılması nedeniyle kırılmanın çoğunlukla malzeme içi kesitlerde oluştuğunu göstermiştir. Bu bulgular, mekanik kilitlenme geometrilerinin yalnızca şekillerine değil, aynı zamanda kilitlenme hacminin büyüklüğüne duyarlı bir şekilde çalıştığını ve gömülme mesafesinin artırılmasının arayüz dayanımını doğrudan güçlendirdiğini ortaya koymaktadır. Çalışmada incelenen tüm mekanik kilitlenme tipleri ve gömülme derinlikleri Şekil 2.4'te gösterilmektedir (B. Liu vd. 2024).



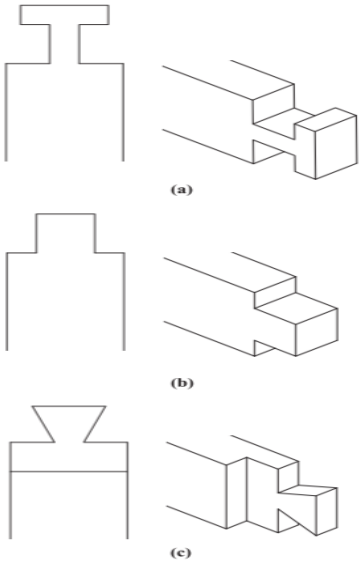
Şekil 2.4 Farklı gömme mesafelerine sahip üç tür mekanik kilitli yapılar (B. Liu vd. 2024).

FFF yöntemiyle üretilen çok malzemeli yapılarda arayüz davranışının yapısal bütünlüğü doğrudan belirlediği görülmekte olup, PLA–TPU çiftleri üzerinde yapılan mekanik testler bu iki polimer arasında doğal yapışmanın oldukça zayıf olduğunu ve kırılmanın

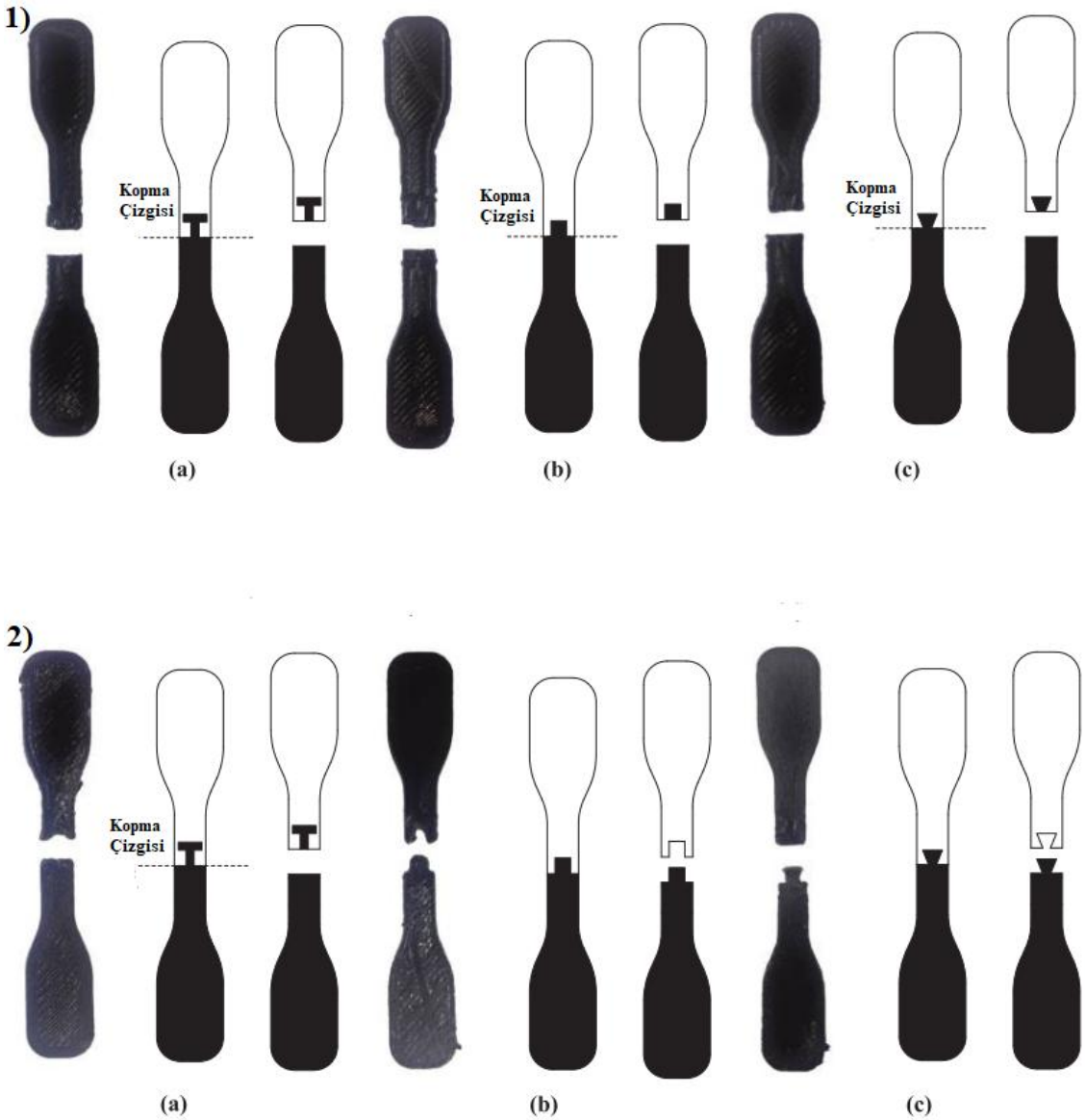
çoğunlukla arayüzden gerçekleştiğini göstermiştir. Ancak tarak biçimli mekanik kilitlenme tasarımları, bu zayıf bağı belirgin şekilde iyileştirerek çok malzemeli numunelerin taşıma kapasitesini anlamlı ölçüde artırmış; böylece arayüz dayanımının yalnızca yüzey temasına bağlı olmadığı, geometrik kilitlemenin yük aktarımını genişleterek bağ bütünlüğünü güçlendirdiği kanıtlanmıştır. Diğer taraftan kısa karbon fiber takviyeli poliamid (PA-CF) ile yapılan deneylerde, takviyeli numunelerin çekme modülü ve dayanımının saf PA'ya göre daha yüksek olduğu; özellikle 0° baskı yönünde üretilen PA-CF numunelerinin çekme modülünün 90° yönündeki numunelerin yaklaşık iki katına ulaştığı görülmüştür. Bununla birlikte fiber yerleşimine bağlı olarak süneklik önemli ölçüde azalmış, kırılma uzaması PA'ya kıyasla belirgin biçimde düşmüştür. Hücresel yapılarda ise dolgu deseninin mekanik davranış üzerinde kritik rol oynadığı; düzenli petek dolgunun enerji yutma kapasitesi bakımından en yüksek performansı sergilediği, düzensiz dolgunun ise birim hacim başına daha verimli enerji sönümleme sağladığı tespit edilmiştir. Ayrıca PA-CF yapılarına duvar eklenmesi basma dayanımını ve elastik modülü artırmakla birlikte plato bölgesinde yerel burkulmaya bağlı gerilme dalgalanmalarına neden olmuştur. Tüm bu bulgular, çok malzemeli FFF yapılarında hem polimer–polimer arayüzlerini güçlendiren mekanik kilitlenme geometrilerinin hem de fiber takviyeli hücresel yapıların, taşıyıcı uygulamalarda yüksek dayanım–düşük ağırlık kombinasyonuna ulaşmak için etkili tasarım stratejileri sunduğunu göstermektedir (Kepenekçi 2021).

Çok malzemeli FFF yapılarda, bazı polimer çiftleri yüksek malzeme uyumluluğu gösterse dahi arayüzeyin çoğu zaman zayıf bir bölge olarak davrandığı; baskı sırası, katmanlar arası soğuma süresi ve birikim yönünün bu bölgede bütünlüğü bozarak dayanımı düşürdüğü rapor edilmiştir. Düz temas yüzeyine sahip arayüzlerin hem aynı malzeme çiftlerinde (PLA–PLA) hem de düşük uyumlu PLA–TPU çiftlerinde yeterli mekanik performans sağlayamadığı; PLA–PLA numunelerinde dahi kopmanın çoğunlukla arayüz hattında gerçekleştiği görülmüştür. Bu çalışmalarda test edilen U şekilli, T şekilli ve kırlangıç kuyruğu geometrilerine ilişkin tasarımlar Şekil 2.5'te sunulmuş olup, mikroskobik bağlanmaya dayanan U-şekilli arayüzlerin çekme dayanımında sınırlı bir iyileştirme sağladığı, buna karşın makroskobik mekanik kenetlenme prensibiyle çalışan T-şekilli arayüzün her iki malzeme setinde de belirgin üstünlük gösterdiği tespit

edilmiştir. PLA–PLA numunelerinde düz arayüzlü yapıların kopma yükleri dikkate değer biçimde düşük kalırken, T-şekilli arayüzde kopmaların çoğunlukla arayüz dışında gerçekleştiği ve kopma biçimlerinin Şekil 2.6'da farklı arayüz geometrileri için PLA-PLA test numunelerinde gösterildiği üzere malzeme gövdesine kaydığı görülmüş; bu durum arayüzün malzeme kadar güçlü hâle geldiğini göstermiştir. Benzer şekilde PLA–TPU örneklerinde de Şekil 2.6'da farklı arayüz geometrileri için PLA-TPU test numunelerinde görüldüğü gibi düz arayüzlerde kopma tamamen arayüz boyunca ilerlerken, T şekilli geometride yük aktarımının daha geniş bir hacme yayılması sayesinde kopmanın kilit bölgesi çevresinde karma bir mekanizma ile meydana geldiği rapor edilmiştir. Nicel olarak değerlendirildiğinde, T-şekilli makroskobik kenetlenme tasarımının düşük uyumlu PLA–TPU çiftinde düz arayüze göre anlamlı bir dayanım artışı sağladığı; kırlangıç kuyruğu geometrisinin ise belirli koşullarda deformasyon kapasitesini artırmakla birlikte T şekilli tasarım kadar yüksek yük taşıma performansı sunamadığı belirtilmiştir. Tüm bu bulgular, çok malzemeli yapılarda mekanik yük taşınacaksa düz arayüzeylerin yapısal bütünlük için yetersiz kaldığını, buna karşın makroskobik kenetlenme geometrilerinin malzeme uyumundan bağımsız biçimde güvenilir bağlanma sağlayarak arayüzü zayıf bölge olmaktan çıkardığını açık biçimde ortaya koymaktadır (Ribeiro vd. 2019).



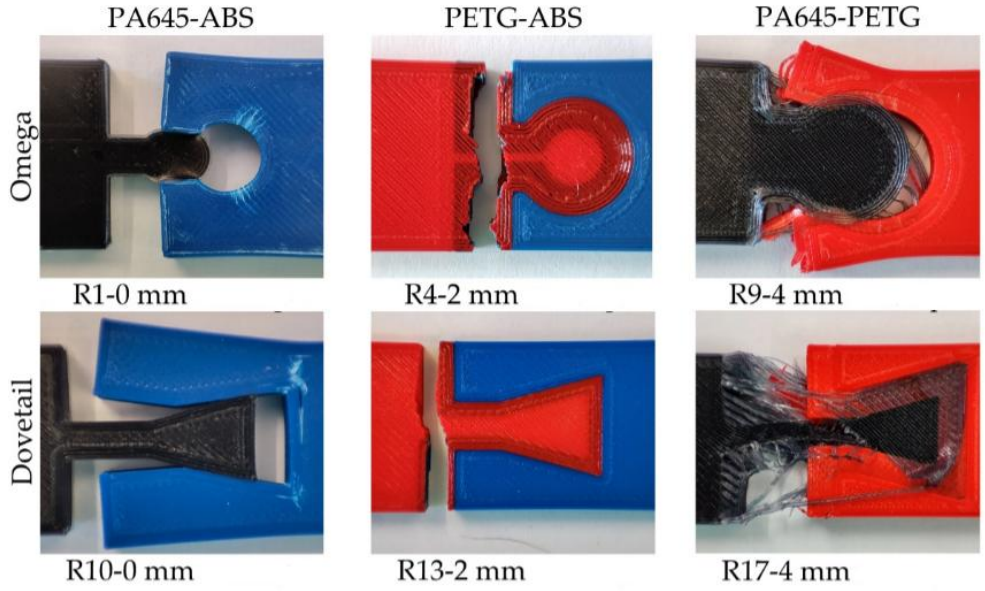
Şekil 2.5 Test edilmiş arayüz geometrileri (a) T bağlantı şekli, (b) U bağlantı şekli, (c) kırlangıç kuyruğu bağlantı şekli (Ribeiro vd. 2019).



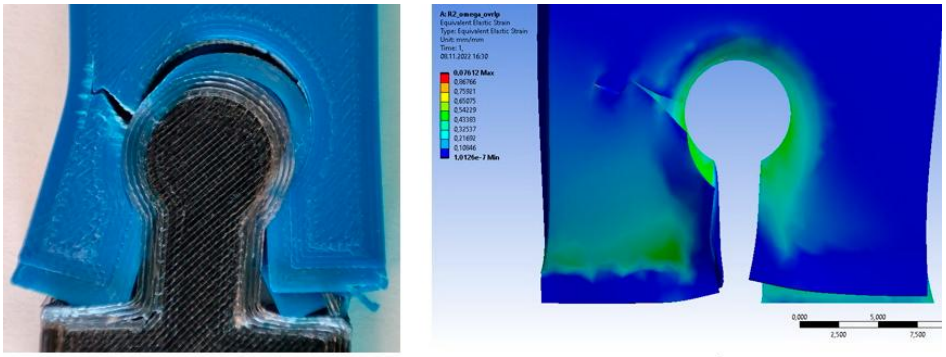
Şekil 2.6 1) Farklı arayüz geometrileri için PLA-PLA test numunelerinin kırılma bölgelerinin çizimi ve fotoğrafları, 2) farklı arayüz geometrileri için PLA-TPU test numunelerinin kırılma bölgelerinin çizimi ve fotoğrafları (Ribeiro vd. 2019).

Çok malzemeli yapıların arayüzeylerinde, malzemeler arasındaki uyum yüksek olsa bile baskı sırası, katman soğuma süreleri ve birikim yönünün etkisiyle zayıf bölgeler oluştuğu, düz temas yüzeyine sahip arayüzlerin hem PLA–PLA hem de PLA–TPU çiftlerinde yeterli dayanımı sağlayamadığı görülmektedir. Bu zayıf bağlanma davranışı, özellikle yük altında arayüz bölgesinin erken kopma noktasına dönüşmesiyle belirginleşmiştir. Çalışmalarda, kimyasal etkileşime dayalı mikroskobik U-şekilli arayüzlerin dayanım kazanımının sınırlı kaldığı; buna karşın, geometrik kenetlenme prensibiyle çalışan T-şekilli makroskobik arayüzlerin iki malzeme setinde de en yüksek performansı sunduğu

ve düz arayüzlere kıyasla belirgin dayanım artışı oluşturduğu rapor edilmiştir. Farklı malzeme çiftlerinin kopma davranışları, omega ve kırlangıç kuyruğu tipi kilitlenme geometrilerinin çeşitli bindirme mesafelerinde oluşturduğu yük aktarım mekanizmalarını açıkça ortaya koymaktadır ve bu davranışlara ilişkin deneysel görüntüler Şekil 2.7'de sunulmuştur. Omega biçimli bağlantıların yük altında nasıl şekil değiştirdiği ve gerilmenin arayüz boyunca nasıl yayıldığı sayısal analizlerle desteklenmiş olup, bu gerinim dağılımlarını gösteren kırılma bölgesi incelemeleri Şekil 2.8'de verilmektedir. Benzer biçimde, kırlangıç kuyruğu bağlantılarında yerel gerilme yoğunlaşmaları ve kopma yüzeylerinin karakteri de yapılan deneysel–sayısal karşılaştırmalarla ortaya konmuş, ilgili sonuçlar Şekil 2.9'de gösterilmiştir. Bu bulgular, makroskobik kenetlenme temelli arayüz geometrilerinin malzeme uyumundan bağımsız şekilde daha kararlı bir yük aktarımı sunduğunu; düz temas yüzeylerinin ise çok malzemeli yapılarda yapısal bütünlüğü sağlamada yetersiz kaldığını açık biçimde göstermektedir. Ayrıca, bu tip kenetlenme geometrilerinin üretim sırasında parça içinde gizlenebilmesi, estetik bir sınırlama oluşturmadan yüksek arayüz dayanımı elde edilmesine imkan tanımaktadır. Sonuç olarak, mekanik yük taşıması beklenen çok malzemeli bileşenlerde, düz temas arayüzleri yerine makroskobik kilitlenme sağlayan geometrilerin kullanılması gerekliliği literatürde tutarlı biçimde ortaya konmuştur (Mihalache vd. 2022).

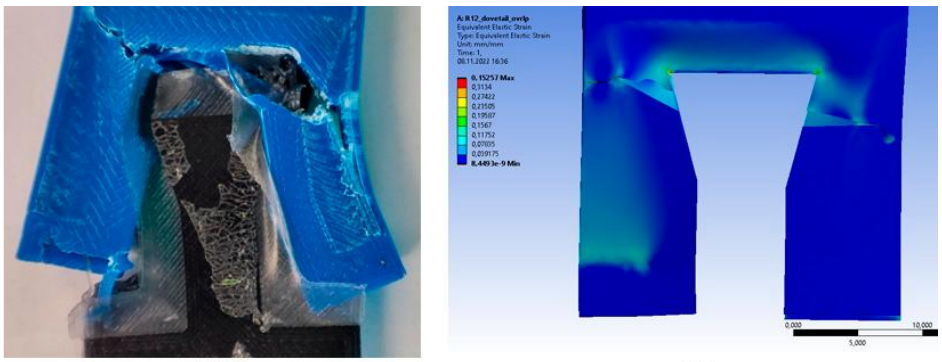


Şekil 2.7 Çekme testi sonucunda hasar gören test numunelerinin üst üste binme mesafeleri ve görüntüleri (Mihalache vd. 2022).



(a) (b)

Şekil 2.8 R2 omega şekilli test numunesinin sonuçlarının karşılaştırılması (Mihalache vd. 2022).



(a) (b)

Şekil 2.9 R12 kırlangıç kuyruğu şekilli numunenin sonuçlarının karşılaştırılması (Mihalache vd. 2022).

Literatürde yer alan mevcut araştırmaların da yanı sıra Mihalache vd. (2022) fiziksel çekme testleri ve üretim parametrelerinin incelenmesiyle sınırlı kalırken, bu tez çalışması ileri düzey sayısal modelleme ve parametrik optimizasyon yaklaşımıyla öne çıkmaktadır. Örneğin, eklemeli imalatla üretilen polimer arayüzleri inceleyen benzer çalışmalarda bağlantı performansları Taguchi yöntemi ile fiziksel numuneler üzerinden deneysel olarak maksimum kopma kuvveti ve yer değiştirme bağlamında incelenmiş ve yalnızca Omega ile Kırlangıç kuyruğu gibi sınırlı bağlantı tipleri üretim parametreleriyle duvar sayısı, katman örtüşmesi birlikte değerlendirilmiştir. Buna karşın mevcut tez çalışmasında; T-bağlantı ve Kırlangıç kuyruğu bağlantı modellerinin yanı sıra Dairesel bağlantı tasarımı ele alınmış ve optimizasyon doğrudan makro-geometrik kenetlenme parametrelerine açı, boyun genişliği, yarıçap, gömülme derinliği odaklanmıştır. Ayrıca, arayüzdeki mekanik zayıflığın temel nedeni olan gerilme yığılmalarına inilerek, Box-Behnken deney tasarımı, YYM ve MOGA kombinasyonuyla detaylı bir SEY optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu bütüncül sayısal yaklaşım sayesinde, malzemenin

sadece kopma anındaki tepkileri ölçülmekle kalınmamış; arayüzdeki von-Mises eşdeğer gerilme dağılımları optimize edilerek her bir bağlantı modelinde sırasıyla %7,94, %13,08 ve %7,96 oranlarında kanıtlanmış iyileşmeler sağlanarak literatürdeki önemli bir metodolojik boşluk doldurulmuştur.

3. MATERYAL ve METOT

Bu çalışmada Eİ alanında kullanılan çok parçalı yapıların birbirleri ile kenetlenmesi sürecinde arayüz geometrilerinin YYM optimizasyonu yardımıyla en uygun geometrileri elde edilmeye çalışılmıştır. Bu kapsamda çalışma sırasıyla metodoloji, kenetlenme arayüz geometrilerinin belirlenmesi, YYM optimizasyonu ve nümerik analiz başlıkları altında incelenmiştir. Bu tez çalışmasında, eklemeli imalat ile üretilen çok parçalı yapıların arayüzlerinde kullanılan kenetlenme geometrilerinin mekanik performansını incelemek amacıyla Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS) malzemesi tercih edilmiştir. ABS, FFF yöntemiyle üretime uygunluğu, yeterli rijitliği ve izotropik elastik davranışa yakın mekanik özellikleri sayesinde nümerik analizlerde güvenilir sonuçlar elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Orta seviyedeki elastik modülü ve sünek kırılma davranışı, arayüz bölgelerinde oluşan gerilme dağılımlarının ve şekil değiştirme mekanizmalarının sağlıklı biçimde incelenmesini mümkün kılmaktadır. Ayrıca düşük büzülme oranı ve boyutsal kararlılığı, farklı kenetlenme geometrilerinin karşılaştırılmasında geometrik tutarlılığın korunmasına katkı sağlamaktadır. Bu özellikleri nedeniyle ABS, kenetlenme arayüz geometrilerinin parametrik olarak modellenmesi, sonlu elemanlar yöntemi ile değerlendirilmesi ve YYM tabanlı optimizasyon sürecinde referans bir termoplastik malzeme olarak uygun bir seçim sunmaktadır. Analizde kullanılan ABS malzemesine ait genel özellikler, ANSYS yazılımı bünyesindeki GRANTA Materials Data for Simulation kütüphanesinden alınmış olup Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 ABS genel malzeme özellikleri

Özellik	**Birim**	**Değer**
Yoğunluk	kg/m^3	1050
Young's Modülü	MPa	2090
Poisson Oranı	-	0.4078
Hacim Modülü	MPa	3778
Kayma Modülü	MPa	742

3.1 Çalışmanın Metodolojisi

Bu tez çalışmasında, eklemeli imalat ile üretilen çok malzemeli yapıların arayüzlerinde

kullanılan kenetlenme geometrilerinin mekanik performans üzerindeki etkileri nümerik analiz yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Çalışmanın metodolojisi; parametrik tasarım, sınır şartlarının belirlenmesi, sonlu elemanlar analizi ve YYM tabanlı optimizasyon adımlarından oluşmaktadır. Öncelikle, kenetlenme arayüzlerinde etkili olduğu öngörülen geometrik parametreler belirlenmiş ve bu parametreler ANSYS Design Modeler ortamında parametrik olarak modellenmiştir. Ardından, oluşturulan modeller ANSYS Workbench platformunda Static Structural (Statik Yapısal) modülü kullanılarak çekme yükü altında analiz edilmiştir. Çalışmada tüm değerlendirmeler nümerik analiz sonuçlarına dayandırılmıştır. Son aşamada, elde edilen veriler ANSYS RSO (Response Surface Optimization – Tepki Yüzeyi Optimizasyonu) modülüne aktarılarak tepki yüzeyleri oluşturulmuş; bu yüzeyler üzerinde en iyi tasarım noktalarını belirlemek için MOGA yöntemi kullanılarak kenetlenme geometrilerinin optimizasyonu sağlanmıştır.

3.2 Kenetlenme Arayüz Geometrilerinin Belirlenmesi

Çok malzemeli yapılarda arayüz dayanımını artırmaya yönelik kullanılan kenetlenme geometrileri, yük aktarımı ve arayüz stabilitesi açısından kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada, literatürde yaygın olarak kullanılan ve farklı mekanik davranış karakteristikleri sergileyen üç farklı kenetlenme geometrisi T-bağlantı, Kırlangıç kuyruğu bağlantı ve Dairesel bağlantı seçilmiştir. Seçilen geometriler, farklı temas yüzeyleri, yük dağılım mekanizmaları ve gerilme yoğunlaşma eğilimleri göz önünde bulundurularak değerlendirilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında tasarlanan çok parçalı kenetlenme modellerinin çekme testleri ve sayısal analizleri için, arayüz kalınlıklarının ve geometrik özelliklerinin ilgili standartla tam uyumluluğu gözetilerek ASTM D638-14 Tip III numune geometrisi tercih edilmiştir. Standart yönergeleri, kalınlığı 7 milimetreden büyük ve 14 milimetreye eşit veya daha küçük olan rijit ile yarı rijit plastik malzemelerin mekanik karakterizasyonunda Tip III formunun kullanımını gerekli kılmaktadır. Test sonuçlarının uluslararası literatürle karşılaştırılabilirliğini ve bilimsel güvenilirliğini sağlamak amacıyla seçilen bu numune tipi; 19 milimetre daraltılmış bölge genişliği, 57 milimetre daraltılmış bölge uzunluğu, 29 milimetre toplam genişlik, 246 milimetre toplam minimum uzunluk ve 50 milimetre ölçüm uzunluğu gibi spesifik boyutlara sahiptir. Bu geometrik sınırlar içerisinde özellikle 76 milimetre olarak belirlenen geniş köşe radyüsü testin doğruluğu açısından kritik bir işleve sahiptir; zira bu geniş radyüs,

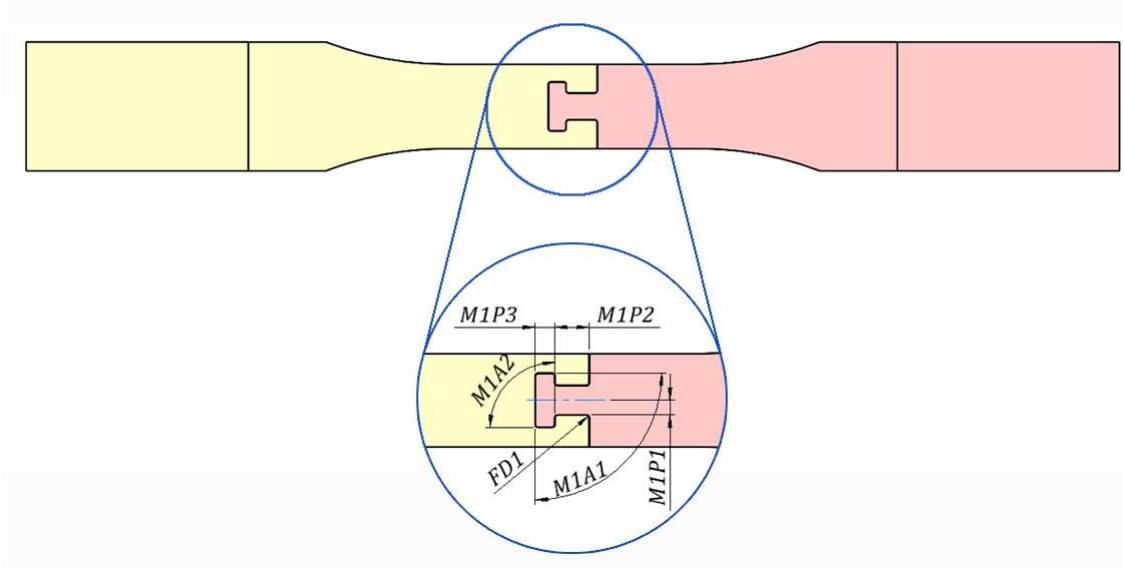
eksenel çekme yüklemesi esnasında gerilmenin tutucu çenelerde yığılmasını efektif bir şekilde önleyerek, beklenen yapısal hasarın ve nihai kopmanın doğrudan arayüzün bulunduğu daraltılmış merkez bölgede gerçekleşmesini güvence altına almaktadır. Sonuç olarak, kalın kesitli parçalar için zorunlu kılınan bu formun sunduğu homojen gerilme aktarımı sayesinde, bağlantı arayüzlerindeki maksimum yük taşıma kapasitesi ve von-Mises eşdeğer gerilme dağılımları en yüksek hassasiyetle modellenebilmiştir. (Test Method for Tensile Properties of Plastics, 2014). Her bir kenetlenme modeli, karşılaştırılabilir sonuçlar elde edebilmek amacıyla aynı sınır şartları ve yükleme koşulları altında analiz edilmiştir.

3.2.1 T-bağlantı Kenetlenme Modeli

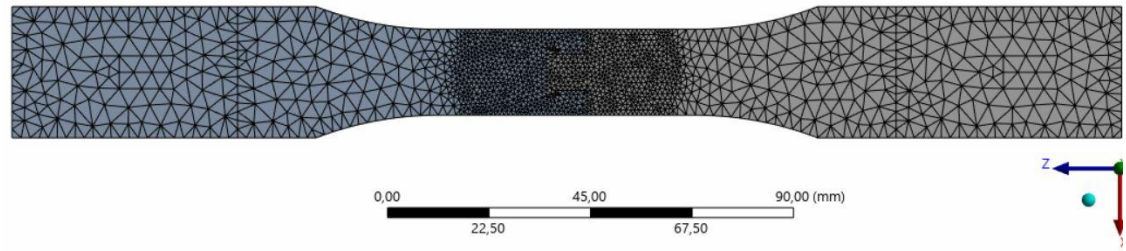
T-bağlantı kenetlenme modeli, doğrusal ve keskin geçişlere sahip geometrik yapısı nedeniyle arayüz bölgesinde gerilme yoğunlaşmalarının incelenmesi açısından referans bir model olarak ele alınmıştır. Parametrik olarak tanımlanan geometrik değişkenler aracılığıyla, T-bağlantı yapısının çekme yükü altındaki deformasyon ve gerilme dağılımları analiz edilmiştir. T-bağlantı kenetlenme modeli için M1P1, M1P2, M1P3 uzunluk parametreleri, M1A1, M1A2 açı parametreleri ve FD1 köşe yuvarlatma parametresi olmak üzere 6 parametreye ait seviyeler Çizelge 3.2'de verilmiştir. T-bağlantı kenetlenme arayüzünü içeren katı model, mesh yapısı ve sınır şartları Şekil 3.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.2 T-bağlantı kenetlenme modeli şekil bağlantısı parametre sınır şartları

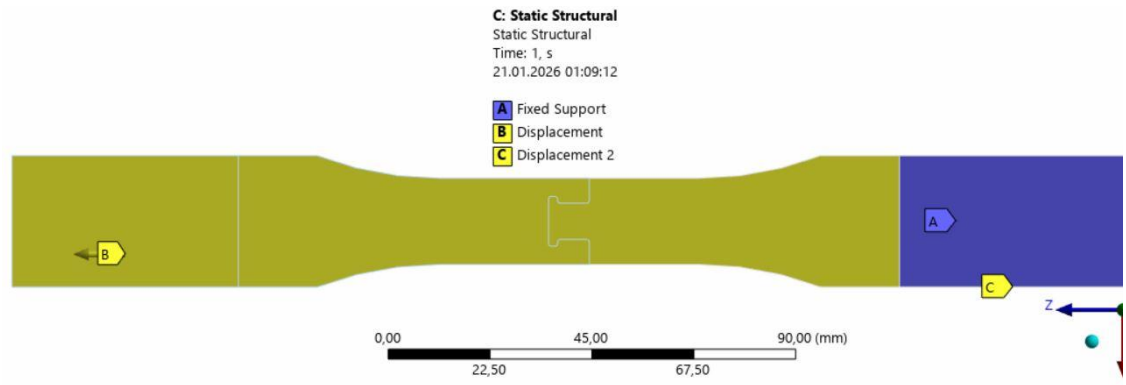
Parametre	**S1**	**S2**	**S3**
M1P1 (mm)	2	3	4
M1P2 (mm)	4	7	10
M1P3 (mm)	1.5	3	4.5
M1A1 (°)	90	112.5	135
M1A2 (°)	90	112.5	135
FD1 (mm)	0.1	0.3	0.5



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.1 (a) T-bağlantı kenetlenme modeli ve parametreleri (b) mesh modeli (c) sınır şartları

Şekil 3.1 (a) T-bağlantı kenetlenme modeli ve parametreleri, 6 parametrenin mekanik güvenilirlik, gerilme dağılımının homojenliği, deformasyonun kontrollü ve öngörülebilir takibi, elde edilen mekanik verilerin doğruluğunu ve güvenilirliğini etkileyen temel tasarım değişkenlerini oluşturmaktadır.

Şekil 3.1 (b) Mesh model, geometrik formun korunması ve sayısal hassasiyetin artırılması

amacıyla Quad-Dominant mesh yapısı tercih edilmiştir. Eleman boyutu, numunenin ağırlık merkezi orta nokta olacak şekilde 25 milimetrelik bir küre yarıçapı boyunca 1 mm ve test numunesinin geri kalanında 2 mm seçilmiştir. Toplam 83795 eleman ve 122775 düğüm noktası ile oluşturulan bu yapı, özellikle stres dağılımlarının yoğunlaştığı bölgelerde yüksek doğruluklu sonuçlar elde edilmesine olanak tanımaktadır.

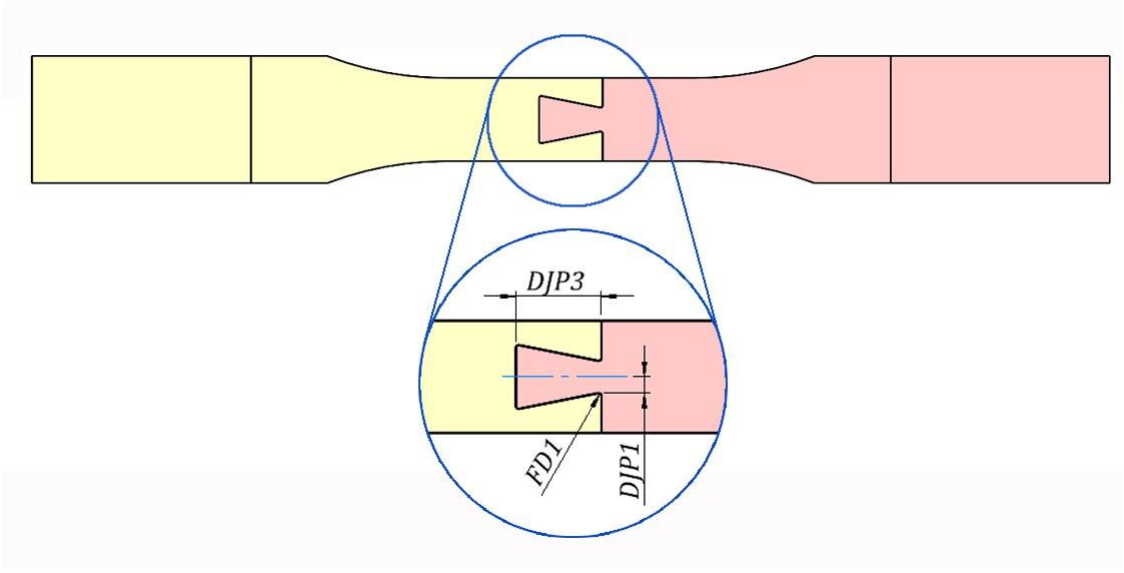
Şekil 3.1 (c) Sınır şartları, çekme deneyi simülasyonunda gerçeğe yakın bir yükleme durumu oluşturmak amacıyla; numunenin alt kavrama bölgesi (A) tüm serbestlik derecelerinde sabitlenmiş, üst kısmına ise z-ekseni doğrultusunda 0.35 mm kontrollü yer değiştirme uygulanmıştır. Uygulanan bu yer değiştirme sırasında numunenin test ekseninden sapmasını önlemek için x ve y yönlerindeki hareketler 0 mm olarak sınırlandırılmıştır. Ayrıca, analiz sırasında sayısal stabiliteyi korumak ve numunenin yalnızca çekme ekseninde uzamasını sağlamak amacıyla, tüm gövde üzerinde z-ekseni dışındaki hareketler kısıtlanarak tek eksenli gerilme koşulları göz önünde bulundurulmuştur. Kenetlenme arayüzünde gerçeğe uygun bir mekanik etkileşim sağlamak amacıyla, dişi ve erkek parçaların temas eden dörder yüzeyi arasında 0.3 statik sürtünme katsayısı tanımlanmıştır.

3.2.2 Kırlangıç kuyruğu Kenetlenme Modeli

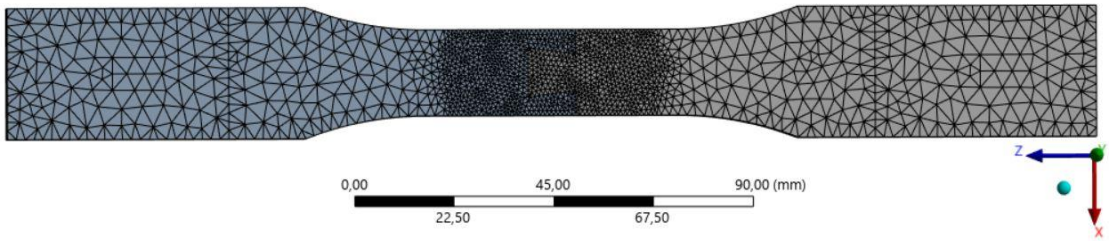
Kırlangıç kuyruğu bağlantı kenetlenme modeli, mekanik kilitlenme etkisinin belirgin olduğu ve yük aktarımının daha geniş bir temas alanı üzerinden sağlandığı bir geometrik yapı sunmaktadır. Bu model, özellikle eklemeli imalat uygulamalarında arayüz dayanımını artırmaya yönelik sıklıkla tercih edilen bir kenetlenme türüdür. Çalışmada, Kırlangıç kuyruğu geometrisine ait açısal ve boyutsal parametrelerin mekanik performans üzerindeki etkileri parametrik analizler yoluyla değerlendirilmiştir. Kırlangıç kuyruğu bağlantı kenetlenme modeli için DJP1, DJP3 uzunluk parametreleri ve FD1 köşe yuvarlatma parametresi olmak üzere 3 parametreye ait seviyeler Çizelge 3.3'de verilmiştir. Kırlangıç kuyruğu bağlantı kenetlenme arayüzünü içeren katı model, mesh yapısı ve sınır şartları Şekil 3.2'de gösterilmektedir. Belirlenen bu değişkenlerin farklı kombinasyonları analiz edilerek yapısal bütünlüğü maksimize edecek en ideal geometrik formun elde edilmesi amaçlanmıştır.

Çizelge 3.3 Kırlangıç kuyruğu bağlantı kenetlenme modeli şekil bağlantısı parametre sınır şartları

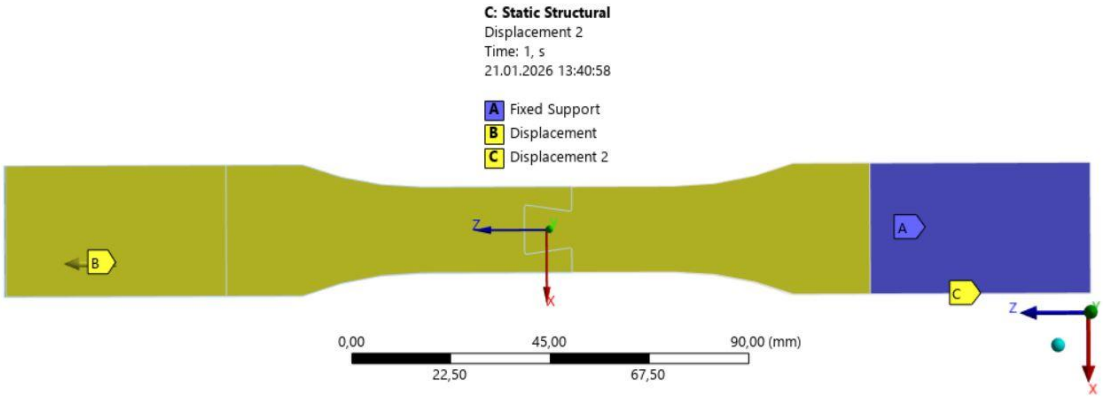
Parametre	**S1**	**S2**	**S3**
DJP1 (mm)	2	3	4
DJP3 (mm)	7	10.5	14.5
FD1 (mm)	0.5	1.75	3



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.2 (a) Kırlangıç kuyruğu bağlantı kenetlenme modeli ve parametreleri (b) mesh modeli (c) sınır şartları

Şekil 3.2 (a) Kırlangıç kuyruğu bağlantı kenetlenme modeli ve parametreleri, Kırlangıç kuyruğu bağlantı kenetlenme modeli, mekanik kilitlenme etkisinin maksimize edildiği ve yük aktarımının geniş bir temas yüzeyi üzerinden sağlandığı bir geometri olarak tasarlanmıştır. Şekil 3.2 (a)'da görülen katı model, eklemeli imalat arayüz dayanımını analiz etmek amacıyla DJP1, DJP3 ve FD1 parametreleri doğrultusunda parametrik olarak değerlendirilmiştir. Bu geometrik konfigürasyon, özellikle çekme yükleri altında arayüzeydeki gerilme dağılımını homojenleştirmeyi hedeflemektedir.

Şekil 3.2 (b) Mesh modeli, Sayısal analizlerin hassasiyetini artırmak amacıyla modele Quad-Dominant tabanlı bir mesh yapısı uygulanmıştır. Kenetlenme bölgesindeki gerilme yığılmalarını detaylı inceleyebilmek için bu bölgede lokal mesh yoğunlaştırmasına gidilmiştir. Eleman boyutu, numunenin ağırlık merkezi orta nokta olacak şekilde 25 milimetrelik bir küre yarıçapı boyunca 1 mm ve test numunesinin geri kalanında 2 mm seçilmiştir. Toplamda 84160 eleman ve 123196 düğüm noktası ile oluşturulan bu mesh, çözümleme süresi ile sonuç doğruluğu arasındaki dengeyi koruyacak şekilde yapılandırılmıştır.

Şekil 3.2 (c) Sınır şartları, Deney düzeneğini simüle etmek amacıyla uygulanan sınır şartları Şekil 3.2 (c)'de gösterilmiştir. Numunenin alt kavrama bölgesi (A) tüm serbestlik derecelerinde sabitlenmiş, üst bölgesine ise z-ekseni doğrultusunda 0.35 mm kontrollü yer değiştirme tanımlanmıştır. Analiz sırasında numunenin eksenel stabilitesini korumak ve sadece çekme yönündeki davranışını gözlemlemek adına, x ve y yönlerindeki hareketler kısıtlanarak tek eksenli yükleme koşulları garanti altına alınmıştır. Modeli oluşturan erkek ve dişi parçalar arasındaki mekanik etkileşimi gerçeğe uygun şekilde yansıtabilmek amacıyla, kenetlenme ile ilgili arayüzeylerde doğrusal olmayan sürtünmeli temas koşulu tanımlanmıştır. Bu etkileşim bölgesi, erkek parçanın temas eden 2 yüzeyi ile dişi parçanın bunları karşılayan 2 yüzeyi eşleştirilerek oluşturulmuştur. Montaj sırasında parçalar arası bağıl kayma hareketine karşı oluşan fiziksel direnci simüle etmek ve kuvvet aktarımını doğru hesaplayabilmek için yüzeyler arası statik sürtünme katsayısı 0.3 olarak belirlenmiştir. Bu sayede, çekme kuvveti altında arayüzeylerde meydana gelebilecek mikroskobik kayma, nüfuz etme ve lokal temas kayıplarının sayısal çözümlemedeki doğruluğu güvence altına alınmıştır.

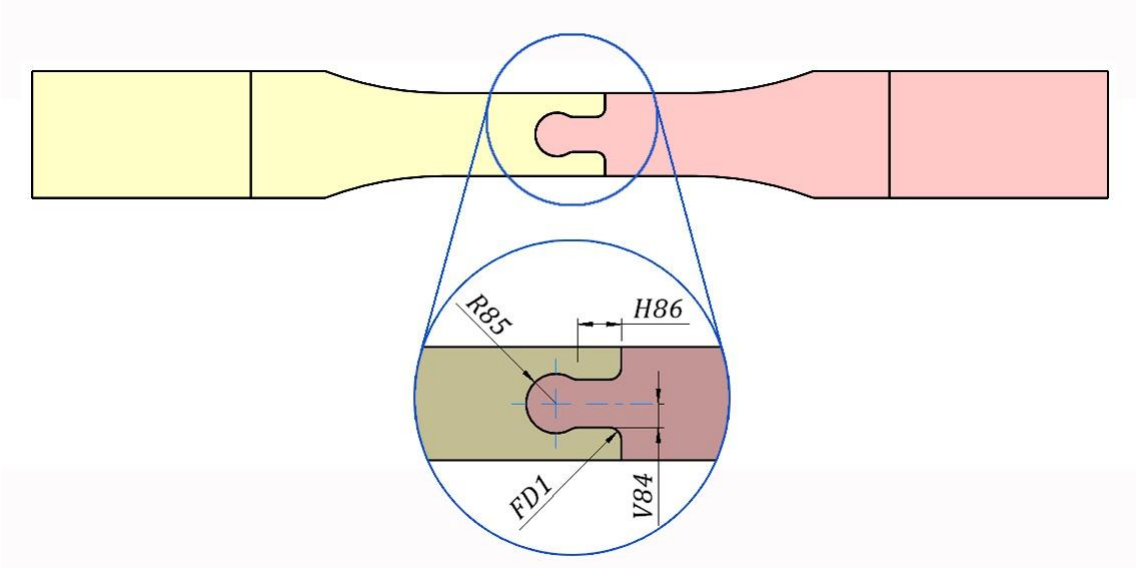
3.2.3 Dairesel Bağlantı Kenetlenme Modeli

Dairesel bağlantı kenetlenme modeli, eğrisel geçişlere sahip yapısı sayesinde gerilme yığılmalarının azaltılmasını hedefleyen bir arayüz tasarımını temsil etmektedir. Bu model, özellikle yükün daha homojen dağıtılması ve arayüzde sürekliliğin sağlanması açısından incelenmiştir. Dairesel kenetlenme geometrisinin parametrik varyasyonları, çekme yükü altında oluşan gerilme ve şekil değiştirme davranışları açısından analiz edilmiştir. Dairesel bağlantı kenetlenme modeli için V84, H86 uzunluk parametreleri, R85 daire yarıçapı parametresi ve FD1 köşe yuvarlatma parametresi olmak üzere 4 parametreyi içeren katı model Şekil 3.3'de gösterilmektedir. Dairesel bağlantı kenetlenme modeli için V84, H86 uzunluk parametreleri, R85 daire yarıçapı parametresi ve FD1 köşe yuvarlatma parametresi olmak üzere 4 parametreye ait seviyeler Çizelge 3.4'te verilmiştir. Dairesel bağlantı kenetlenme arayüzünü içeren katı model, mesh yapısı ve sınır şartları Şekil 3.3'de gösterilmektedir.

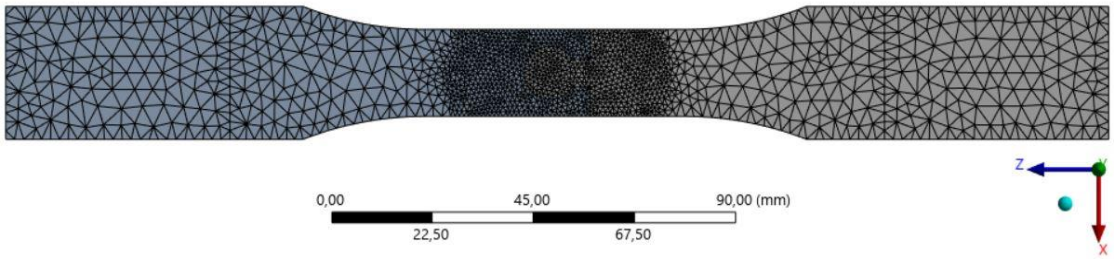
Çizelge 3.4 Dairesel bağlantı kenetlenme modeli şekil bağlantısı parametre sınır şartları

Parametre	**S1**	**S2**	**S3**
V84 (mm)	2	3	4
H86 (mm)	4	7	10
R85 (mm)	5	5.75	6.5
FD1 (mm)	0.5	1.25	2

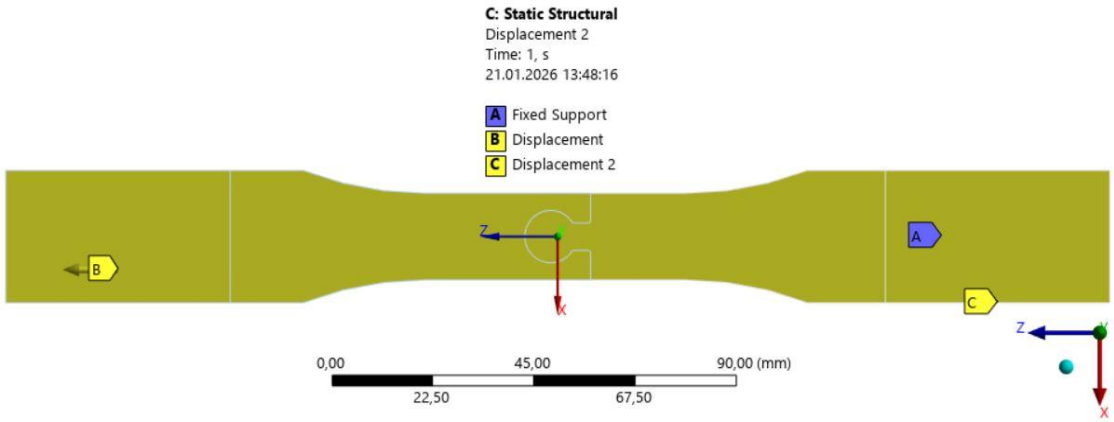
Çizelge 3.4'te belirtilen parametre seviyelerinin kombinasyonlarıyla oluşturulan geometrik konfigürasyonlar, SEY analizleri için temel teşkil etmiştir. Çözümleme hassasiyetini artırmak amacıyla, özellikle yük aktarımının yoğunlaştığı eğrisel kenetlenme ve radyuslu geçiş bölgelerinde eleman boyutları küçültülerek detaylı bir ağ yapısı kurgulanmıştır. Bu yaklaşım, karmaşık geometri üzerinde oluşabilecek gerilme yığılmalarının yüksek doğrulukla elde edilmesini sağlamaktadır. Sayısal modelin sınır şartları ise statik çekme testini gerçeğe en yakın şekilde simüle edecek biçimde tanımlanmıştır. Sistemin sol ucu tamamen sabitlenerek kısıtlanmış, sağ ucuna ise eksenel doğrultuda kontrollü yer değiştirme uygulanarak mekanik yükleme gerçekleştirilmiştir. Kurgulanan bu sağlam sayısal altyapı sayesinde, farklı parametrelerin bağlantı dayanımı üzerindeki etkileri sistematik ve karşılaştırmalı olarak değerlendirilebilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.3 (a) Dairesel bağlantı kenetlenme modeli ve parametreleri (b) mesh modeli (c) sınır şartları

Şekil 3.3 (a) Dairesel bağlantı kenetlenme modeli ve parametreleri, Dairesel bağlantı kenetlenme modeli, dairesel ve eğrisel geçişlere sahip geometrisi sayesinde gerilme yığılmalarını minimize etmeyi hedefleyen bir tasarım olarak ele alınmıştır. Şekil 3.3 (a)'da sunulan katı modelde; V84, H86, R85 ve FD1 parametreleri kullanılarak, dairesel

geometrinin arayüzeydeki yük aktarım sürekliliği ve deformasyon davranışı üzerindeki etkileri parametrik olarak incelenmiştir. Bu tasarım stratejisi, yükün arayüz boyunca daha homojen dağıtılmasını amaçlamaktadır.

Şekil 3.3 (b) Mesh modeli, sayısal analizlerin çözüm hassasiyetini ve sürekliliğini sağlamak adına model üzerinde Quad-Dominant temelli bir ağ yapısı kurgulanmıştır. Özellikle dairesel birleşme yüzeylerindeki kritik gerilme değişimlerini hassas bir şekilde takip edebilmek için bu bölgelerde lokal mesh sıkılaştırması uygulanmıştır. Eleman boyutu, numunenin ağırlık merkezi orta nokta olacak şekilde 25 milimetrelik bir küre yarıçapı boyunca 1 mm ve test numunesinin geri kalanında 2 mm seçilmiştir. Toplam 102959 eleman ve 148582 düğüm noktası ile oluşturulan bu yapısal ağ, geometrik karmaşıklığa rağmen yüksek yakınsama kararlılığı sergilemesi amacıyla tasarlanmıştır.
Şekil 3.3 (c) Sınır şartları, simülasyonun fiziksel gerçekçiliğini sağlamak amacıyla Şekil 3.3 (c)'de detaylandırılan sınır şartları tanımlanmıştır. Numunenin alt kavrama bölgesi tüm serbestlik derecelerinde sabitlenmiş, karşı uçtaki üst bölgeye ise z-ekseni yönünde 0.35 mm değerinde kontrollü çekme yükü uygulanmıştır. Analitik doğruluğu korumak ve numuneyi saf çekme modunda tutmak için x ve y eksenlerindeki ikincil hareketler tamamen kısıtlanarak deney koşulları simüle edilmiştir. Kenetlenme arayüzünde gerçeğe uygun bir mekanik etkileşim sağlamak amacıyla, dişi ve erkek parçaların temas eden üçer yüzeyi arasında 0.3 statik sürtünme katsayısı tanımlanmıştır.

3.3 Nümerik Analiz

Bu çalışmada, çok malzemeli kenetlenme geometrilerinin mekanik davranışını değerlendirmek amacıyla nümerik analizler gerçekleştirilmiştir. Analiz süreci, ANSYS Workbench yazılımı içerisinde yer alan Static Structural modülü kullanılarak yürütülmüş ve her bir kenetlenme modeli için tutarlı bir analiz altyapısı oluşturulmuştur. Bu kapsamda, tüm modellerde kullanılan malzeme özellikleri, sınır şartları ve yükleme senaryoları aynı prensiplere göre tanımlanarak, elde edilen sonuçların karşılaştırılabilir olması sağlanmıştır. Kenetlenme arayüzlerinin davranışını temsil edebilmek amacıyla modeller, çekme testi koşullarını simüle edecek şekilde yüklenmiştir.
Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen bu nümerik analizler sayesinde, karmaşık geometrilere sahip kenetlenme arayüzlerinde oluşan gerilme ve şekil değiştirme

dağılımları detaylı ve hassas biçimde incelenebilmiştir. Sürekli ortamın sonlu sayıda elemana ayrılması prensibine dayanan bu yöntem, özellikle arayüz bölgelerinde meydana gelen yerel gerilme yığılmalarının ve deformasyon mekanizmalarının ortaya konulmasında önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu tür bölgelerde deneysel ölçümlerin zor ve maliyetli olması nedeniyle, sonlu elemanlar yöntemi güvenilir, kapsamlı ve etkin bir değerlendirme aracı olarak öne çıkmaktadır ve literatürde de sıkça tercih edilmektedir (Kepenekci 2021).

Gerçekleştirilen analizler sonucunda elde edilen eşdeğer gerilme, şekil değiştirme alanları ve reaksiyon kuvvetleri, farklı kenetlenme geometrilerinin mekanik performanslarının karşılaştırılmasında kullanılmıştır. Ayrıca bu nümerik çıktılar, parametrik tasarım yaklaşımı ile birlikte değerlendirilerek optimizasyon sürecine girdi sağlamıştır. Böylece, fiziksel deney yapılmaksızın, çok malzemeli kenetlenme arayüzlerinin mekanik performansı sistematik, tutarlı ve tekrarlanabilir bir yöntemle analiz edilmiştir.

3.4 Parametrik Çalışma Uzayı ve DOE

Çalışma kapsamında ele alınan T-bağlantı, Dairesel bağlantı ve Kırlangıç kuyruğu bağlantı konfigürasyonlarının yapısal performanslarını ve mekanik davranışlarını karşılaştırmalı olarak incelemek amacıyla kapsamlı bir parametrik çalışma uzayı kurgulanmıştır. Bu üç farklı kenetlenme geometrisinin her biri için tanımlanan özgün girdi değişkenlerinin çıktı parametreleri üzerindeki etkilerini eş zamanlı olarak analiz edebilmek için istatistiksel deney tasarımı aşamasında Box-Behnken yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntem, geleneksel tek değişkenli analiz yöntemlerinin aksine tasarım değişkenlerinin birbirleriyle olan karmaşık etkileşimlerini belirlemeye ve çok boyutlu bir tasarım alanını uygun simülasyon sayısı ile taramaya olanak tanımaktadır.

Box-Behnken tasarımının seçilmesindeki temel neden, bu yöntemin tasarım parametrelerinin en uç noktalarını içermeyen yapısı sayesinde daha güvenli ve hesaplama açısından verimli bir analiz süreci sunmasıdır. İkinci dereceden matematiksel modellerin oluşturulması için gerekli olan veriyi yüksek doğrulukla sağlayan bu yaklaşım, özellikle çok sayıda faktörün bulunduğu durumlarda örnekleme sayısını minimize etmektedir. Her bir bağlantı tipi için belirlenen alt ve üst sınırlar dahilinde gerçekleştirilen bu sistematik

örnekleme süreci, sistemin mekanik tepkilerini temsil eden kritik veri noktalarının stratejik olarak seçilmesini sağlamıştır. Böylece hem üretim sınırları içerisinde kalan güvenli tasarım bölgeleri tanımlanmış hem de bir sonraki aşamada gerçekleştirilecek olan tepki yüzeyi analizleri için istatistiksel açıdan yüksek çözünürlüklü ve güvenilir bir temel oluşturulmuştur. Bu yaklaşım, simülasyon maliyetlerini optimize ederken modellerin tahmin kabiliyetini ve tasarımın operasyonel başarısını en üst düzeye çıkarmayı hedeflemektedir. Bu sağlam altyapı, parametreler arası karmaşık etkileşimlerin yüksek doğrulukla çözümlenmesine imkan tanımaktadır.

3.4.1 T-Bağlantı Kenetlenme Modeli Deney Tasarımı

T-Bağlantı kenetlenme modeline yönelik hazırlanan ve 49 simülasyon numunesini kapsayan Box-Behnken deney tasarımına ait girdi verileri Çizelge 3.5'te sunulmuştur. Söz konusu tasarım; M1P1, M1P2, M1P3 ve FD1 uzunluk değerleri ile M1A1 ve M1A2 açı değerlerinden oluşan toplam altı parametreye dayanmaktadır.

Çizelge 3.5 T-bağlantı kenetlenme modeli Box-Behnken deney tasarımı girdileri

Test No	**M1A1** (°)	**M1A2** (°)	**M1P1** (mm)	**M1P3** (mm)	**M1P2** (mm)	**FD1** (mm)
1	112.5	112.5	3	3	7	0.3
2	90	90	3	1.5	7	0.3
3	135	90	3	1.5	7	0.3
4	90	135	3	1.5	7	0.3
5	135	135	3	1.5	7	0.3
6	90	90	3	4.5	7	0.3
7	135	90	3	4.5	7	0.3
8	90	135	3	4.5	7	0.3
9	135	135	3	4.5	7	0.3
10	112.5	90	2	3	4	0.3
11	112.5	135	2	3	4	0.3
12	112.5	90	4	3	4	0.3
13	112.5	135	4	3	4	0.3
14	112.5	90	2	3	10	0.3
15	112.5	135	2	3	10	0.3
16	112.5	90	4	3	10	0.3
17	112.5	135	4	3	10	0.3
18	112.5	112.5	2	1.5	7	0.1
19	112.5	112.5	4	1.5	7	0.1
20	112.5	112.5	2	4.5	7	0.1
21	112.5	112.5	4	4.5	7	0.1
22	112.5	112.5	2	1.5	7	0.5

Çizelge 3.5 (Devamı)

Test No	M1A1 (°)	M1A2 (°)	M1P1 (mm)	M1P3 (mm)	M1P2 (mm)	FD1 (mm)
23	112.5	112.5	4	1.5	7	0.5
24	112.5	112.5	2	4.5	7	0.5
25	112.5	112.5	4	4.5	7	0.5
26	90	112.5	3	1.5	4	0.3
27	135	112.5	3	1.5	4	0.3
28	90	112.5	3	4.5	4	0.3
29	135	112.5	3	4.5	4	0.3
30	90	112.5	3	1.5	10	0.3
31	135	112.5	3	1.5	10	0.3
32	90	112.5	3	4.5	10	0.3
33	135	112.5	3	4.5	10	0.3
34	112.5	90	3	3	4	0.1
35	112.5	135	3	3	4	0.1
36	112.5	90	3	3	10	0.1
37	112.5	135	3	3	10	0.1
38	112.5	90	3	3	4	0.5
39	112.5	135	3	3	4	0.5
40	112.5	90	3	3	10	0.5
41	112.5	135	3	3	10	0.5
42	90	112.5	2	3	7	0.1
43	135	112.5	2	3	7	0.1
44	90	112.5	4	3	7	0.1
45	135	112.5	4	3	7	0.1
46	90	112.5	2	3	7	0.5
47	135	112.5	2	3	7	0.5
48	90	112.5	4	3	7	0.5
49	135	112.5	4	3	7	0.5

Bu sistematik girdiler, numunelerin mekanik performans ve kenetlenme mukavemetini belirleyecek sayısal simülasyonların temelini oluşturmaktadır.

3.4.2 Kırlangıç kuyruğu Bağlantı Kenetlenme Modeli Deney Tasarımı

Tepki Yüzey Metodolojisi (TYM) kapsamında tercih edilen bu istatistiksel yaklaşım, belirlenen üç bağımsız geometrik parametrenin hem yapısal performansa olan bireysel etkilerini hem de birbirleriyle olan karmaşık etkileşimlerini optimum analiz sayısıyla incelemeye olanak tanımaktadır. Deney kurgusunda, her bir parametre için tasarım kısıtları göz önünde bulundurularak alt, orta ve üst olmak üzere üç farklı seviye belirlenmiştir. Merkez noktası kombinasyonlarını da barındıran bu matris yapısı sayesinde, toplam 13 farklı test konfigürasyonu Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6 Kırlangıç kuyruğu bağlantı kenetlenme modeli Box-Behnken deney tasarımı girdileri

Test No	**DJP1** (mm)	**DJP3** (mm)	**FD1** (mm)
1	2	7	1,75
2	3	7	0,5
3	3	7	3
4	4	7	1,75
5	2	10,75	0,5
6	2	10,75	3
7	3	10,75	1,75
8	4	10,75	0,5
9	4	10,75	3
10	2	14,5	1,75
11	3	14,5	0,5
12	3	14,5	3
13	4	14,5	1,75

Çizelge 3.6'da yer alan simülasyon testleri, seçilen parametrelerin kenetlenme performansı üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla oluşturulmuştur. Bu test kombinasyonları, simülasyon aşamasında kullanılacak temel veri setini oluşturmaktadır.

3.4.3 Dairesel Bağlantı Kenetlenme Modeli Deney Tasarımı

Dairesel bağlantı kenetlenme modelinin yapısal performansı üzerinde etkili olduğu öngörülen V84, H86, R85 ve FD1 bağımsız geometrik parametreleri, TYM çerçevesinde eşzamanlı olarak değerlendirilmiştir. Box-Behnken tasarımının istatistiksel altyapısı gereği, söz konusu dört parametrenin her biri için tasarım kısıtları gözetilerek alt, orta ve üst olmak üzere üç farklı seviye belirlenmiştir. Bu istatistiksel yaklaşım, parametrelerin yapısal dayanıma olan bireysel etkilerini ve birbirleriyle olan karmaşık etkileşimlerini optimum analiz sayısıyla incelemeye imkân tanımaktadır. Merkez noktası kombinasyonlarını da barındıran deney matrisi doğrultusunda, dairesel kenetlenme bölgesi için ardışık SEY analizlerine temel oluşturacak toplam 25 farklı test konfigürasyonu sistematik biçimde kurgulanmıştır. Oluşturulan bu zengin veri seti, arayüzeydeki gerilme dağılımını iyileştirecek en uygun formun tespit edilmesinde kritik bir rol üstlenmektedir. Elde edilecek sayısal sonuçlar tasarımın nihai optimizasyon aşamasına doğrudan yön verecek ve mekanik performans en üst düzeye taşınacaktır. Böylece geliştirilen bu özgün tasarımın endüstriyel uygulanabilirliği artırılmış olacaktır. Dairesel bağlantı kenetlenme modeline yönelik hazırlanan bu kapsamlı Box-Behnken deney tasarımı girdileri Çizelge 3.7'de sunulmuştur.

Çizelge 3.7 Dairesel bağlantı kenetlenme modeli Box-Behnken deney tasarımı girdileri

Test No	**V84** (mm)	**H86** (mm)	**R85** (mm)	**FD1** (mm)
1	3	7	5.75	1.25
2	2	4	5.75	1.25
3	4	4	5.75	1.25
4	2	10	5.75	1.25
5	4	10	5.75	1.25
6	3	7	5	0.5
7	3	7	6.5	0.5
8	3	7	5	2
9	3	7	6.5	2
10	2	7	5.75	0.5
11	4	7	5.75	0.5
12	2	7	5.75	2
13	4	7	5.75	2
14	3	4	5	1.25
16	3	4	6.5	1.25
17	3	10	6.5	1.25
18	2	7	5	1.25
19	4	7	5	1.25
20	2	7	6.5	1.25
21	4	7	6.5	1.25
22	3	4	5.75	0.5
23	3	10	5.75	0.5
24	3	4	5.75	2
25	3	10	5.75	2

Çizelge 3.7'da sunulan test kombinasyonları, seçilen parametrelerin kenetlenme performansı üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla oluşturulmuştur. Bu değerler, simülasyon aşamasında gerçekleştirilecek mekanik analizlerin temel veri setini kapsamaktadır.

3.5 YYM Optimizasyonu

Bu çalışmada, kenetlenme geometrilerine ait çok sayıda tasarım parametresinin arayüz mekanik performansı üzerindeki etkilerini bütüncül ve sistematik bir yaklaşımla değerlendirebilmek amacıyla YYM tabanlı bir optimizasyon süreci uygulanmıştır. Çok parametreli ve doğrusal olmayan mühendislik problemlerinde, tasarım değişkenleri ile hedef fonksiyon arasındaki ilişkilerin doğrudan analitik olarak ifade edilmesi çoğu zaman mümkün olmadığından, YYM yaklaşımı etkin ve güvenilir bir optimizasyon çerçevesi

sunmaktadır. Bu yöntem sayesinde, sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen sınırlı sayıdaki nümerik veri kullanılarak, geometrik parametreler ile arayüz davranışını temsil eden çıktılar arasında ikinci dereceden polinom temelli bir ilişki kurulmuştur. Deney tasarımı (Design of Experiments - DOE) ilkeleri doğrultusunda oluşturulan parametrik kombinasyonlar aracılığıyla tasarım uzayı sistematik biçimde taranmış, böylece hesaplama maliyeti önemli ölçüde azaltılırken parametrelerin hedef fonksiyon üzerindeki göreli etkileri ve etkileşimleri nicel olarak değerlendirilmiştir (Hadiyat vd. 2022).

Son yıllarda YYM, klasik deneysel yaklaşımların ötesine geçerek, gözlemsel ve nümerik verilerin de etkin biçimde kullanılabildiği daha esnek bir optimizasyon yöntemine dönüşmüştür. Özellikle yüksek değişkenlik içeren sonlu elemanlar analizlerine dayalı çalışmalarda, verilerin ön işleme tabi tutulması, uygun yanıt yüzeyi modellerinin seçilmesi ve optimizasyon stratejisinin problem yapısına göre uyarlanması, YYM'nin başarısını belirleyen temel unsurlar olarak öne çıkmaktadır. Bu kapsamda, Static Structural analizlerinden elde edilen gerilme, şekil değiştirme ve reaksiyon kuvveti gibi çıktılar, ANSYS Workbench ortamında yer alan RSO modülüne aktarılmıştır. RSO modülü, nümerik analiz sonuçlarını doğrudan optimizasyon sürecine entegre ederek, çok boyutlu tasarım uzayında güvenilir ve tekrarlanabilir optimum çözümlerin elde edilmesine olanak tanımaktadır. Literatürde farklı mühendislik uygulamalarında başarıyla kullanılan YYM/RSO tabanlı yaklaşımlar dikkate alındığında, bu yöntemin kenetlenme arayüzlerinin geometrik optimizasyonunda hesaplama verimliliği, modelleme esnekliği ve karar destek yetkinliği açısından güçlü bir araç sunduğu açıkça görülmektedir (Rezaei vd. 2022).

Bu bölümde, sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen çıktılar, kenetlenme geometrilerinin performansını optimize etmek amacıyla ANSYS RSO tabanlı optimizasyon modülüne aktarılmıştır. Bu aşamada, geometrik parametreler tasarım değişkenleri olarak tanımlanmış; eşdeğer gerilme değerleri ise hedef fonksiyonlar ve sınır şartları çerçevesinde değerlendirilmiştir. RSO yaklaşımı sayesinde, parametrik uzayda sistematik bir tarama yapılmış ve optimum kenetlenme geometrileri belirlenmiştir.

4. BULGULAR

Bu bölümde, eklemeli imalat ile üretilen parçaların arayüz dayanımlarını artırmak amacıyla tasarlanan T-bağlantı, Kırlangıç kuyruğu bağlantı ve Dairesel bağlantı kenetlenme modellerine ait analiz bulguları sunulmaktadır. T-bağlantı yapısı, keskin geometrik geçişleri nedeniyle literatürde gerilme yığılmalarının temel mekanizmasını anlamak için sıklıkla referans alınan klasik bir bağlantı modelidir. Kırlangıç kuyruğu tasarımı, sağladığı mekanik kilitlenme etkisi sayesinde özellikle çekme yüklerine karşı arayüz dayanımını maksimize etmesiyle bilinmekte ve yapısal uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Dairesel bağlantı modeli ise eğrisel formun getirdiği geometrik süreklilik ile gerilme konsantrasyonlarını azaltma ve yükü daha homojen dağıtma potansiyeli nedeniyle modern tasarım yaklaşımlarında önemli bir yere sahiptir.

Tasarlanan bu kenetlenme arayüzlerinin yük altındaki davranışlarını incelemek ve dayanım limitlerini belirlemek amacıyla, her üç model için sonlu elemanlar yöntemiyle çekme testi simülasyonları uygulanmıştır. Analizlerden elde edilen gerilme ve deformasyon verileri, modellerin mevcut performansını göstermiş; böylece tasarım iyileştirme ihtiyacı netleşmiş ve optimizasyon süreci için gerekli temel veriler sağlanmıştır.

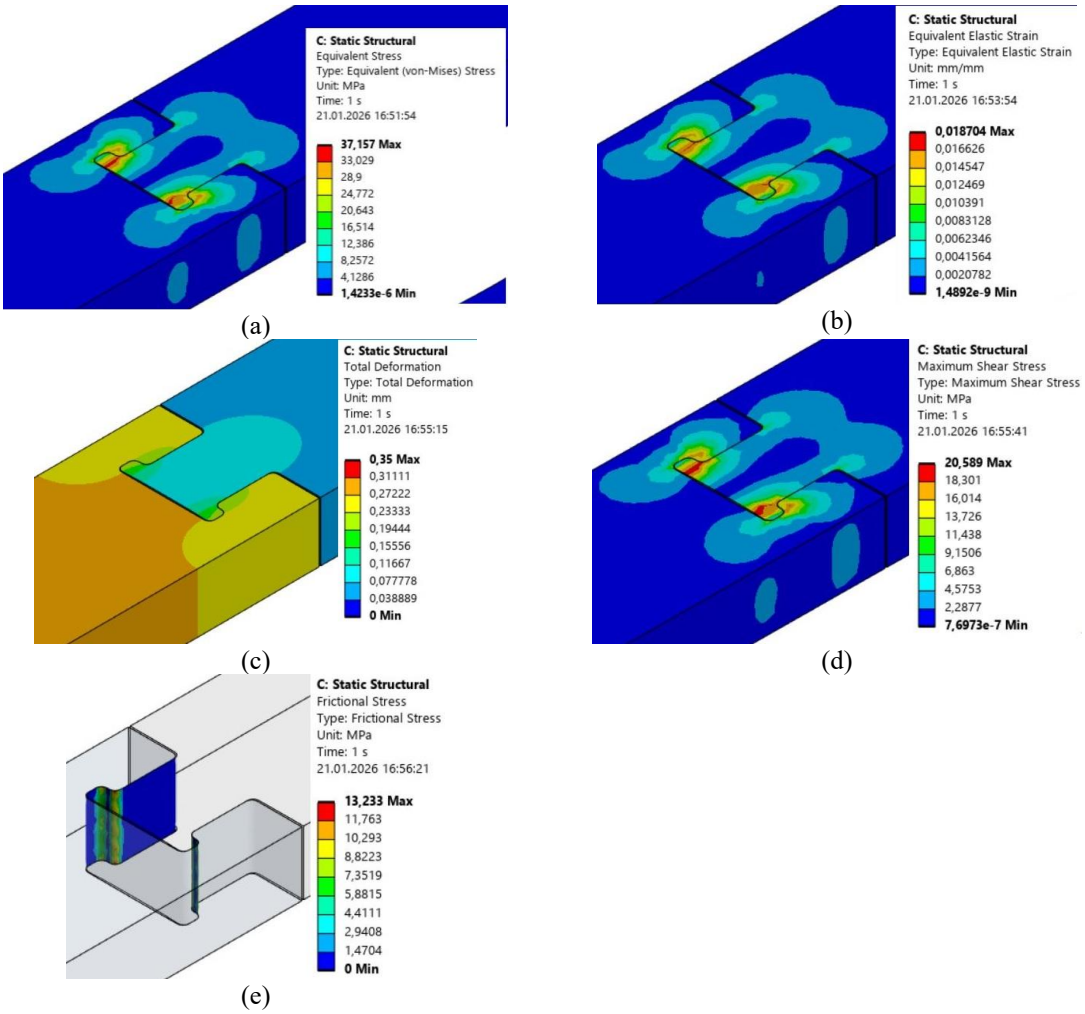
Belirlenen bu üç farklı kenetlenme geometrisinin performansını en üst düzeye çıkarmak ve parametrelerin birbirleriyle olan etkileşimini analiz etmek amacıyla her bir kenetlenme modeli için Ansys Workbench platformunda RSO modülü kullanılarak sistematik ve kronolojik bir çalışma akışı takip edilmiştir. Süreç, geometrik parametrelerin belirlenen alt ve üst sınırları arasında nasıl bir kombinasyonla analiz edileceğinin kurgulandığı DOE aşamasıyla başlamaktadır. Bu aşamayı takiben, elde edilen simülasyon sonuçları kullanılarak girdi parametreleri ile çıktı değerleri arasındaki matematiksel ilişkiyi temsil eden tepki yüzeyi oluşturulmuş ve nihai olarak bu yüzeyler üzerinden hedeflenen en yüksek dayanımı sağlayan optimum parametre setlerinin tespit edildiği optimizasyon adımı gerçekleştirilmiştir. Uygulanan bu bütüncül metodoloji sayesinde geleneksel deneme yanılma süreçlerine gerek kalmadan tasarım süreci hızlandırılmış ve bağlantıların mekanik güvenilirliği sayısal olarak garanti altına alınmıştır.

4.1 Statik SEY Analizleri

4.1.1 T-Bağlantı Kenetlenme Modeli

T-bağlantı kenetlenme arayüzünün mekanik güvenilirliğini ve yük altındaki yapısal tepkisini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizlerinde, tasarımın performansını bütüncül bir yaklaşımla karakterize eden beş sonuç çıktısı incelenmiştir. Bu kapsamda; yapının mukavemet sınırlarını ve güvenli çalışma aralığını belirlemek için incelenen eşdeğer gerilme dağılımı (a), malzemenin süneklik limitlerini ve fiziksel zorlanma durumunu analiz etmek için ele alınan eşdeğer elastik birim şekil değiştirme (b) ve kenetlenme geometrisinin rijitliğini ve form koruma kapasitesini ölçmek için kullanılan toplam deformasyon (c) verileri esas alınmıştır. Ayrıca, kenetlenme dişlerinin tabanında oluşabilecek kesme hasarlarını öngörmek adına maksimum kayma gerilmesi (d) ve arayüzeydeki yük aktarımında temas mekanizmasının rolünü belirlemek amacıyla sürtünme gerilmesi (e) dağılımları detaylandırılmıştır. Gerçekleştirilen çekme testi simülasyonu sonucunda elde edilen ve arayüzün mekanik davranışını özetleyen bu analiz bulguları sırasıyla Şekil 4.1'de görülmektedir.

Şekil 4.1 üzerinde sunulan renk konturları incelendiğinde uygulanan eksenel çekme yükünün arayüzey boyunca nasıl dağıldığı ve hangi bölgelerde kritik değerlere ulaştığı açıkça görülmektedir. Özellikle kenetlenme dişlerinin iç kısımlarında ve taban köşelerinde belirginleşen eşdeğer gerilme yığılmaları yapının mekanik zayıflık gösterebileceği potansiyel hasar başlama noktalarını işaret etmektedir. Bununla birlikte eşdeğer elastik birim şekil değiştirme profili malzemenin yerel düzeydeki esneme davranışını gözler önüne sererek bağlantı arayüzündeki uyumluluğu doğrulamaktadır. Yük altındaki genel rijitlik karakteristiğini yansıtan toplam deformasyon verileri ise bağlantının yapısal formunu ne ölçüde koruyabildiğini kantitatif olarak ortaya koymaktadır. Diğer taraftan temas bölgelerinde oluşan maksimum kayma gerilmesi değerleri mekanik kilidin sıyrılma direncini belirlerken sürtünme gerilmesi dağılımı yüzeyler arası tutunma performansını ve enerji yutma kapasitesini şeffaf bir biçimde haritalandırmaktadır. Tüm bu sayısal göstergeler bütünleşik bir perspektifle ele alındığında T formlu makro mekanik kilit tasarımının yük taşıma kapasitesi ve yapısal kararlılığı hakkında oldukça kapsamlı bir değerlendirme zemini oluşturulmaktadır.



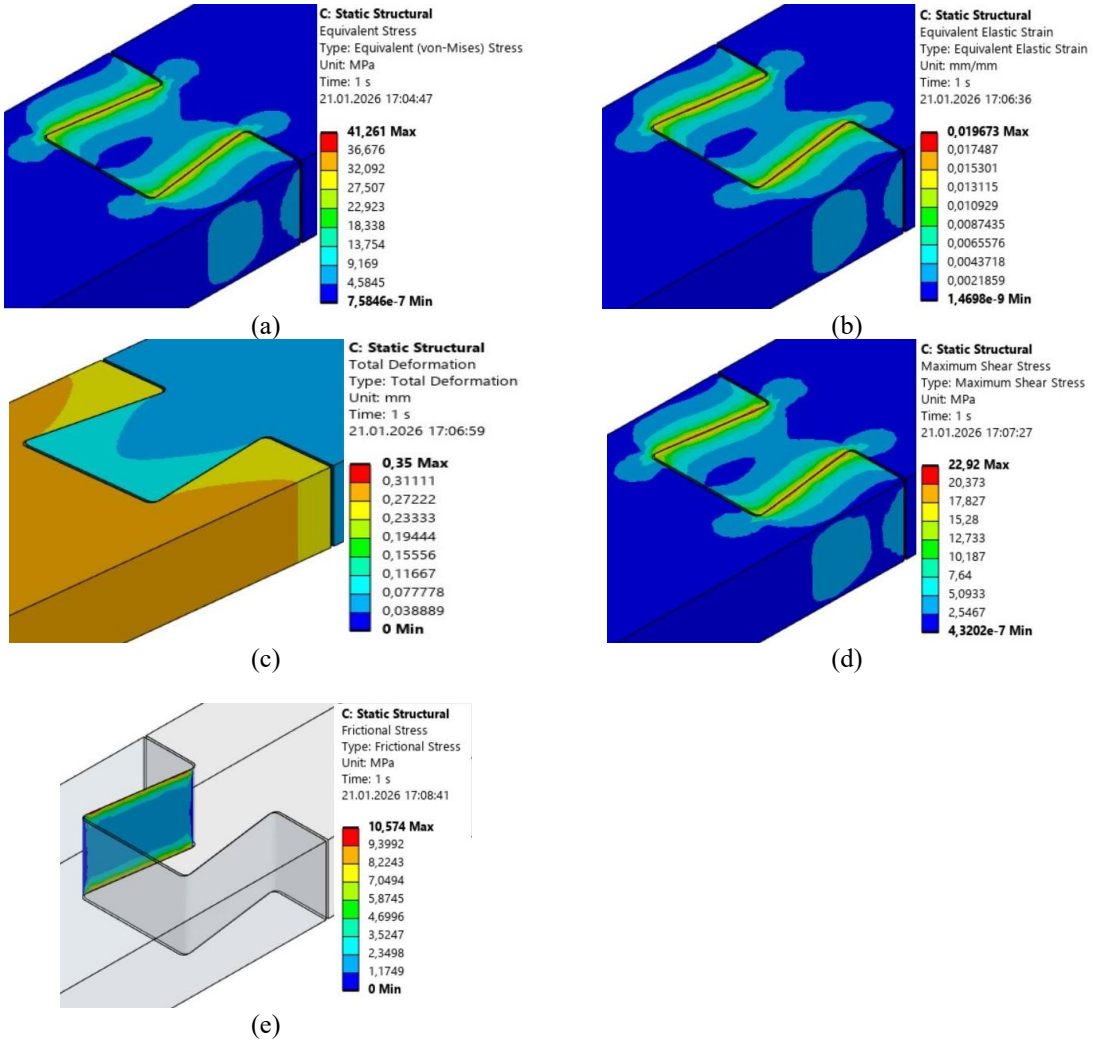
Şekil 4.1 T-bağlantı kenetlenme arayüzüne sahip numunenin çekme testi simülasyonuna ait sonuç çıktıları (a) von-Mises eşdeğer gerilme, (b) eşdeğer elastik birim şekil değiştirme, (c) toplam deformasyon, (d) maksimum kayma gerilmesi, (e) bağlantı noktasındaki sürtünme gerilmesi

T-bağlantı kenetlenme arayüzüne sahip numune için gerçekleştirilen çekme deneyi simülasyonu çıktıları; von-Mises eşdeğer gerilme 13.233 MPa, eşdeğer elastik birim şekil değiştirme oranı 0.0187, toplam deformasyon değeri 0.35 mm, maksimum kayma gerilmesi 20.589 MPa, bağlantı noktasındaki sürtünme gerilmesi ise 13.233 MPa olarak kaydedilmiştir.

4.1.2 Kırlangıç kuyruğu bağlantı Kenetlenme Modeli

Kırlangıç kuyruğu tasarımının yük taşıma ve kilitlenme performansını değerlendirmek amacıyla yürütülen sonlu elemanlar analizlerinde beş temel arayüz çıktısı incelenmiştir.

Bu kapsamda diş yapısındaki gerilme yığılmalarını gösteren eşdeğer gerilme dağılımı, yapının esneme kabiliyetini yansıtan eşdeğer elastik birim şekil değiştirme ve eksenel yük altındaki rijitliği ifade eden toplam deformasyon verileri ele alınmıştır. Ek olarak boyun bölgesindeki olası kesme hasarlarını öngörmek için maksimum kayma gerilmesi ile temas yüzeylerinin yük aktarımına etkisini belirlemek üzere sürtünme gerilmesi hesaplanmıştır. Tasarımın mekanik bütünlüğünü ve güvenilirliğini ortaya koyan bu analiz bulguları sırasıyla Şekil 4.2 üzerinde sunulmuştur.



Şekil 4.2 Kırlangıç kuyruğu bağlantı kenetlenme arayüzüne sahip numunenin çekme testi simülasyonuna ait sonuç çıktıları (a) von-Mises eşdeğer gerilme, (b) eşdeğer elastik birim şekil değiştirme, (c) toplam deformasyon, (d) maksimum kayma gerilmesi, (e) bağlantı noktasındaki sürtünme gerilmesi

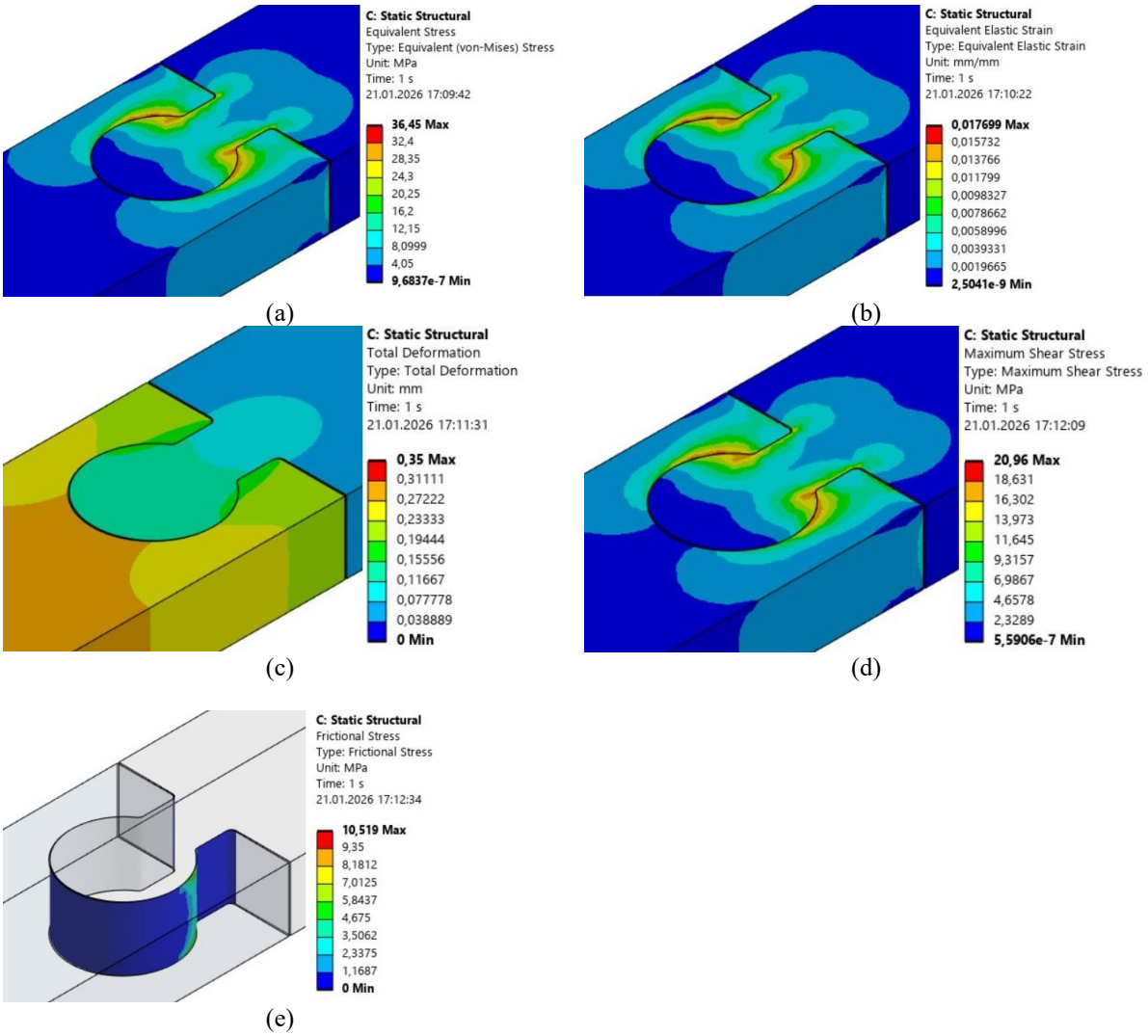
Kırlangıç kuyruğu bağlantı kenetlenme arayüzüne sahip numune için gerçekleştirilen çekme deneyi simülasyonu çıktıları; von-Mises eşdeğer gerilme 41.261 MPa, eşdeğer

elastik birim şekil değiştirme oranı 0.0197, toplam deformasyon değeri 0.35 mm, maksimum kayma gerilmesi 22.92 MPa, bağlantı noktasındaki sürtünme gerilmesi ise 10.574 MPa bulunmuştur.

4.1.3 Dairesel Bağlantı Kenetlenme Modeli

Dairesel kenetlenme modelinin yük aktarımını ve mekanik dayanımını incelemek için yapılan sonlu elemanlar analizlerinde arayüz performansını etkileyen beş temel parametre değerlendirilmiştir. Bu kapsamda; güvenli çalışma sınırları için eşdeğer gerilme dağılımı (a), kalıcı deformasyon öncesi esneme kabiliyeti için eşdeğer elastik birim şekil değiştirme (b) ve çekme yükü altındaki genel uzama ile rijitlik için toplam deformasyon (c) incelenmiştir. Ayrıca, boyun bölgesindeki kesme riskini öngörmek adına maksimum kayma gerilmesi (d) ve temas yüzeylerinin yük taşıma etkinliği için sürtünme gerilmesi (e) analiz edilmiştir. Tasarımın mekanik güvenilirliğini kanıtlayan tüm bu bulgular sırasıyla Şekil 4.3'te sunulmuştur.

Şekil 4.3 üzerinde elde edilen renk konturları detaylı bir biçimde incelendiğinde dairesel formun yük transferini ne ölçüde optimize ettiği açıkça görülmektedir. Özellikle kenetlenme bölgesindeki eğrisel geçişler sayesinde eşdeğer gerilme yığılmalarının keskin köşeli tasarımlara kıyasla çok daha homojen bir şekilde dağıtıldığı ve olası hasar başlangıç noktalarının minimize edildiği anlaşılmaktadır. Eşdeğer elastik birim şekil değiştirme profili arayüzeydeki geometrik uyumun malzemenin yerel esneme kabiliyetini nasıl desteklediğini gösterirken toplam deformasyon verileri yapının eksenel çekme kuvvetleri karşısında sergilediği yüksek rijitliği doğrulamaktadır. Dairesel kilit boynunda yoğunlaşan maksimum kayma gerilmesi değerleri kopma direncini belirleyen ana unsur olarak öne çıkmakta olup temas yüzeyleri boyunca yayılan sürtünme gerilmesi ise kilitlenme mekanizmasının statik yük taşıma etkinliğini kanıtlamaktadır. Tüm bu görsel analiz çıktıları bütüncül bir yaklaşımla değerlendirildiğinde dairesel arayüz tasarımının yapısal bütünlüğü koruma konusundaki başarısı net bir biçimde ortaya konulmakta ve bu durum sistemden elde edilen nicel verilerle doğrudan desteklenmektedir. Bu bağlamda sayısal simülasyonların sunduğu bulgular geometrik iyileştirmelerin malzeme sınırları içindeki güvenli çalışma alanını önemli ölçüde genişlettiğini ispatlamaktadır.



Şekil 4.3 Dairesel bağlantı kenetlenme arayüzüne sahip numunenin çekme testi simülasyonuna ait sonuç çıktıları (a) von-Mises eşdeğer gerilme, (b) eşdeğer elastik birim şekil değiştirme, (c) toplam deformasyon, (d) maksimum kayma gerilmesi, (e) bağlantı noktasındaki sürtünme gerilmesi

Dairesel bağlantı kenetlenme arayüzüne sahip numune için gerçekleştirilen çekme deneyi simülasyonu çıktıları; von-Mises eşdeğer gerilme 36.45 MPa, eşdeğer elastik birim şekil değiştirme oranı 0.0177, toplam deformasyon değeri 0.35 mm, maksimum kayma gerilmesi 20.96 MPa, bağlantı noktasındaki sürtünme gerilmesi ise 10.519 MPa elde edilmiştir.

4.2. Tepki Yüzeyi 2D Analizleri

Tepki yüzeyi tiplerinden biri olan Kriging yöntemi tasarım uzayındaki doğrusal olmayan karmaşık ilişkileri yüksek hassasiyetle modelleme kabiliyeti nedeniyle tüm arayüz

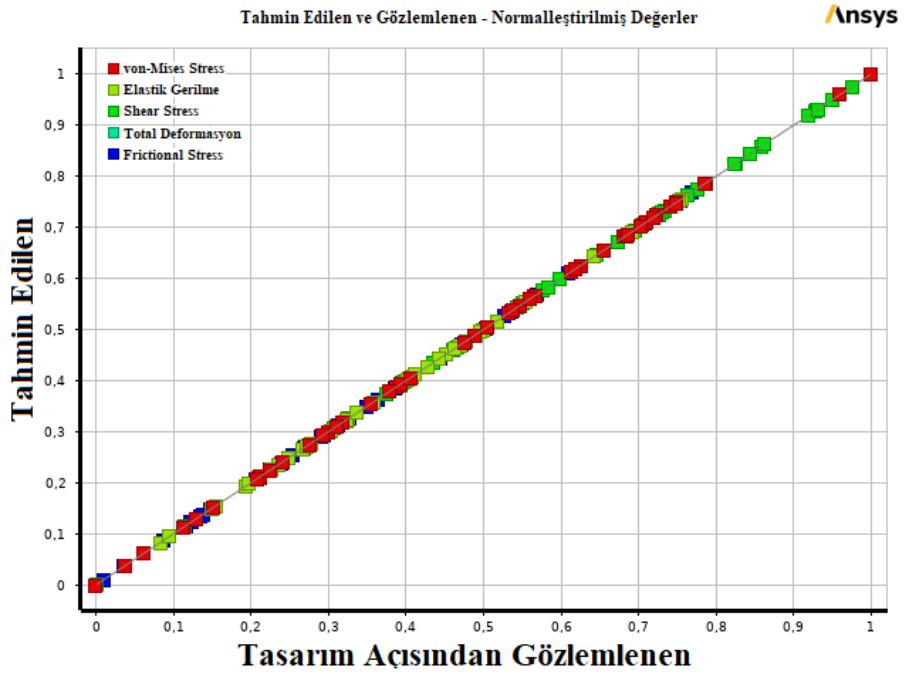
kenetlenme geometrilerinin tipi olarak tercih edilmiştir. Bu yaklaşım veri noktaları arasında hassas bir interpolasyon sağlayarak simülasyon sonuçlarını tam doğrulukla yansıtmakta ve yerel değişimleri başarıyla yakalamaktadır. Tahmin edilen değerlerin doğrudan örnekleme noktaları üzerinden geçmesi sayesinde hata oranlarını minimize ederek bağlantı geometrilerinin mekanik davranışlarını en doğru şekilde analiz etmeye olanak tanımaktadır.

4.2.1 T-Bağlantı Kenetlenme Modeli

Çizelge 3.2'de T-bağlantı kenetlenme modeline ait M1P1, M1P2, M1P3, M1A1, M1A2, FD1 olmak üzere 6 girdi parametresinin Şekil 4.2'de ifade edilen von-Mises eşdeğer gerilme, maksimum kayma gerilmesi, bağlantı noktasındaki sürtünme gerilmesi çıktılarından oluşan 3 değerin tepki yüzeyi metodu kullanılarak detaylandırılmıştır.

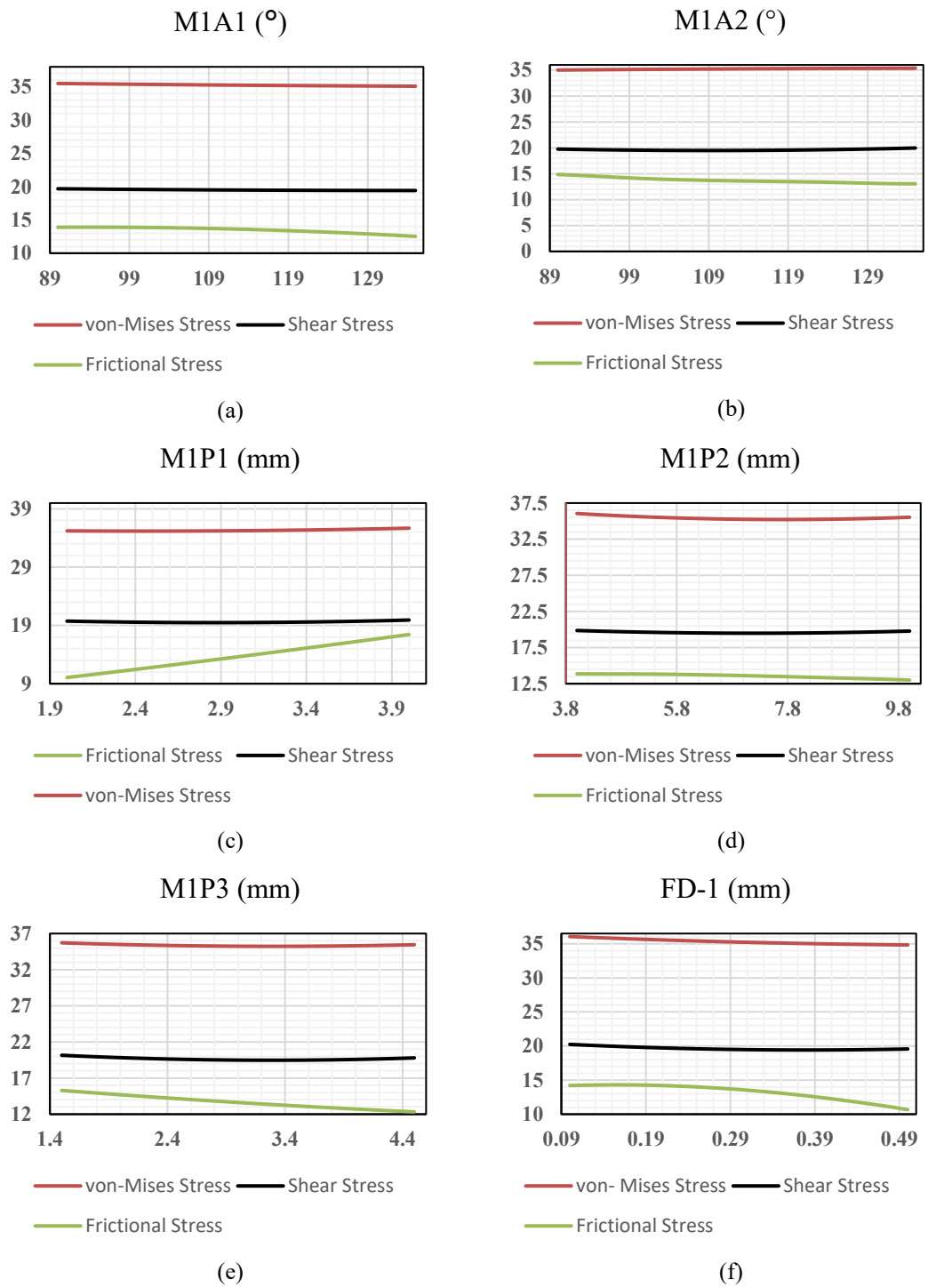
Bu bölümde Oluşturulan yanıt yüzeyi modellerinin, girdi parametreleri ile çıktı sonuçları arasındaki ilişkiyi ne ölçüde doğru temsil ettiğini belirlemek amacıyla uyum iyiliği analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler, elde edilen matematiksel modellerin tahmin yeteneğini ve simülasyon verileriyle olan tutarlılığını istatistiksel olarak doğrulamaktadır.

von-Mises gerilmesi, birim şekil değiştirme ve toplam deformasyon gibi temel çıktılar için tahmin edilen değerler ile gerçek değerlerin doğrusal bir hatta ne kadar yakınsadığını görselleştirerek modelin istatistiksel olarak anlamlılığını ve güvenilirliğini teyit eden Uyum İyiliği grafiği Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Şekil 4.4 üzerinde yer alan saçılım grafikleri detaylı biçimde incelendiğinde tahmin edilen sonuçlar ile sonlu elemanlar simülasyonlarından elde edilen gerçek verilerin birbirine son derece yakınsadığı ve noktaların ideal referans doğrusu etrafında sıkı bir şekilde kümelendiği görülmektedir. İstatistiksel değerlendirmeler sonucunda ulaşılan yüksek belirleme katsayısı değerleri kurulan bu çok terimli matematiksel denklemlerin sistemin karmaşık mekanik davranışını açıklama yeteneğinin oldukça güçlü olduğunu kanıtlamaktadır. Ayrıca gerçekleştirilen varyans analizi bulguları da seçilen altı farklı geometrik girdi parametresinin ve bu parametrelerin birbirleriyle olan eşzamanlı etkileşimlerinin gerilme dağılımları üzerindeki etkilerinin yüksek oranda anlamlı olduğunu doğrulamaktadır.



Şekil 4.4 T-Bağlantı kenetlenme arayüzüne ait uyum iyiliği grafiği

Sayısal modelin doğrulanması ve sisteme ait güvenilirliğin kanıtlanmasını müteakip, bağımsız girdi değişkenlerindeki kısmi değişimlerin yapısal çıktılar üzerindeki bağıl etkilerini sistematik bir biçimde değerlendirmek amacıyla yerel hassasiyet analizi tatbik edilmiştir. Tasarım uzayındaki spesifik bir referans noktası etrafında her bir parametrenin performans metrikleri üzerindeki baskınlık derecesini nicel olarak karakterize eden bu analitik yaklaşım, aynı zamanda imalat kısıtları ve mühendislik toleranslandırması bağlamında kritik bir rehber niteliği taşımaktadır. Bu değerlendirme; yüksek hassasiyet indeksine sahip parametrelerin imalat fazında oldukça dar tolerans bantlarında sıkı bir denetimle kontrol edilmesi gerekliliğini ortaya koyarken, düşük hassasiyetli değişkenlerin ise üretim maliyetlerini asgari seviyeye indirmek maksadıyla daha geniş tolerans limitleri dâhilinde değerlendirilebileceğini rasyonel ve bilimsel bir çerçeveye oturtmaktadır. Elde edilen bu duyarlılık hiyerarşisi, tasarımın mekanik sınırlarını optimize ederken üretim sapmalarından kaynaklanabilecek potansiyel hasar risklerinin de proaktif bir yaklaşımla bertaraf edilmesine imkân sağlamaktadır. Uygulanan bu inceleme neticesinde, T-bağlantı konfigürasyonunun genel mekanik bütünlüğünü ve operasyonel güvenilirliğini en üst düzeyde etkileyen kritik tasarım değişkenleri net bir biçimde tanımlanmış olup, söz konusu girdi-çıktı ilişkilerini ve parametrik etki derecelerini görselleştiren bulgular Şekil 4.5'te sunulmaktadır.



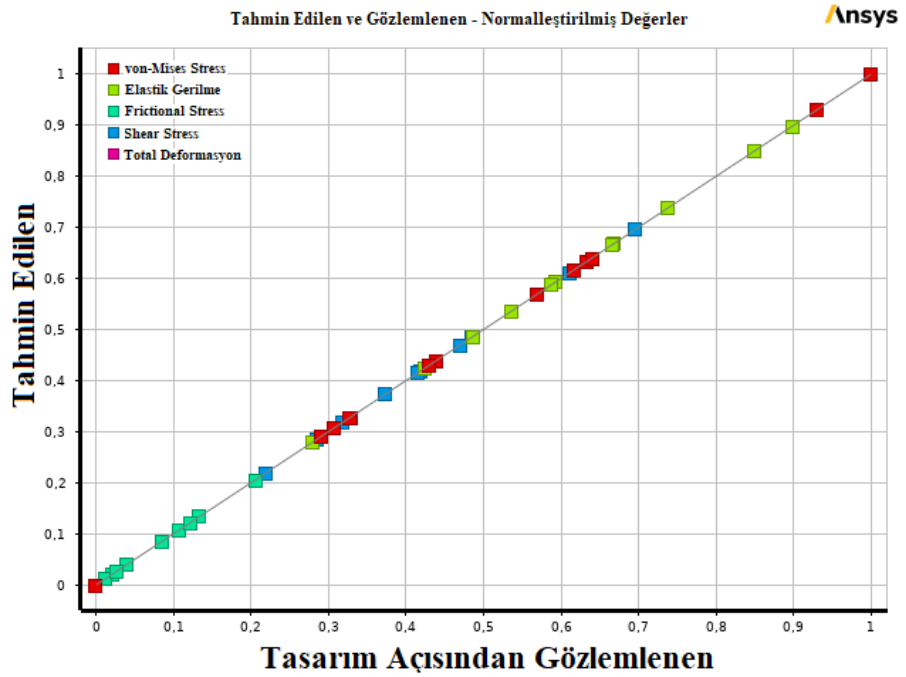
Şekil 4.5 T-bağlantı kenetlenme arayüzüne ait girdi parametrelerinin çıktı parametreleri üzerine etkisini gösteren yerel hassasiyet grafikleri

T-bağlantı kenetlenme arayüzüne ait girdi parametrelerinin çıktı parametreleri üzerindeki etkisini gösteren yerel hassasiyet grafikleri incelendiğinde, (a) M1A1 parametresindeki artışın von-Mises ve kayma gerilmelerini büyük oranda sabit tuttuğu, ancak sürtünme gerilmesinde sınırlı bir azalmaya yol açtığı görülmektedir. Benzer bir eğilim (b) M1A2

parametresinde de gözlenmekte olup, bu değerin artmasıyla birlikte von-Mises ve kayma gerilmeleri yatay bir seyir izlerken sürtünme gerilmesinin belirgin bir düşüş sergilediği saptanmıştır. Tasarım parametreleri arasında en hassas değişimlerden biri (c) M1P1 parametresinde ortaya çıkmış; bu değerin artışı ile sürtünme gerilmesinin doğrusal ve keskin bir yükseliş gösterdiği, von-Mises gerilmesinin ise bu değişime çok hafif bir artışla tepki verdiği tespit edilmiştir. (d) M1P2 parametresindeki artışın von-Mises gerilmesinde başlangıçta hafif bir düşüşe neden olduğu, kayma gerilmesini etkilemediği ve sürtünme gerilmesini ise çok kısıtlı bir miktarda azalttığı anlaşılmaktadır. (e) M1P3 parametresinin artırılması durumunda von-Mises ve kayma gerilmeleri değişim göstermezken, sürtünme gerilmesinin düzenli ve sürekli bir azalma eğilimine girdiği gözlemlenmiştir. Son olarak (f) FD1 parametresi incelendiğinde, bu değerdeki artışın tüm gerilme bileşenlerini aşağı yönlü etkilediği, özellikle sürtünme gerilmesinin en hassas negatif tepkiyi bu parametreye karşı verdiği ve değerlerin belirgin şekilde azaldığı saptanmıştır.

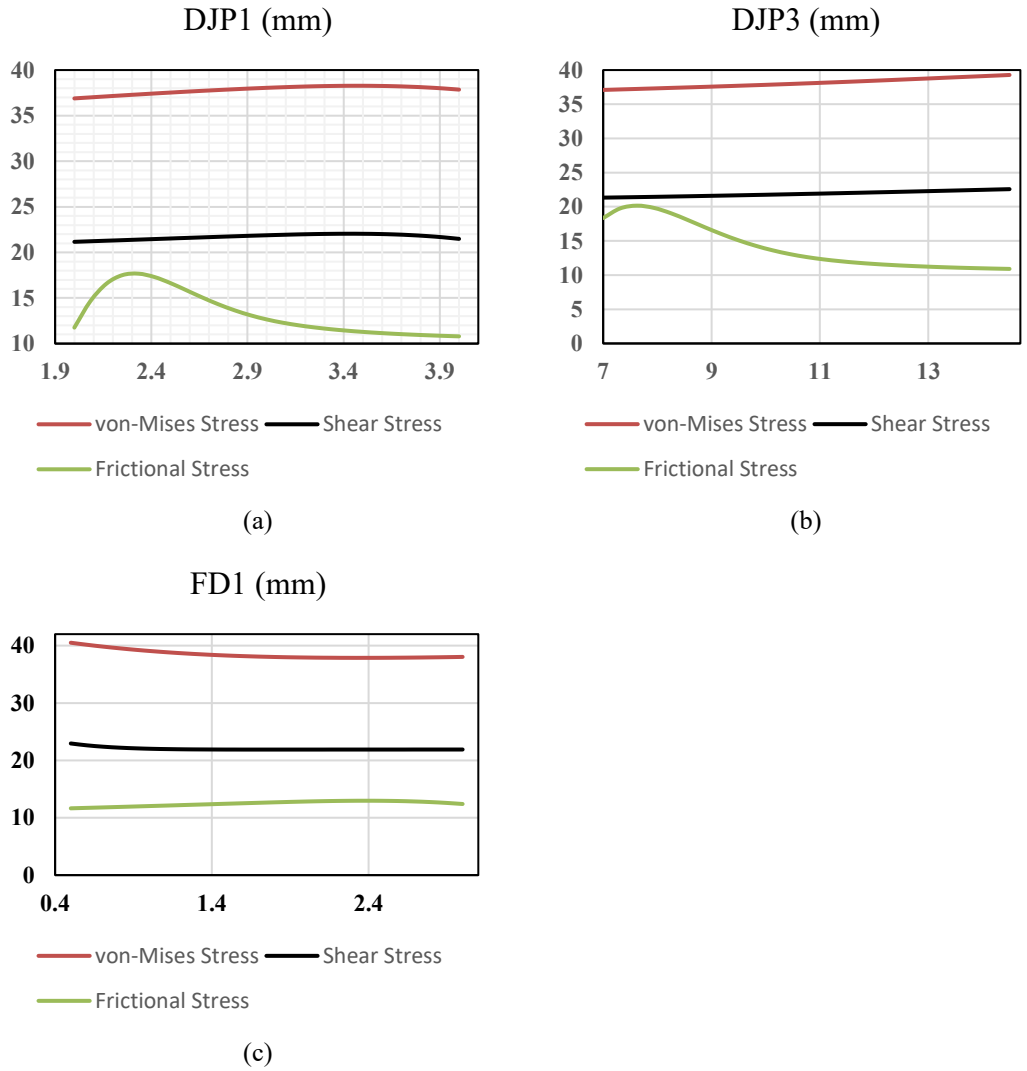
4.2.2 Kırlangıç kuyruğu Bağlantı Kenetlenme Modeli

Kırlangıç kuyruğu bağlantı kenetlenme modeline ait DJP1, DJP3 ve FD1 girdi parametrelerinin von-Mises eşdeğer gerilme, maksimum kayma gerilmesi ve bağlantı noktasındaki sürtünme gerilmesi çıktıları üzerindeki etkileri TYM kullanılarak detaylandırılmıştır. Bu bölümde oluşturulan TYM ile ilgili girdi parametreleri ile çıktı sonuçları arasındaki ilişkiyi ne ölçüde doğru temsil ettiğini belirlemek amacıyla Uyum İyiliği analizleri gerçekleştirilmiştir. Söz konusu analizler, elde edilen matematiksel modellerin tahmin yeteneğini ve simülasyon verileriyle olan tutarlılığını istatistiksel olarak doğrulamaktadır. Özellikle, tahmin edilen ve gözlemlenen değerler arasındaki yüksek korelasyon, tasarım uzayındaki karmaşık doğrusal olmayan ilişkilerin yüksek bir doğruluk payıyla yakalandığını kanıtlamaktadır. Uyum iyiliği grafiği Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Bu grafikler aracılığıyla modelin simülasyon verilerini temsil etme başarısı doğrulanmış olup, ilerleyen aşamalarda gerçekleştirilecek olan optimizasyon çalışmaları için istatistiksel varyansların minimize edildiği, güvenilirliği yüksek ve hassas bir veri tabanı oluşturulmuştur. Böylece, optimum bağlantı geometrisine ulaşmak için yürütülecek ardışık çözümleme süreçlerinin verimliliği ve isabet oranı önemli ölçüde artırılmıştır.



Şekil 4.6 Kırlangıç kuyruğu bağlantı kenetlenme arayüzüne ait uyum iyiliği grafiği

Modelin geçerliliği uyum iyiliği grafiği üzerinden teyit edildikten sonra girdi parametrelerinin çıktı parametreleri üzerindeki bağıl etkilerini belirlemek amacıyla yerel hassasiyet analizi uygulanmıştır. Bu analiz tasarım uzayındaki belirli bir çalışma noktasında hangi parametrelerin yapısal performans üzerinde daha baskın olduğunu nicel olarak göstermektedir. Üretim sınırları açısından kritik öneme sahip olan bu değerlendirme hassasiyeti yüksek bulunan parametrelerin imalat aşamasında daha dar toleranslarla kontrol edilmesi gerektiğini, hassasiyeti düşük parametrelerin ise üretim maliyetlerini düşürmek adına daha esnek tutulabileceğini bilimsel bir temele oturtmaktadır. Böylece Kırlangıç kuyruğu bağlantısının mekanik güvenilirliğini en çok etkileyen kritik tasarım değişkenleri tespit edilmiştir. Söz konusu değişkenlerin doğru bir şekilde karakterize edilmesi, sistemin genel çalışma ömrü boyunca maruz kalacağı yapısal riskleri asgari düzeye indirmektedir. Ek olarak bu bulgular, tasarım optimizasyonu süreçlerine somut veriler sağlayarak daha dayanıklı ve sürdürülebilir mühendislik çözümlerinin geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Hassasiyet analizinden elde edilen bu spesifik metrikler, yalnızca mevcut geometrinin değerlendirilmesinde değil, aynı zamanda potansiyel konfigürasyon değişikliklerinin yapısal bütünlük ve hata toleransı üzerindeki etkilerinin önceden kestirilmesinde de stratejik bir referans oluşturmaktadır. Bu bağlamda elde edilen grafikler Şekil 4.7 üzerinde verilmiştir.



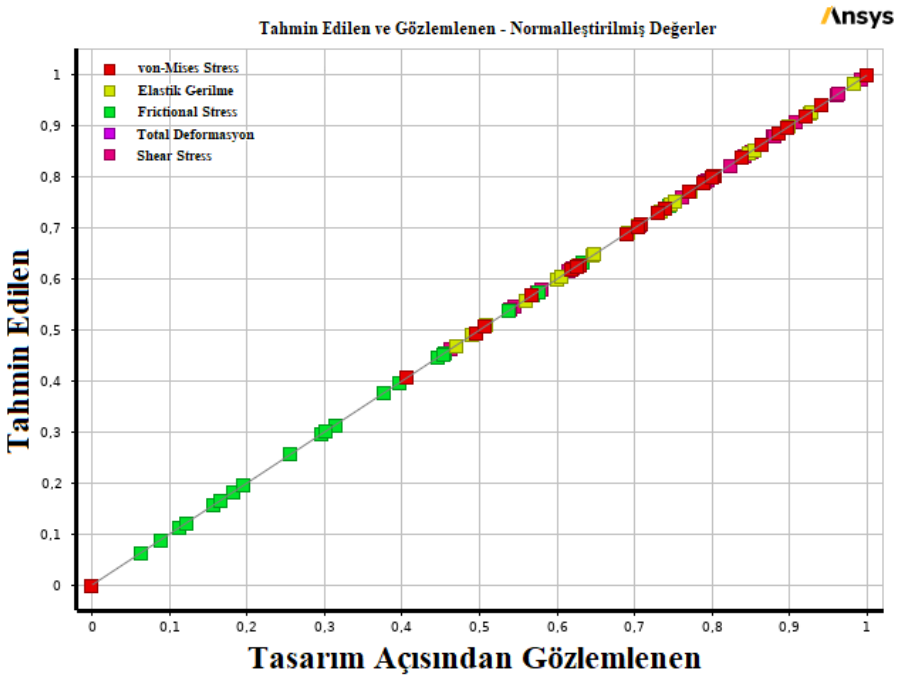
Şekil 4.7 Kırlangıç kuyruğu bağlantı kenetlenme arayüzüne ait girdi parametrelerinin çıktı parametreleri üzerine etkisini gösteren yerel hassasiyet grafikleri

Kırlangıç kuyruğu bağlantı kenetlenme arayüzüne ait girdi parametrelerinin çıktı parametreleri üzerindeki etkisini gösteren yerel hassasiyet grafikleri incelendiğinde, (a) DJP1 parametresindeki artışın von-Mises gerilmesinde başlangıçta sınırlı bir yükselişe neden olduğu ve sonrasında kararlı bir seyir izlediği görülmektedir. Aynı parametre değişiminde kayma gerilmesi büyük oranda sabit kalırken, sürtünme gerilmesinin belirli bir değerde tepe noktasına ulaştıktan sonra azalma eğilimine girdiği tespit edilmiştir. (b) DJP3 parametresi ele alındığında, bu değerin artmasıyla birlikte von-Mises ve kayma gerilmelerinde düşük oranlı fakat sürekli bir artış gözlenirken, sürtünme gerilmesinin ise tam tersi bir davranış sergileyerek başlangıçtaki yükselişin ardından kademeli olarak aşağı indiği anlaşılmaktadır. Son olarak (c) FD1 parametresindeki değişimler

incelendiğinde, bu değerin artışıyla beraber von-Mises ve kayma gerilmelerinin hafif bir azalma sergilediği, sürtünme gerilmesinin ise oldukça düşük bir hassasiyetle çok sınırlı bir yükselişin ardından stabil bir konuma ulaştığı saptanmıştır.

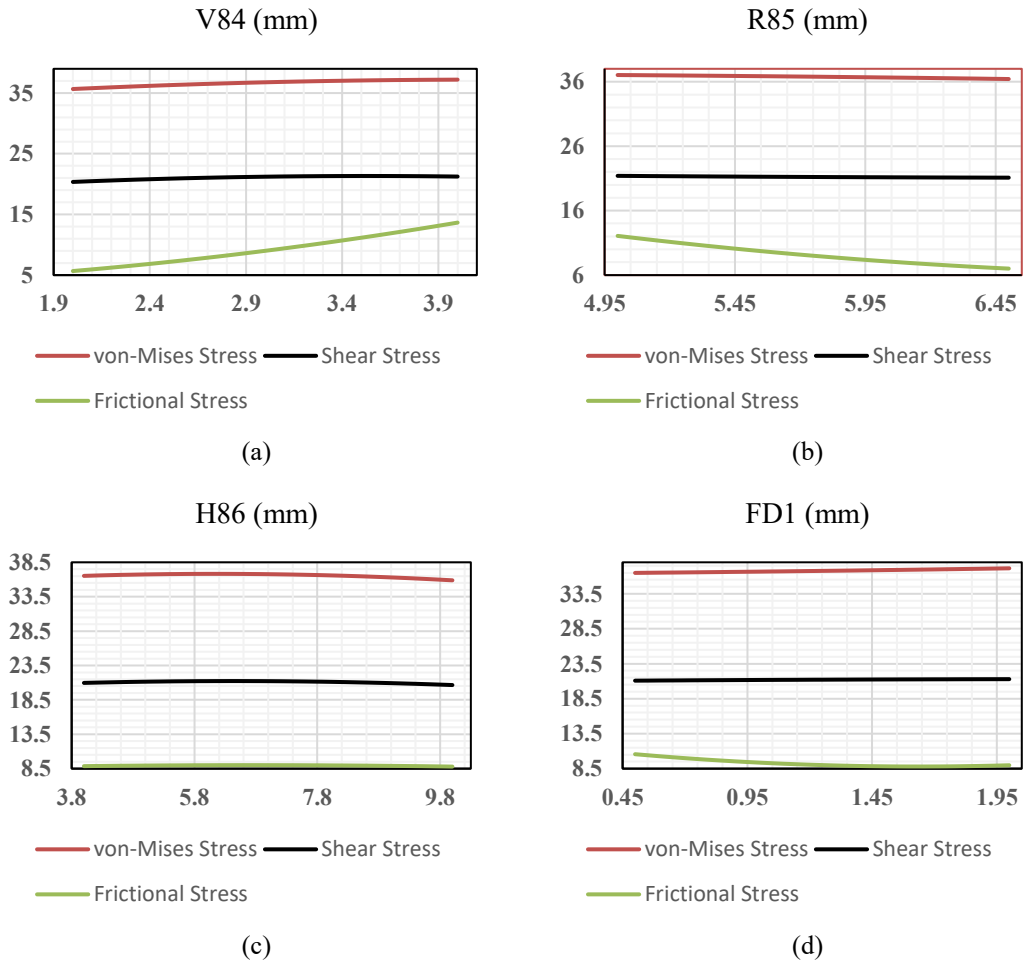
4.2.3 Dairesel Bağlantı Kenetlenme Modeli

Dairesel Bağlantı kenetlenme modeline ait V84, R85, H86 ve FD1 olarak isimlendirilen dört temel girdi parametresinin; von-Mises eşdeğer gerilmesi, maksimum kayma gerilmesi ve bağlantı arayüzündeki sürtünme gerilmesi gibi kritik performans çıktıları üzerindeki etkileri tepki yüzeyi yöntemi aracılığıyla kapsamlı bir biçimde tetkik edilmiştir. Bu aşamada geliştirilen sayısal modellerin, geometrik değişkenler ile çıktılar arasındaki ilişkiyi temsil etme kapasitesini ölçmek amacıyla uyum iyiliği grafiği Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Söz konusu istatistiksel değerlendirmeler, elde edilen matematiksel modellerin yeteneğini ve simülasyon verileriyle sergilediği tutarlılığı bilimsel bir çerçevede doğrulamaktadır. Özellikle gerilme dağılımları ve deformasyon miktarları gibi temel çıktılar için tahmin edilen değerlerin gerçek verilerle olan doğrusal yakınsamasını görselleştirerek sistemin güvenilirliğini teyit eden analiz sonuçları, modelin istatistiksel açıdan anlamlı olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 4.8 Dairesel bağlantı kenetlenme arayüzüne ait uyum iyiliği grafiği

Dairesel bağlantı yapısının geçerliliği uyum iyiliği grafiği vasıtasıyla doğrulandıktan sonra, V84, R85, H86 ve FD1 olarak tanımlanan girdi parametrelerinin çıktı verileri üzerindeki göreceli etkilerini saptamak amacıyla yerel hassasiyet analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu değerlendirme, belirlenen tasarım uzayındaki spesifik çalışma noktalarında hangi parametrelerin mekanik performans üzerinde daha baskın olduğunu sayısal verilerle ortaya koymaktadır. İmalat süreçleri bakımından stratejik bir öneme sahip olan bu analiz, hassasiyeti yüksek bulunan değişkenlerin üretim safhasında daha dar toleranslar dahilinde kontrol edilmesi gerektiğini, duyarlılığı düşük olan parametrelerin ise üretim maliyetlerini optimize etmek adına daha esnek sınırlar içerisinde tutulabileceğini bilimsel bir temele oturtmaktadır. Bu sayede Dairesel bağlantı kenetlenme mekanizmasının yapısal güvenilirliğini en çok etkileyen kritik tasarım değişkenleri tespit edilmiştir. Söz konusu analizler neticesinde elde edilen yerel hassasiyet grafikleri Şekil 4.9 üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.9 Dairesel bağlantı kenetlenme arayüzüne ait girdi parametrelerinin çıktı parametreleri üzerine etkisini gösteren yerel hassasiyet grafikleri

Dairesel Bağlantı kenetlenme arayüzüne ait yerel hassasiyet grafikleri incelendiğinde, (a) V84 parametresinin artmasıyla beraber von-Mises ve kayma gerilmelerinin yukarı yönlü bir ivme kazandığı, sürtünme gerilmesinin ise bu değişime en yüksek duyarlılığı göstererek doğrusal bir yükseliş sergilediği görülmektedir. Buna karşın (b) R85 parametresindeki artışın von-Mises ve kayma gerilmelerinde hafif bir azalışa yol açtığı, sürtünme gerilmesinin ise bu parametreye bağlı olarak belirgin şekilde sönümlendiği saptanmıştır. (c) H86 parametresi incelendiğinde, söz konusu değişkenin artırılmasının gerilme bileşenleri üzerinde baskın bir etki oluşturmadığı ve tüm çıktıların yüksek bir stabilite sergilediği anlaşılmaktadır. Son olarak (d) FD1 parametresi ele alındığında, bu değerdeki yükselişin von-Mises gerilmesinde çok kısıtlı bir artışa sebebiyet verdiği, kayma gerilmesini etkilemediği ve sürtünme gerilmesinin ise başlangıçtaki hafif gerilemenin ardından sabit bir seyir izlediği tespit edilmiştir.

4.3. Tepki Yüzeyi 3B Analizleri

Bu çalışmada, yapısal güvenliğin maksimize edilmesi ve malzemenin güvenli çalışma sınırları içerisinde kalması amacıyla temel optimizasyon hedefi, von-Mises gerilmesinin minimize edilmesi olarak belirlenmiştir. ANSYS RSO modülü Amaçlar ve Kısıtlamalar bölümünde tanımlanan bu kritik hedef doğrultusunda; sistem performansına etki eden parametrelerin hiyerarşisini ortaya koymak ve 3B analizlerde hangi ana değişkenin merkezde olacağını saptamak üzere öncelikle hassasiyet analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler, optimizasyon sürecinin odak noktası olan von-Mises gerilmesi üzerinde en baskın etkiye sahip parametrenin belirlenmesini sağlamıştır. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, her bir kenetlenme modeli için en etkin parametre saptanmış ve gerilme minimizasyonu hedefini görselleştirmek adına oluşturulan 3B yanıt yüzey grafiklerinde bu parametre ortak eksen olarak seçilmiştir.

4.3.1 T-bağlantı Kenetlenme Modeli

T-Bağlantı kenetlenme arayüzü için yürütülen çalışmalarda, ANSYS optimizasyon modülündeki hassasiyet verileri, tasarım parametrelerinin sistem çıktılarını ne derecede etkilediğini anlamamızı sağlar. Bu sonuçlar, tasarım sürecinde hangi değişkenlerin performansı belirlemede öncelikli olduğunu, hangilerinin ise daha düşük etkiye sahip

olduğunu net bir şekilde gösterir. Böylece, iyileştirme sürecinde hangi parametrelere odaklanılması gerektiği konusunda somut bir yol haritası elde edilir. Parametreler ile çıktılar arasındaki ilişkinin yönünü ve gücünü ortaya koyan bu veriler, arayüzün yapısal kararlılığını artırmak ve en verimli tasarım noktasına ulaşmak için temel bir dayanak oluşturur. Bu sayede, çok değişkenli tasarım uzayında binlerce farklı kombinasyon arasından fiziksel olarak en mukavim olanı seçen algoritmanın matematiksel mantığı şeffaf bir şekilde kavranmış olur. T-bağlantı kenetlenme arayüzüne ait optimizasyon hassasiyet grafiği Şekil 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.10 T-bağlantı hassasiyet grafiği

von-Mises stress analizleri sonucunda, M1A2, M1P1 ve M1P3 parametrelerinin artışıyla gerilme değerlerinde bir yükselme yaşandığı görülmektedir. Bu durum, ilgili geometrik faktörlerin büyümesinin arayüzdeki yük aktarım yolunu daralttığına veya yapısal rijitliği bölgesel olarak artırarak istenmeyen gerilme yığılmalarına zemin hazırladığına işaret etmektedir. Bu parametreler arasında M1A2, gerilme değerlerini artırıcı yönde en baskın etkiye sahipken, M1A1 ve FD1 parametrelerinin artması gerilme değerlerini azaltıcı bir rol oynamaktadır. Tüm bu değişkenler arasında M1A1 parametresi, negatif yönlü en yüksek hassasiyete sahip olup değerindeki artış von-Mises gerilmelerinin belirgin şekilde

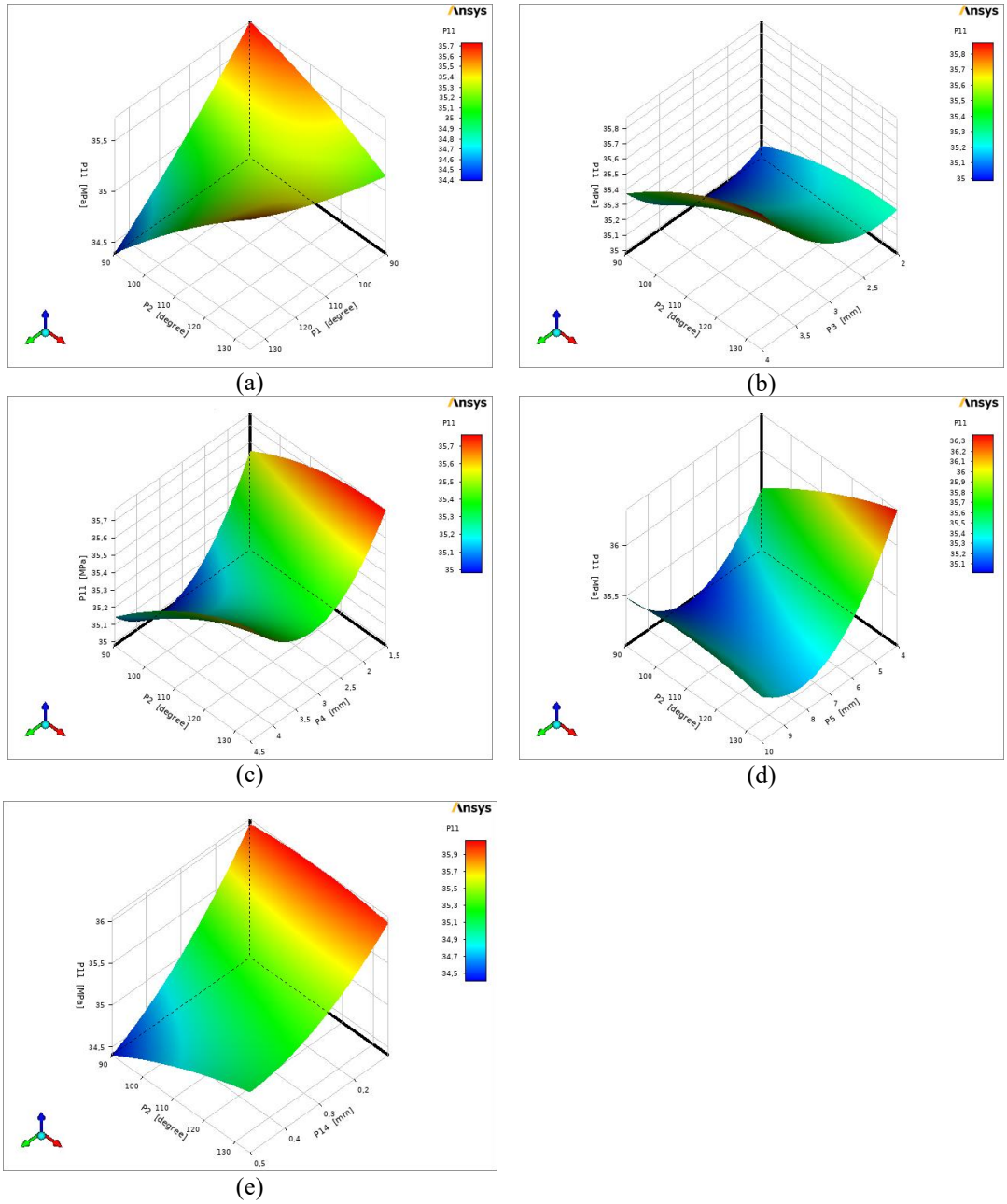
düşmesini sağlamaktadır. M1A1 parametresinin bu güçlü sönümleyici etkisi, arayüzdeki geometrik geçişleri optimize ederek çentik etkisini minimize ettiği ve sistem üzerindeki iç kuvvetleri daha geniş bir alana homojen şekilde dağıttığı gerçeğiyle mekanik olarak açıklanabilir.

Shear stress değerleri incelendiğinde, M1P2 parametresinin artışıyla birlikte gerilmenin pozitif bir hassasiyete sahip olduğu ve artış gösterdiği saptanmıştır. M1A1, M1A2, M1P1 ve FD1 değişkenlerinin kayma gerilmesi üzerindeki tesiri negatif yönde olup gerilmeyi azaltmaktadır. Kayma gerilmelerindeki bu azalış eğilimi, söz konusu parametrelerin büyümesiyle birbiri üzerinde kaymaya çalışan polimer temas yüzeylerindeki kilitlenme direncinin ve makaslama yüklerini taşıyan efektif kesit alanının arttığını kanıtlamaktadır. M1P3 parametresi ise kayma gerilmesi üzerinde en kuvvetli negatif hassasiyete sahip olduğundan, bu değerin artırılması sistemdeki kayma yüklerini çok etkili bir şekilde azaltmaktadır. Bu belirgin düşüş, M1P3 parametresinin iki malzeme arasındaki makro-mekanik tutunma mekanizmasını maksimize ederek yatay kuvvetleri yapı boyunca en iyi absorbe eden değişken olduğunu ortaya koymaktadır.

Frictional stress açısından yapılan değerlendirmede, M1P1 dışındaki neredeyse tüm tasarım parametrelerinin sürtünme değerleri üzerinde negatif bir hassasiyete sahip olduğu tespit edilmiştir. M1P1 parametresi bu grupta pozitif etki göstererek sürtünme gerilmelerini yükseltirken, bu özgün davranışın temas yüzeylerindeki normal kuvveti veya yerel sıkışma miktarını artırarak arayüzdeki temas basıncını lokal olarak yükseltmesinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir. M1P3 değişkeni gerilme düşüşünde en önemli paya sahiptir. M1A1, M1A2, M1P2 ve FD1 değişkenlerindeki yükselme ise sürtünme gerilmelerini M1P3 parametresine kıyasla daha sınırlı bir oranda azaltmaktadır. Sonuç olarak, parametrelerin büyük çoğunluğunun sürtünme gerilmesini düşürücü yönde çalışması; sistemin arayüz bölgesindeki aşırı yüzey basınçlarını ve sürtünme kaynaklı mikro-kaymaları engelleyerek bağlantının yapısal bütünlüğünü uzun vadede koruma altına aldığını göstermektedir.

T-bağlantı kenetlenme modelinin yapısal davranışını analiz etmek amacıyla, en etken tasarım değişkeni olan M1A2 parametresi odağında von-Mises eşdeğer gerilme

değerlerini esas alan üç boyutlu tepki yüzeyi grafikleri oluşturulmuştur. Bu görselleştirmeler, parametreler arası karmaşık etkileşimlerin ve sistem hassasiyetlerinin net bir şekilde tanımlanmasını sağlayarak tasarımın optimizasyon potansiyelini ortaya koymaktadır. T-bağlantı kenetlenme modeline ait 3B grafikler Şekil 4.11'de gösterilmiştir.



(a) (b) (c) (d) (e)

Şekil 4.11 T-bağlantı kenetlenme arayüzüne ait girdi parametrelerinin çıktı parametresi üzerine etkisini gösteren 3B grafikleri

Şekil 4.11 T-bağlantı kenetlenme arayüzüne ait çeşitli girdi parametrelerinin, çıktı parametresi konumundaki P11 (von-Mises Gerilmesi, z-ekseni) üzerindeki etkileşimlerini sergileyen üç boyutlu grafikler sunulmaktadır. Gerçekleştirilen tüm analizlerde x-ekseni referans olarak P2 (M1A2) parametresini temsil etmekte olup, y-ekseninde yer alan değişkenler sırasıyla; (a) alt grafiğinde P1 (M1A1), (b) alt grafiğinde P3 (M1P1), (c) alt grafiğinde P4 (M1P3), (d) alt grafiğinde P5 (M1P2) ve son olarak (e) alt grafiğinde ise P14 (FD1) parametrelerinin von-Mises gerilmesi üzerindeki etkilerini yansıtacak şekilde düzenlenmiştir.

Şekil 4.11 (a) M1A2 ve M1A1 parametrelerinin von-Mises gerilmesi üzerindeki etkileşimi incelendiğinde, tasarım uzayında her iki değişkenin artışına paralel lineer bir yükselme eğilimi olduğu görülmektedir. Özellikle açısal değerlerin eş zamanlı artışı, sistem üzerinde kümülatif bir zorlanma yaratarak gerilme değerlerini tepe noktasına taşımaktadır. Bu durum, geometrik açıların büyümesinin yapısal dayanım üzerinde doğrudan ve belirleyici bir etkiye sahip olduğunu, en düşük gerilme bölgelerinin ise her iki parametrenin minimum değerlerinde kümelendiğini göstermektedir.

Şekil 4.11 (b) M1A2 ve M1P1 parametreleri arasındaki ilişki analiz edildiğinde, yüzey formunda diğer grafiklere kıyasla daha ılımlı ve yatay bir geçiş gözlemlenmektedir. M1A2 parametresi gerilme artışında baskın karakterini korurken, M1P1 değişkeninin etkisi daha sınırlı kalmaktadır. Grafik üzerindeki bu davranış, M1P1 parametresinin belirli aralıklarda sistem performansını radikal şekilde değiştirmeden, ince ayar ve optimizasyon amacıyla kullanılabileceğine işaret etmektedir.

Şekil 4.11 (c) M1A2 ve M1P3 değişkenlerinin etkileşimi değerlendirildiğinde, M1A2'nin yüksek değerlerinde M1P3 artışının gerilmeyi tetiklediği saptanmıştır. Tasarım uzayında oluşan eğim, bu iki parametre arasında pozitif yönlü bir korelasyon olduğunu ortaya koymaktadır. Yapısal bütünlüğün korunması adına, özellikle M1A2'nin üst seviyelerinde M1P3 değerinin sınırlandırılması gerektiği, aksi takdirde gerilme yoğunlaşmalarının kritik eşikleri aşabileceği anlaşılmaktadır. Dolayısıyla, bu iki parametrenin eşzamanlı optimizasyonu, bölgesel hasar (hata) risklerini minimize etmek ve sistemin operasyonel ömrünü güvence altına almak bakımından elzemdir.

Şekil 4.11 (d) M1A2 ve M1P2 parametrelerinin kombinasyonu incelendiğinde, M1A2'ye bağlı belirgin gerilme artışının M1P2 ile desteklendiği homojen bir yüzey formu oluşmuştur. M1P2 parametresindeki değişimler, gerilme üzerinde ani dalgalanmalardan ziyade öngörülebilir bir artışa neden olmaktadır. Bu sinerjik ilişki, optimum tasarım bölgesinin, her iki değişkenin de düşük ve orta seviyelerinde aranması gerektiğini kanıtlamaktadır.

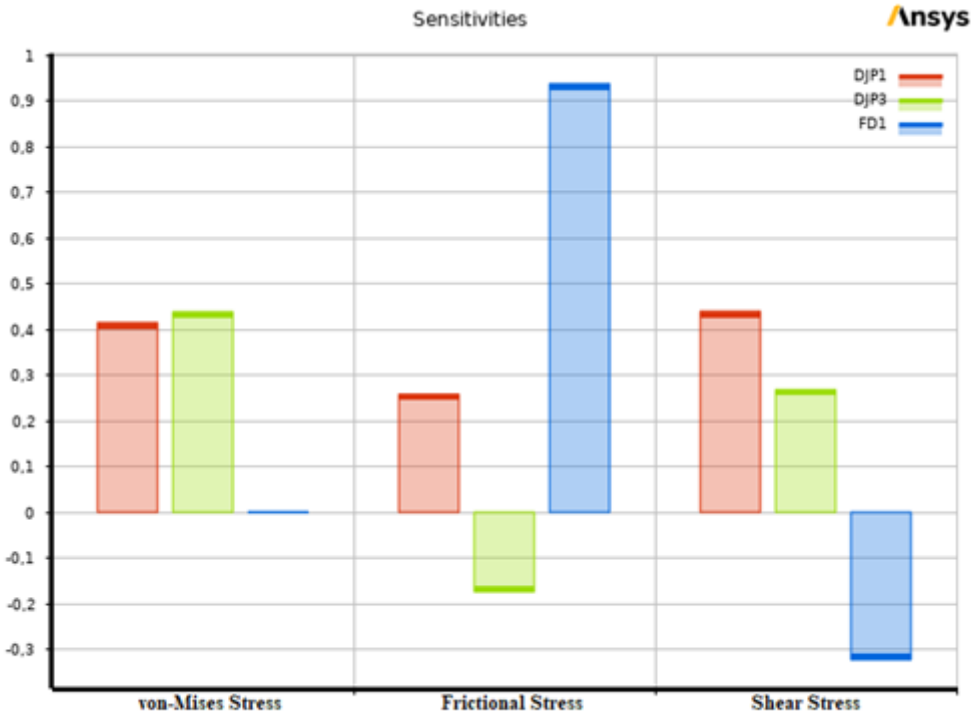
Şekil 4.11 (e) M1A2 ve FD1 parametreleri ele alındığında, sistem hassasiyetinin en yüksek olduğu tablolardan biri ortaya çıkmaktadır. FD1 (kuvvet/sürtünme) değerindeki artış, M1A2'nin geometrik etkisiyle birleşerek gerilme değerlerinde şiddetli bir yükselme kaydetmiştir. Bu iki değişken arasındaki güçlü etkileşim, arayüz dayanımının korunması için bu parametrelerin eş zamanlı olarak kontrol altında tutulması gerektiğini ve yüksek FD1 değerlerinin, ancak düşük M1A2 açılarıyla tolere edilebileceğini göstermektedir.

4.3.2 Kırlangıç kuyruğu Bağlantı Kenetlenme Modeli

Sistem performansını etkileyen parametrelerin hiyerarşisini belirlemek ve 3B analizlerde hangi ana değişkenin merkezde olacağını saptamak amacıyla öncelikle hassasiyet analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler, özellikle von-Mises gerilmesi üzerinde en baskın etkiye sahip parametreyi belirlememizi sağlamıştır. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, DJP3 parametresinin çıktı değerleri üzerindeki en etken değişken olduğu saptanmış ve 3B yanıt yüzey grafiklerinde bu parametre ortak eksen olarak seçilmiştir. Kırlangıç kuyruğu formunun geometrik doğası gereği arayüzdeki yük transferi doğrudan kenetlenme açıları ve kilitlenme derinliği üzerinden gerçekleştiği için, DJP3 gibi baskın parametrelerin optimizasyonu sistemin genel yorulma, kayma ve kopma direncini tayin etmede kritik bir öneme sahiptir.

Tasarım sürecinde kullanılan değişkenlerin Kırlangıç kuyruğu bağlantı modelinin çıktıları üzerindeki mutlak etkilerini belirlemek amacıyla hassasiyet analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analiz, iyileştirme çalışmalarında öncelik verilmesi gereken değişkenleri saptayarak, tasarımın mekanik sınırlarını ve hassasiyet bölgelerini bilimsel bir temele oturtmaktadır. Bu sistematik yaklaşım sayesinde, rastgele deneme-yanılma

iterasyonları yerine, arayüzdeki yapısal zayıflıkları tetikleyen veya sönümleyen geometrik faktörlerin matematiksel ağırlıkları ve mekanik sonuçları şeffaf bir biçimde ortaya konulmaktadır. Kırlangıç kuyruğu bağlantı kenetlenme arayüzüne ait optimizasyon hassasiyet grafiği Şekil 4.12'de verilmiştir.



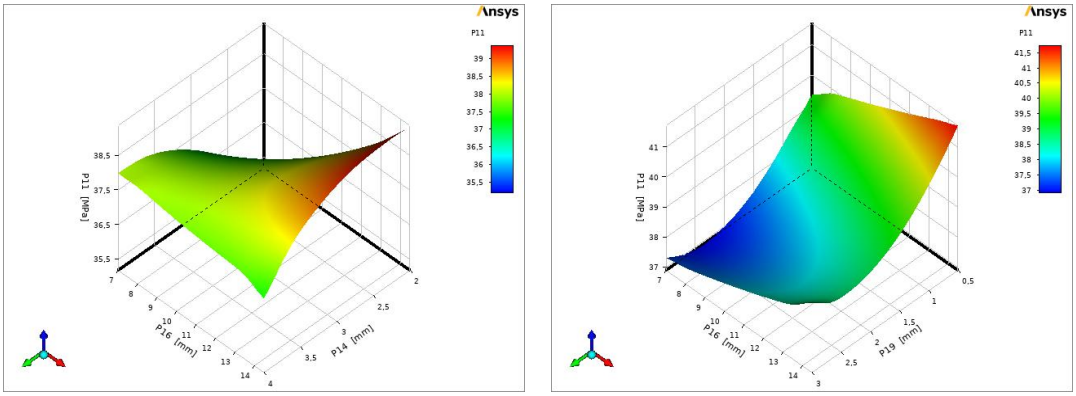
Şekil 4.12 Kırlangıç kuyruğu bağlantı hassasiyet grafiği

von-Mises stress analizleri sonucunda, DJP1 ve DJP3 parametrelerinin artışıyla gerilme değerlerinde bir yükselme yaşandığı görülmektedir. Her iki parametre de pozitif hassasiyete sahip olmakla birlikte, DJP3 değişkeni gerilme artışında DJP1 parametresine kıyasla daha baskın bir rol oynamaktadır. Bu kuvvetli pozitif korelasyon, DJP3 değerinin büyümesiyle birlikte kilitlenme bölgesindeki kesit daralmasının belirginleştiğini, gerilme akış çizgilerinin sıkıştığını ve kırlangıç kuyruğunun karakteristik keskin iç köşelerinde şiddetli çentik etkilerinin tetiklendiğini göstermektedir. FD1 parametresinin ise von-Mises gerilmeleri üzerindeki etkisi, diğer tasarım değişkenlerine kıyasla oldukça düşük seviyede kalmakta ve nötr bir davranış sergilemektedir. Bu nötr tepki, FD1 parametresinin ana yük taşıma eksenine daha paralel çalıştığına veya bölgesel gerilme yığılmalarını doğrudan besleyen bir geometrik süreksizlik yaratmadığına işaret etmektedir.

Shear stress değerleri incelendiğinde, DJP1 ve DJP3 parametrelerinin artışıyla birlikte gerilmenin pozitif bir hassasiyete sahip olduğu saptanmıştır. DJP1 parametresi bu grupta en yüksek pozitif etkiyi göstererek kayma gerilmelerini doğrudan yükseltirken, DJP3 parametresi de gerilme artışında önemli bir paya sahiptir. Kayma gerilmelerindeki bu ivmelenme, ilgili parametrelerin artışının temas yüzeylerindeki makaslama açısını kritik seviyelere taşıdığını veya efektif kayma alanını daraltarak birim alana düşen kesme kuvvetlerini lokal olarak maksimize ettiğini doğrulamaktadır. FD1 değişkeni ise kayma gerilmesi üzerinde negatif hassasiyete sahip olduğundan, bu değerin artırılması sistemdeki kayma yüklerini etkili bir şekilde azaltmaktadır. FD1'in bu güçlü sönümleyici karakteri, parametrenin büyümesiyle arayüzdeki yük aktarım kesitinin genişlediğini ve birbiri üzerinde kaymaya çalışan polimer katmanlar arasındaki mekanik direncin homojen bir şekilde tabana yayıldığını mekanik olarak ispatlamaktadır.

Frictional stress açısından yapılan değerlendirmede, FD1 ve DJP1 parametrelerinin sürtünme değerleri üzerinde pozitif bir hassasiyete sahip olduğu tespit edilmiştir. Özellikle FD1 parametresi bu grupta en yüksek etkiyi göstererek sürtünme gerilmelerini çok kuvvetli bir şekilde yükseltmektedir. Sürtünme gerilmesindeki bu artış, FD1 değişkeninin arayüzdeki sıkışma miktarını ve dolayısıyla polimer yüzeyler arasındaki normal temas basıncını doğrudan yöneten ana faktör olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. DJP3 değişkeni ise negatif yönlü etkiye sahip olup değerindeki artış sürtünme gerilmelerinin azalmasını sağlamaktadır. DJP3'ün bu ters yönlü davranışı ise, parametrenin kilitlenme arayüzünde göreceli bir gevşemeye veya mikroskobik temas kayıplarına yol açarak, yüzeyler arası sürtünme kenetlenmesini zayıflattığı şeklinde yorumlanabilir.

Kırlangıç kuyruğu bağlantı kenetlenme modelinin yapısal davranışını analiz etmek amacıyla, en etken tasarım değişkeni olan DJP3 parametresi odağında von-Mises eşdeğer gerilme değerlerini esas alan üç boyutlu tepki yüzeyi grafikleri oluşturulmuştur. Bu görselleştirmeler, parametreler arası karmaşık etkileşimlerin ve sistem hassasiyetlerinin net bir şekilde tanımlanmasını sağlayarak tasarımın optimizasyon potansiyelini ortaya koymaktadır. Kırlangıç kuyruğu bağlantı kenetlenme modeline ait 3B grafikler Şekil 4.13’te gösterilmiştir.



(a) (b)

Şekil 4.13 Kırlangıç kuyruğu bağlantı kenetlenme arayüzüne ait girdi parametrelerinin çıktı parametresi üzerine etkisini gösteren 3B grafikleri

Şekil 4.13 Kırlangıç kuyruğu Bağlantı kenetlenme arayüzüne ait seçili girdi parametrelerinin, çıktı parametresi konumundaki P11 (von-Mises Gerilmesi, z-ekseni) üzerindeki etkileşimlerini sergileyen üç boyutlu (3B) grafikler sunulmaktadır. Gerçekleştirilen analizlerde x-ekseni referans olarak P16 (DJP3) parametresini temsil etmekte olup; y-ekseninde yer alan değişkenler sırasıyla, (a) alt grafiğinde P14 (DJP1) parametresinin ve (b) alt grafiğinde P19 (FD1) parametresinin von-Mises gerilmesi üzerindeki eşzamanlı etkilerini yansıtacak şekilde düzenlenmiştir.

Şekil 4.13 (a) DJP3 ve DJP1 parametrelerinin von-Mises gerilmesi üzerindeki etkileşimi incelendiğinde, tasarım uzayında değişken bir yüzey formu oluştuğu görülmektedir. DJP3 değerindeki değişimlerin gerilme üzerindeki etkisi, DJP1 parametresinin seviyesine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Özellikle DJP1 değerinin yükselmesiyle birlikte gerilme değerlerinde gözlemlenen dalgalanmalar, bu iki değişkenin sistem performansı üzerinde sinerjik bir ilişkiye sahip olduğunu ve belirli eşik değerlerinde gerilme yoğunlaşmalarının optimize edilebileceğini ortaya koymaktadır.

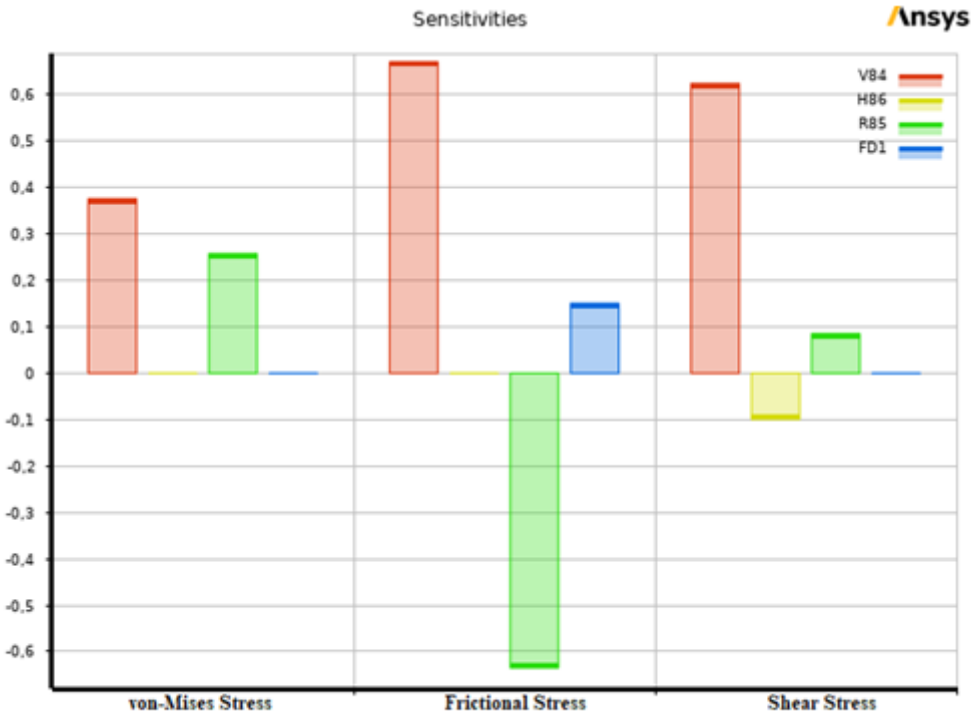
Şekil 4.13 (b) DJP3 ve FD1 parametreleri arasındaki ilişki analiz edildiğinde, her iki değişkenin artışına paralel olarak von-Mises gerilme değerlerinde belirgin bir yükselme kaydedilmiştir. Grafik üzerindeki eğim, özellikle yüksek FD1 ve DJP3 kombinasyonlarında sistemin en yüksek gerilme seviyelerine ulaştığını göstermektedir. Bu durum, arayüz dayanımının korunması adına bu iki parametrenin eş zamanlı olarak kontrol altında tutulması gerektiğini ve en düşük zorlanma bölgelerinin düşük parametre

değerlerinde kümelendiğini kanıtlamaktadır.

4.3.3 Dairesel Bağlantı Kenetlenme Modeli

Sistem performansını etkileyen parametrelerin hiyerarşisini belirlemek ve 3B analizlerde hangi ana değişkenin merkezde olacağını saptamak amacıyla öncelikle hassasiyet analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler, özellikle von-Mises gerilmesi üzerinde en baskın etkiye sahip parametreyi belirlememizi sağlamıştır. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, R85 parametresinin çıktı değerleri üzerindeki en etken değişken olduğu saptanmış ve 3B yanıt yüzey grafiklerinde bu parametre ortak eksen olarak seçilmiştir. Dairesel formun temel doğası gereği, eğrilik yarıçapını (R85) temsil eden değişkenin kilitlenme arayüzündeki gerilme akışını ve temas yüzey alanını doğrudan şekillendirmesi, bu parametrenin yapısal performans üzerinde kritik bir belirleyici olmasını sağlamaktadır.

Dairesel bağlantı modelinde kullanılan tasarım değişkenlerinin sistem çıktıları üzerindeki mutlak etki derecelerini saptamak amacıyla hassasiyet analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler, farklı stres türleri üzerinde hangi parametrelerin dominant rol oynadığını nicel olarak ortaya koymaktadır. Bu analiz sonuçları, tasarımın optimizasyon sürecinde hangi değişkenlere öncelik verilmesi gerektiğini belirleyerek metodolojik bir yol haritası oluşturmaktadır. Bu sayede, dairesel geometrinin sunduğu sürekli geçişlerin hangi parametrik eşiklerde bozulduğu veya güçlendiği matematiksel bir kesinlikle saptanarak, gerilme yığılmalarını önleyecek en ideal formun algoritmik olarak türetilmesi güvence altına alınmaktadır. Ayrıca, parametrik duyarlılıkların net bir şekilde tanımlanması, iteratif hesaplama süreçlerindeki karmaşıklığı azaltarak zaman ve kaynak verimliliğini de artırmaktadır. Ortaya konan bu sistematik yaklaşım, bağlantı elemanının servis ömrü boyunca karşılaşabileceği yorulma ve olası hasar risklerine karşı çok daha dirençli yapısal çözümlerin geliştirilmesine doğrudan katkı sağlamaktadır. Performans metriklerini belirleyen ana faktörlerin bu şekilde izole edilmesi, karmaşık mekanik etkileşimlerin çok daha şeffaf bir biçimde yorumlanmasına zemin hazırlamaktadır. Dairesel bağlantı kenetlenme arayüzüne ait optimizasyon hassasiyet grafiği Şekil 4.14'te gösterilmektedir.



Şekil 4.14 Dairesel bağlantı hassasiyet grafiği

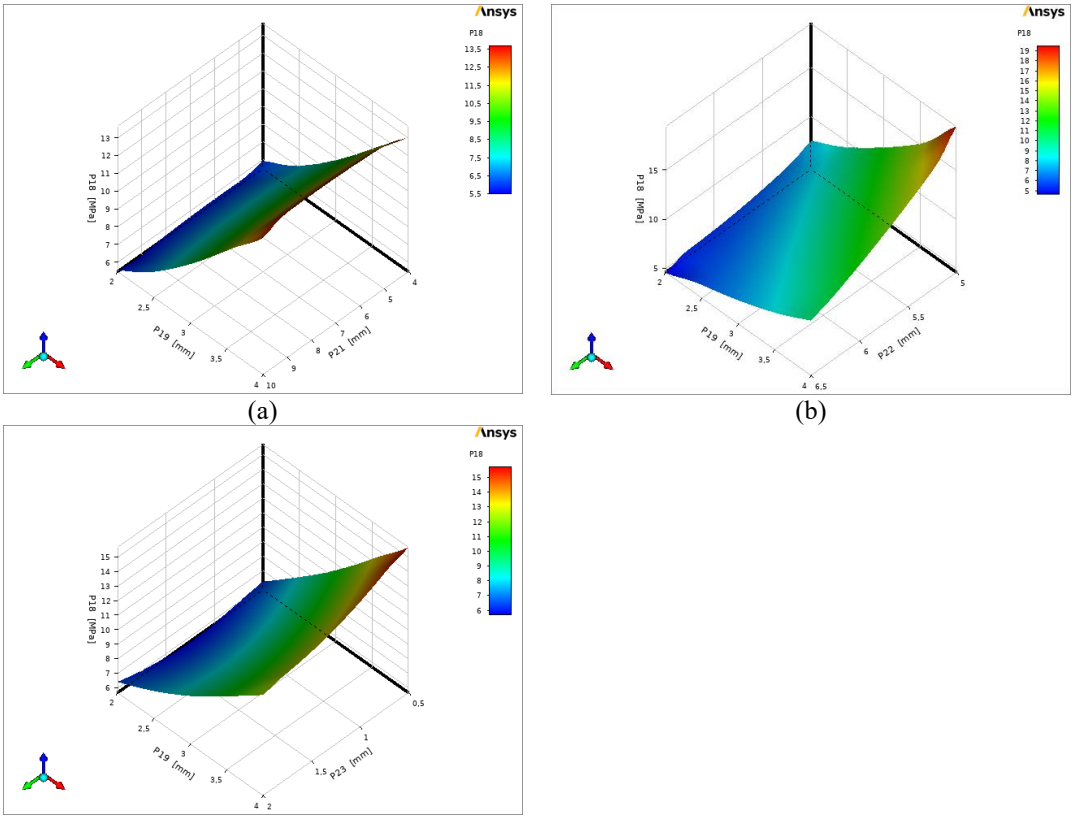
von-Mises stress analizleri sonucunda, V84 ve R85 parametrelerinin artışıyla gerilme değerlerinde bir yükselme yaşandığı görülmektedir. Her iki parametre de pozitif hassasiyete sahip olmakla birlikte, V84 değişkeni gerilme artışında R85 parametresine kıyasla daha baskın bir rol oynamaktadır. Bu güçlü pozitif eğilim, V84 parametresinin artmasıyla birlikte bağlantı boynundaki efektif yük taşıma kesitinin daraldığını veya dairesel kenetlenme formunun kuvvet akışını kısıtlayacak şekilde değiştiğini, dolayısıyla birim alana düşen iç gerilmelerin ani şekilde tırmandığını göstermektedir. FD1 ve H86 parametrelerinin ise von-Mises gerilmeleri üzerindeki etkisi, diğer tasarım değişkenlerine kıyasla oldukça düşük seviyede kalmakta ve nötr bir davranış sergilemektedir. Bu nötr tepki, söz konusu parametrelerin ana çekme ve uzama eksenlerine nispeten paralel çalıştığına veya yapısal rijitlik üzerinde radikal bir geometrik süreksizlik yaratmadığına işaret etmektedir.

Shear stress değerleri incelendiğinde, V84 parametresinin artışıyla birlikte gerilmenin yüksek pozitif bir hassasiyete sahip olduğu saptanmıştır. V84 parametresi bu grupta en yüksek pozitif etkiyi göstererek kayma gerilmelerini doğrudan yükseltirken, R85 parametresi de gerilme artışında daha düşük bir paya sahiptir. Kayma gerilmelerindeki

bu şiddetli artış, V84'ün makaslama bölgesindeki kilitlenme toleranslarını daralttığını ve iki malzeme arasındaki yatay kayma eğiliminin yerel bir düzleme sıkışarak bölgesel tepe değerlerine ulaşmasına neden olduğunu ispatlamaktadır. H86 değişkeni ise kayma gerilmesi üzerinde hafif negatif hassasiyete sahip olduğundan, bu değerin artırılması sistemdeki kayma yüklerini sınırlı ölçüde azaltmaktadır. H86'nın bu sönümleyici karakteri, artan değişken değeriyle birlikte kayma yüklerini karşılayan efektif temas yüzeyinin bir miktar genişlediğini ve gerilmenin arayüz boyunca homojenizasyonuna mütevazı bir katkı sağladığını yansıtmaktadır.

Frictional stress açısından yapılan değerlendirmede, V84 ve FD1 parametrelerinin sürtünme değerleri üzerinde pozitif bir hassasiyete sahip olduğu tespit edilmiştir. Özellikle V84 parametresi bu grupta en yüksek etkiyi göstererek sürtünme gerilmelerini çok kuvvetli bir şekilde yükseltmektedir. Bu durum, V84 parametresinin dairesel arayüzdeki lokal sıkışma oranını artırarak polimer yüzeyler arasındaki normal temas basıncını maksimize ettiğini ve mekanik kenetlenmeyi sürtünme lehine ciddi şekilde zorladığını açıkça ortaya koymaktadır. R85 değişkeni ise güçlü negatif yönlü etkiye sahip olup değerindeki artış sürtünme gerilmelerinin belirgin şekilde azalmasını sağlamaktadır. R85'in bu ters yönlü ve güçlü davranışı, eğrilik yarıçapının büyümesiyle birlikte dairesel formun daha yumuşak ve yayvan bir geometriye büründüğünü, bu sayede arayüzdeki kilitlenme noktalarında oluşan lokal sıkışmaların ve dolayısıyla aşırı sürtünme basınçlarının sönümlendiğini mekanik olarak doğrulamaktadır.

Dairesel bağlantı kenetlenme modelinin yapısal davranışını analiz etmek amacıyla, en etken tasarım değişkeni olan V84 parametresi odağında von-Mises eşdeğer gerilme değerlerini esas alan üç boyutlu tepki yüzeyi grafikleri oluşturulmuştur. Bu görselleştirmeler, parametreler arası karmaşık etkileşimlerin ve sistem hassasiyetlerinin net bir şekilde tanımlanmasını sağlayarak tasarımın optimizasyon potansiyelini ortaya koymaktadır. Oluşturulan bu topografik haritalar sayesinde gerilme yığılmalarını minimum seviyeye indirecek en uygun parametre kombinasyonları bölgesel olarak tespit edilebilmektedir. Elde edilen bu bulgular nihai geometrik iyileştirmeler için sağlam bir temel oluşturmaktadır. Dairesel bağlantı kenetlenme modeline ait 3B grafikler Şekil 4.15’te gösterilmiştir.



Şekil 4.15 Dairesel bağlantı kenetlenme arayüzüne ait girdi parametrelerinin çıktı parametresi üzerine etkisini gösteren 3B grafikleri

Şekil 4.15 Dairesel bağlantı kenetlenme arayüzüne ait çeşitli girdi parametrelerinin, çıktı parametresi konumundaki P11 (von-Mises Gerilmesi, z-ekseni) üzerindeki etkileşimlerini sergileyen üç boyutlu (3B) grafikler sunulmaktadır. Gerçekleştirilen tüm analizlerde x-ekseni referans olarak P19 (V84) parametresini temsil etmekte olup; y-ekseninde yer alan değişkenler sırasıyla, (a) alt grafiğinde P21 (H86), (b) alt grafiğinde P22 (R85) ve (c) alt grafiğinde ise P23 (FD1) parametrelerinin von-Mises gerilmesi üzerindeki eşzamanlı etkilerini yansıtacak şekilde düzenlenmiştir.

Şekil 4.15 (a) V84 ve H86 parametrelerinin von-Mises gerilmesi üzerindeki etkileşimi incelendiğinde, tasarım uzayında V84 parametresinin belirleyici ve baskın bir role sahip olduğu görülmektedir. Grafik yüzeyindeki eğim, V84 değerindeki artışın gerilme seviyelerinde sert ve lineer bir yükselişe neden olduğunu, H86 parametresinin ise bu etkileşimde oldukça nötr kalarak sistem hassasiyeti üzerinde sınırlı bir değişim yarattığını ortaya koymaktadır. Bu durum, optimizasyon çalışmalarında H86 değişkeninin gerilme kontrolünden ziyade diğer performans kriterleri için değerlendirilebileceğini

göstermektedir.

Şekil 4.15 (b) V84 ve R85 parametreleri arasındaki ilişki analiz edildiğinde, her iki değişkenin artışına paralel olarak von-Mises gerilme değerlerinde kümülatif bir yükselme kaydedilmiştir. Oluşan yüzey formu, bu iki parametre arasında pozitif yönlü bir korelasyon olduğunu ve sistemin en yüksek zorlanma bölgelerine, parametrelerin üst limitlerinde ulaştığını kanıtlamaktadır. Arayüz dayanımının korunması adına, V84 ve R85 parametrelerinin eş zamanlı artışının sınırlandırılması gerektiği ve ideal çalışma noktasının düşük parametre kombinasyonlarında kümelendiği anlaşılmaktadır.

Şekil 4.15 (c) V84 ve FD1 parametrelerinin kombinasyonu ele alındığında, gerilme dağılımının büyük oranda V84 parametresi tarafından domine edildiği saptanmıştır. FD1 parametresindeki değişimler yüzey formunda radikal bir dalgalanma yaratmazken, V84'e bağlı keskin gerilme artışı devamlılığını korumaktadır. Bu davranış, sürtünme faktörünün von-Mises gerilmesi üzerindeki etkisinin, geometrik değişkene kıyasla daha düşük seviyede kaldığını ve V84'ün sistem güvenliği açısından birincil kontrol parametresi olduğunu doğrulamaktadır.

4.4. Optimizasyon

Bu çalışmanın nihai aşamasında, T-bağlantı, Kırlangıç kuyruğu bağlantı ve Dairesel bağlantı kenetlenme arayüzlerinin mekanik performansını maksimize etmek ve belirlenen tasarım uzayı içerisindeki en ideal geometrik parametre setlerini tespit etmek amacıyla çok amaçlı optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon algoritması olarak, karmaşık ve doğrusal olmayan problemlerin çözümünde yüksek başarı sağlayan ve global minimum noktalarını yakalama kabiliyetiyle öne çıkan MOGA yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntem, tasarım değişkenlerinin geniş bir permütasyonunu tarayarak, belirlenen kısıtlar altında en düşük gerilme değerlerini sağlayan aday noktaları belirlemekte ve parametreler arasındaki ödünleşim ilişkilerini ortaya koymaktadır.

4.4.1 T-Bağlantı Kenetlenme Modeli

T-bağlantı kenetlenme arayüzünün topolojik optimizasyon sürecinde, çözüm uzayının kapsamlı bir şekilde taranabilmesi için başlangıç örneklem sayısı 6000 adet olarak

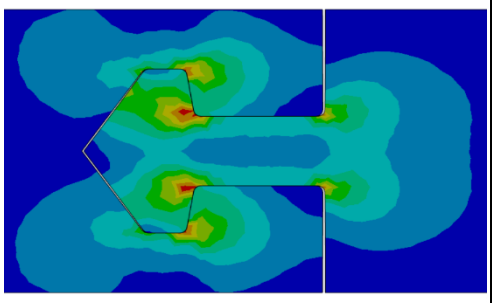
belirlenmiş ve her iterasyonda 1200 yeni örneklem sisteme dahil edilmiştir. Analiz hassasiyetini artırmak adına maksimum iterasyon sayısı 20 ile sınırlandırılmış, yakınsama kararlılık yüzdesi ise %2 olarak ayarlanmıştır. Algoritmada, en iyi 5 aday noktanın belirlenmesi hedeflenmiştir. Gerçekleştirilen optimizasyon süreci, hedeflenen kararlılık kriterlerini son derece hızlı sağlayarak 6. iterasyonda başarıyla yakınsamıştır. Toplamda 11802 değerlendirmenin yapıldığı bu süreçte, herhangi bir hata ile karşılaşılmamış ve çözüm uzayından 1200 adetlik nihai örneklem seti türetilmiştir.

Optimizasyonun temel amacı, kenetlenme bölgesindeki yapısal bütünlüğü tehdit eden gerilme yığılmalarını minimize etmektir. Bu doğrultuda, hedef fonksiyonu olarak von-Mises stres parametresi için Box-Behnken deney tasarım setinden elde edilen en düşük gerilme çıktıları referans alınmıştır. Optimizasyon hedefi, salt bir minimizasyon yerine, 34.094 MPa ile 34.228 MPa aralığında belirlenen von-Mises gerilme değeri 34.16 MPa hedefine ulaşmak olarak tanımlanmıştır. Bu yaklaşım, üretilebilir ve fiziksel olarak anlamlı en güvenli gerilme bölgesine odaklanmasını sağlamıştır.

Optimizasyon algoritması tarafından türetilen aday noktaların güvenilirliği ve hedeflenen performans kriterlerine uygunluğu detaylıca incelenmiştir. ANSYS optimizasyon modülü, elde edilen her bir çözüm kümesini, belirlenen hedef değer kriterine olan yakınlık derecesine göre derecelendirmektedir. Bu sınıflandırma sisteminde, 3 yıldız ile temsil edilen aday noktalar, hedeflenen gerilme değerine en yüksek hassasiyetle yaklaşan ve tasarım kısıtlarını en iyi şekilde sağlayan en uygun çözümleri işaret etmektedir. Buna karşın, tek yıldız veya çarpı sembolü ile gösterilen noktalar, hedeflenen optimum değerden sapmaların yaşandığını veya ilgili sonucun belirlenen tolerans limitlerinin uzağında kaldığını ifade etmektedir. Bu görsel derecelendirme, tasarımcının en ideal parametre setini seçmesinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Uygulanan bu sistematik filtreleme mekanizması sayesinde sistemin mekanik sınırlarını zorlamadan maksimum taşıma kapasitesine ulaşmasını sağlayacak nihai geometrik konfigürasyon yüksek bir doğrulukla saptanabilmektedir. T-bağlantı modeli için belirlenen 5 aday nokta, bu noktaların girdi parametreleri, uygunluk derecelerini belirten semboller ve hesaplanan nihai gerilme değerleri Şekil 4.16'da gösterilmiştir.

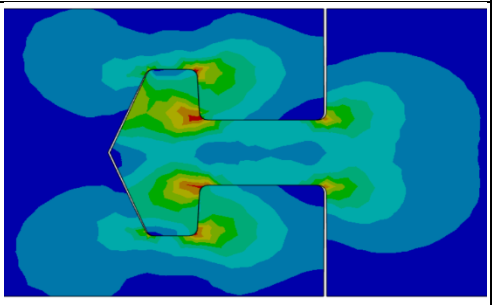
	Candidate Point 1	Candidate Point 1 (verified) DP 40
P1 - ZXPlane.M1A1 (degree)	124,98	
P2 - ZXPlane.M1A2 (degree)	99,094	
P3 - ZXPlane.M1P1 (mm)	2,3337	
P4 - ZXPlane.M1P3 (mm)	2,5375	
P5 - ZXPlane.M1P2 (mm)	8,4811	
P14 - FBlend1.FD1 (mm)	0,42518	
P11 - Equivalent Stress Maximum (MPa)	★★ 34,16	× 35,016

1. Aday noktası



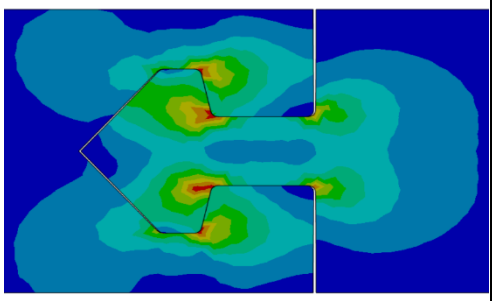
	Candidate Point 2	Candidate Point 2 (verified) DP 41
P1 - ZXPlane.M1A1 (degree)	113,15	
P2 - ZXPlane.M1A2 (degree)	92,34	
P3 - ZXPlane.M1P1 (mm)	2,1509	
P4 - ZXPlane.M1P3 (mm)	2,8725	
P5 - ZXPlane.M1P2 (mm)	7,5369	
P14 - FBlend1.FD1 (mm)	0,47779	
P11 - Equivalent Stress Maximum (MPa)	★★ 34,16	× 35,672

2. Aday noktası



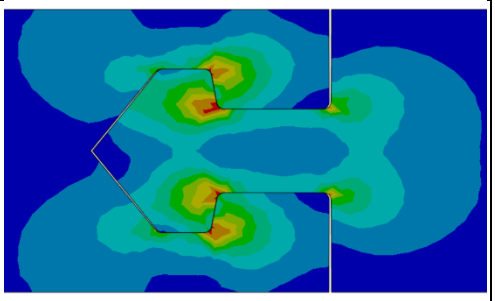
	Candidate Point 3	Candidate Point 3 (verified) DP 39
P1 - ZXPlane.M1A1 (degree)	130,82	
P2 - ZXPlane.M1A2 (degree)	101,72	
P3 - ZXPlane.M1P1 (mm)	2,308	
P4 - ZXPlane.M1P3 (mm)	2,346	
P5 - ZXPlane.M1P2 (mm)	6,6801	
P14 - FBlend1.FD1 (mm)	0,42493	
P11 - Equivalent Stress Maximum (MPa)	★★ 34,16	★ 34,206

3. Aday noktası



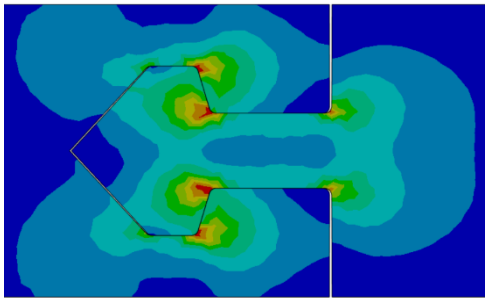
	Candidate Point 4	Candidate Point 4 (verified) DP 42
P1 - ZXPlane.M1A1 (degree)	128,13	
P2 - ZXPlane.M1A2 (degree)	99,317	
P3 - ZXPlane.M1P1 (mm)	2,8135	
P4 - ZXPlane.M1P3 (mm)	3,3323	
P5 - ZXPlane.M1P2 (mm)	7,6424	
P14 - FBlend1.FD1 (mm)	0,46248	
P11 - Equivalent Stress Maximum (MPa)	★★ 34,16	× 33,343

4. Aday noktası



	Candidate Point 5	Candidate Point 5 (verified) DP 43
P1 - ZXPlane.M1A1 (degree)	133,45	
P2 - ZXPlane.M1A2 (degree)	106,66	
P3 - ZXPlane.M1P1 (mm)	2,438	
P4 - ZXPlane.M1P3 (mm)	3,1736	
P5 - ZXPlane.M1P2 (mm)	8,857	
P14 - FBlend1.FD1 (mm)	0,42569	
P11 - Equivalent Stress Maximum (MPa)	★★ 34,16	× 34,033

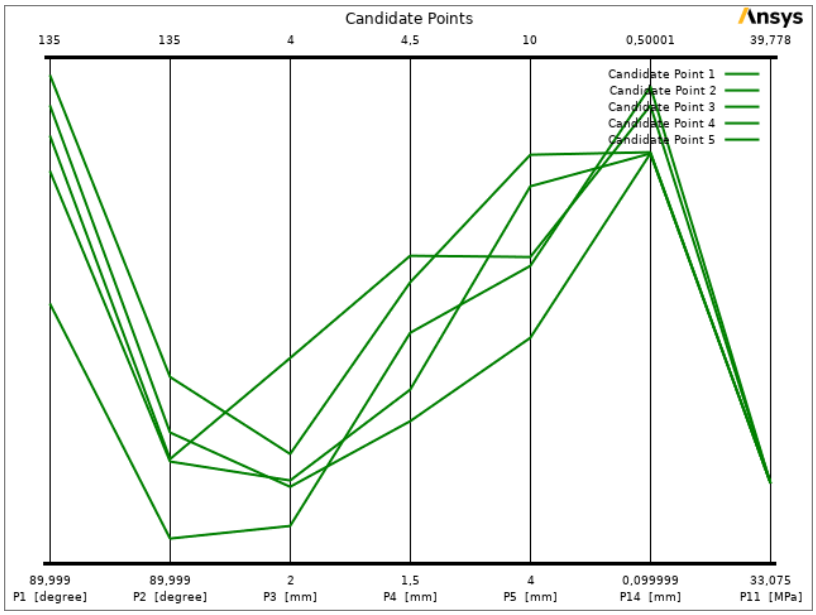
5. Aday noktası



Şekil 4.16 T-bağlantı kenetlenme arayüzüne ait beş optimizasyon aday noktası ve bu noktalara karşılık gelen doğrulanmış eşdeğer gerilme dağılımı görselleri

Optimizasyon sürecinde elde edilen alternatif çözüm kümeleri arasından, sonlu elemanlar yöntemiyle doğrulanarak tek yıldız sembolü ile işaretlenen ve hedeflenen dayanım kriterlerini en üst düzeyde karşılayan parametre seti olan 3. Aday noktası, çalışmanın nihai tasarımı olarak seçilmiştir.

T-bağlantı kenetlenme modeli için gerçekleştirilen optimizasyon sonucunda, girdi parametrelerinin çıktı üzerindeki yolculuğunu ve belirlenen 5 farklı aday noktanın tasarım uzayındaki izlerini gösteren aday noktaları grafiği Şekil 4.17'de verilmiştir.

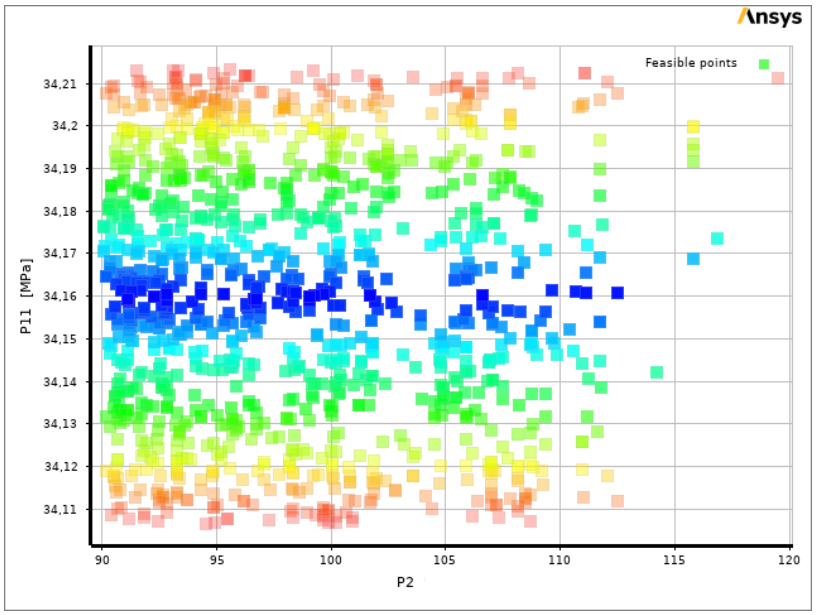


Şekil 4.17 T-bağlantı aday noktaları grafiği (P1=M1A1, P2=M1A2, P3=M1P1, P4=M1P3, P5=M1P2, P14=FD1, P11= von-Mises Stres)

Şekil 4.18 incelendiğinde, aday noktaları sistemindeki yeşil hatlar, algoritma tarafından önerilen 5 farklı aday tasarım noktasını temsil etmektedir. Grafiğin sağ tarafındaki P11 ekseninde çizgilerin alt noktalarda, yani düşük gerilme değerlerinde kesiştiği görülmektedir. Bu grafik, optimum sonuca ulaşmak için M1A1, M1A2 ve FD1 gibi parametrelerin hangi değer aralıklarında birlikte hareket etmesi gerektiğini görselleştirmekte; örneğin M1A1 ve M1A2 açılarının belirli kombinasyonlarının gerilmeyi minimize eden ortak bir patika oluşturduğunu kanıtlamaktadır.

Elde edilen sonuçların tasarım uzayındaki dağılımını, M1A2 parametresine göre gerilme davranışının değişimini ve pareto kümelerini gösteren tradeoff grafiği ise Şekil 4.18'de

sunulmuştur.



Şekil 4.18 T-bağlantı tradeoff grafiği (P2= M1A2, P11= von-Mises Stres)

Şekil 4.19'daki Tradeoff grafiği analiz edildiğinde, mavi renkli noktaların hedeflenen en düşük von-Mises gerilme değerlerini temsil ettiği, kırmızıya doğru giden noktaların ise yüksek gerilme bölgelerini işaret ettiği görülmektedir. M1A2 parametresinin 90 derece ile 105 derece arasındaki bandında mavi noktaların yoğunlaştığı, bu aralığın tasarım açısından güvenli bölge olduğu tespit edilmiştir. Grafik, 110 derece ve üzeri açılarda gerilme değerlerinin belirgin şekilde arttığını ve optimum çözümden uzaklaşıldığını açıkça ortaya koymaktadır.

4.4.2 Kırlangıç kuyruğu Bağlantı Kenetlenme Modeli

Kırlangıç kuyruğu bağlantı kenetlenme arayüzünün topolojik optimizasyon sürecinde, çözüm uzayının karakteristik yapısına uygun olarak başlangıç örneklem sayısı 3000 adet olarak belirlenmiş ve her iterasyonda 600 yeni örneklem sisteme dahil edilmiştir. Analiz hassasiyetini korumak ve işlem yükünü optimize etmek adına maksimum iterasyon sayısı 20 ile sınırlandırılmış, yakınsama kararlılık yüzdesi ise %2 olarak ayarlanmıştır. Algoritmada, en iyi 5 aday noktanın belirlenmesi hedeflenmiştir. Gerçekleştirilen optimizasyon süreci, T-bağlantı modeline kıyasla farklı bir yakınsama davranışı sergileyerek toplamda 5584 değerlendirme sonucunda başarıyla tamamlanmıştır. Süreç

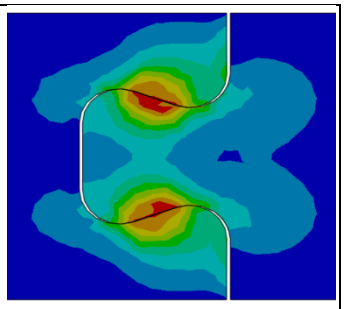
boyunca herhangi bir hata ile karşılaşılmamış ve çözüm uzayından 600 adetlik nihai örneklem seti türetilmiştir.

Optimizasyonun temel amacı, kırlangıç kuyruğu formunun getirdiği kilitlenme avantajını korurken, keskin köşelerde oluşabilecek gerilme yığılmalarını minimize etmektir. Bu doğrultuda, hedef fonksiyonu olarak von-Mises stres parametresi için Box-Behnken deney tasarım setinden referans alınan değerler ışığında, 35.18 MPa ile 37.08 MPa aralığında bir optimizasyon bandı oluşturulmuştur. Bu kapsamda algoritmaya 36.13 MPa hedefi tanımlanmış ve sistemin bu değere en yakınsamış en güvenli tasarımı bulması amaçlanmıştır.

Optimizasyon algoritması tarafından türetilen aday noktaların güvenilirliği ve hedeflenen performans kriterlerine uygunluğu ANSYS optimizasyon modülü aracılığıyla derecelendirilmiştir. Bu sınıflandırma sisteminde, aday noktaların tahmin edilen değerleri ile doğrulama sonrası elde edilen gerçek değerleri arasındaki uyum yıldız sembolleri ile ifade edilmektedir. Kırlangıç kuyruğu bağlantı modeli için belirlenen 5 aday nokta, bu noktaların girdi parametreleri, uygunluk derecelerini belirten semboller ve hesaplanan nihai gerilme değerleri Şekil 4.19'da detaylıca gösterilmiştir.

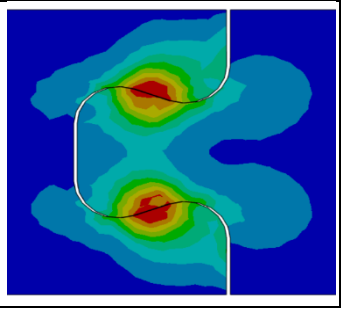
	Candidate Point 1	Candidate Point 1 (verified) DP 51
P14 - ZXPlane.DJP1 (mm)	2,2175	
P16 - ZXPlane.DJP3 (mm)	8,6109	
P19 - FBlend1.FD1 (mm)	2,2481	
P11 - Equivalent Stress Maximum (MPa)	36,13	36,696

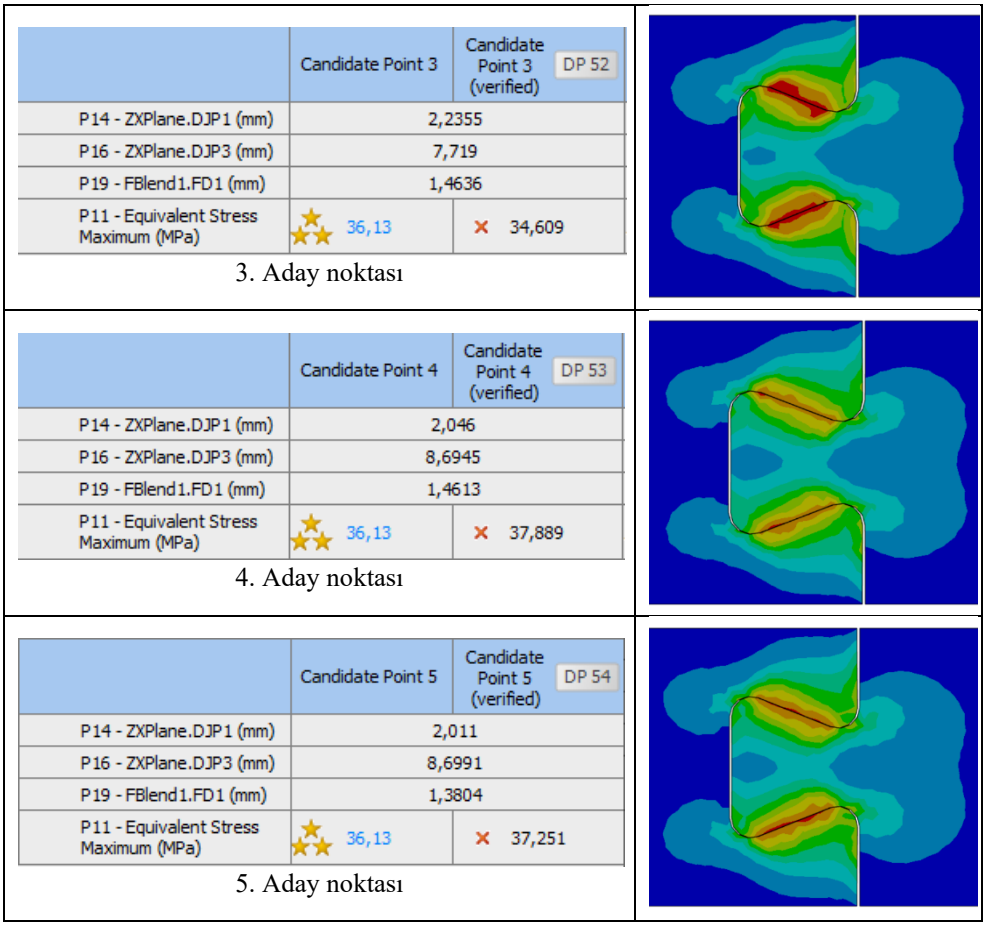
1. Aday noktası



	Candidate Point 2	Candidate Point 2 (verified) DP 50
P14 - ZXPlane.DJP1 (mm)	2,1592	
P16 - ZXPlane.DJP3 (mm)	8,6941	
P19 - FBlend1.FD1 (mm)	2,4629	
P11 - Equivalent Stress Maximum (MPa)	36,13	35,864

2. Aday noktası

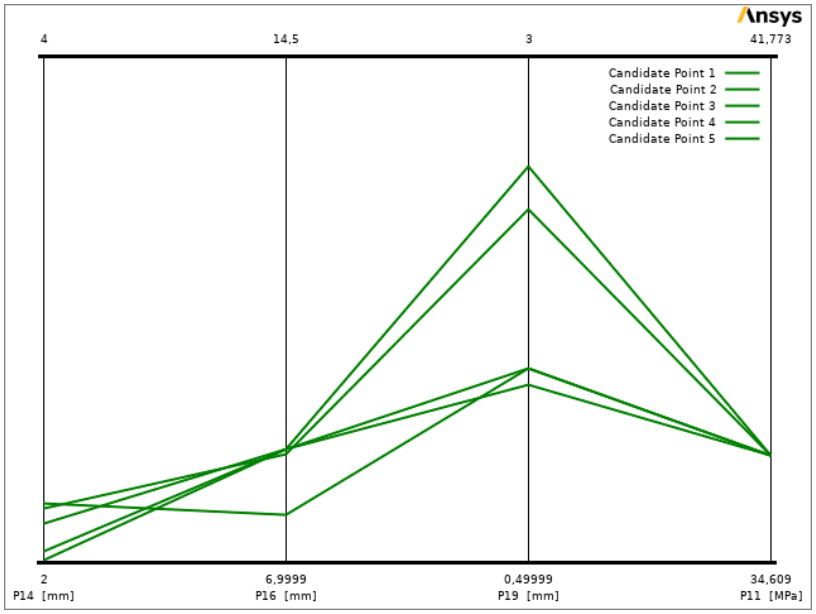




Şekil 4.19 Kırlangıç kuyruğu bağlantı kenetlenme arayüzüne ait beş optimizasyon aday noktası ve bu noktalara karşılık gelen doğrulanmış eşdeğer gerilme dağılımı görselleri

Optimizasyon sürecinde elde edilen alternatif çözüm kümeleri incelendiğinde, özellikle 2. aday noktanın dikkat çekici bir performans sergilediği görülmüştür. Bu aday nokta, yazılım tarafından 2 yıldız sembolü ile derecelendirilmiş olsa da yapılan doğrulama analizi sonucunda elde edilen 35.864 MPa gerilme değeri, hedeflenen 36.13 MPa değerinden daha düşük çıkarak yapının daha güvenli olduğunu kanıtlamıştır. Hedeflenenden daha düşük bir gerilme değeri elde edilmesi, tasarımın güvenlik katsayısını artırdığı için bu sapma olumlu bir sonuç olarak değerlendirilmiş ve bu parametre seti çalışmanın nihai tasarımı olarak seçilmiştir.

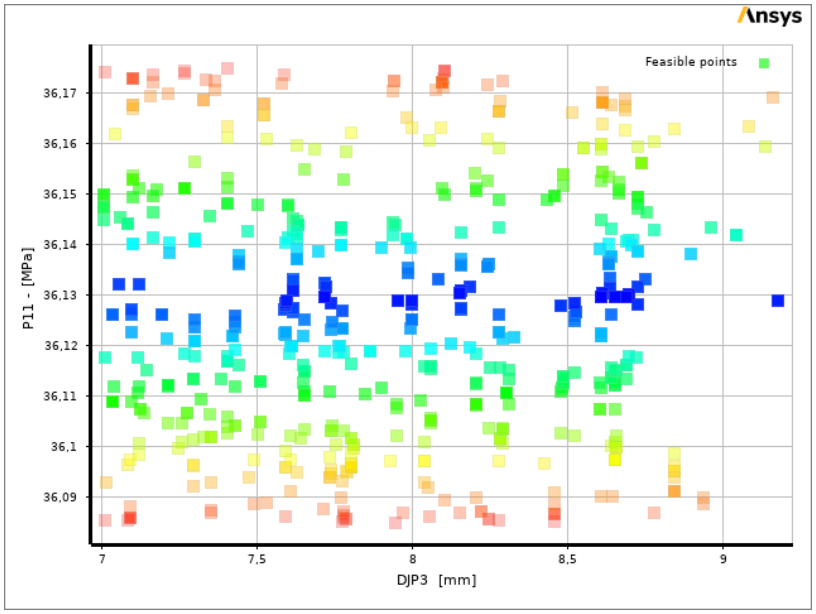
Kırlangıç kuyruğu bağlantı kenetlenme modeli için gerçekleştirilen optimizasyon sonucunda, girdi parametrelerinin çıktı üzerindeki yolculuğunu ve belirlenen 5 farklı aday noktanın tasarım uzayındaki izlerini gösteren aday noktaları grafiği Şekil 4.20'de verilmiştir.



Şekil 4.20 Kırlangıç kuyruğu bağlantı aday noktaları grafiği (P14=DJP1, P16=DJP3, P19=FD1, P11= von-Mises Stres)

Şekil 4.20 incelendiğinde, aday noktaları sistemindeki yeşil hatlar, algoritma tarafından önerilen 5 farklı aday tasarım noktasını temsil etmektedir. Grafiğin en sağındaki P11 ekseninde çizgilerin alt noktalarda kesişmesi, önerilen parametre setlerinin özellikle DJP1, DJP3 ve FD1 gerilmeyi minimize etmek için belirli bir uyum içinde çalıştığını göstermektedir. Bu grafik, optimum sonuca ulaşmak için DJP1 ve DJP3 parametrelerinin hangi geometrik oranlarda birleşmesi gerektiğini görsel olarak özetlemektedir.

Elde edilen sonuçlar, birbirine zıt amaç fonksiyonları arasındaki etkileşimi şeffaf bir biçimde yansıtarak tasarımcıya birden fazla kriteri aynı anda değerlendirme ve en uygun uzlaşma noktasını belirleme imkanı tanımaktadır. Pareto cephesinde kümelenen bu optimum çözümler, hedeflenen performans sınırlarını ihlal etmeden ulaşılabilecek en verimli geometrik konfigürasyonları temsil etmektedir. Tüm bu bulguların tasarım uzayındaki dağılımını, pareto kümelerini ve özellikle en baskın parametre olan DJP3 değerine göre gerilme davranışının değişimini gösteren tradeoff grafiği ise Şekil 4.21'de sunulmuştur.



Şekil 4.21 Kırlangıç kuyruğu bağlantı tradeoff grafiği (P11= von-Mises Stres)

Şekil 4.21'deki tradeoff grafiği analiz edildiğinde, mavi renkli noktaların hedeflenen en düşük von-Mises gerilme değerlerini temsil ettiği, kırmızı ve turuncu noktaların ise yüksek gerilme bölgelerini işaret ettiği görülmektedir. Bu durum, tasarımın yapısal bütünlüğü açısından DJP3 parametresinin bu aralıkta tutulmasının kritik önem taşıdığını ortaya koymaktadır.

4.4.3 Dairesel Bağlantı Kenetlenme Modeli

Dairesel bağlantı kenetlenme arayüzünün topolojik optimizasyon sürecinde, dairesel geometrinin parametrik hassasiyeti göz önünde bulundurularak başlangıç örneklem sayısı 4000 adet olarak belirlenmiş ve her iterasyonda 800 yeni örneklem sisteme dahil edilmiştir. Analiz sürecinin verimliliğini artırmak amacıyla maksimum iterasyon sayısı 20 ile sınırlandırılmış, yakınsama kararlılık yüzdesi ise %2 olarak ayarlanmıştır. Algoritmada, en iyi 5 aday noktanın belirlenmesi hedeflenmiştir. Gerçekleştirilen optimizasyon süreci, toplamda 12811 değerlendirme sonucunda 13. iterasyonda başarıyla yakınsamıştır. Süreç boyunca herhangi bir hata ile karşılaşılmamış ve çözüm uzayından 800 adetlik nihai örneklem seti türetilmiştir.

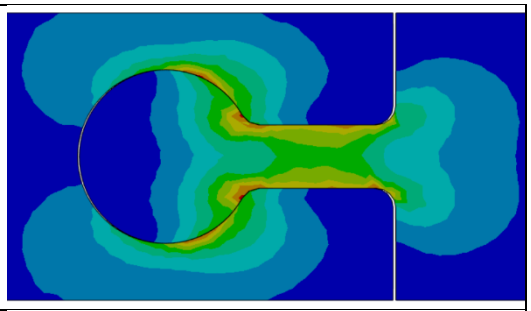
Optimizasyonun temel amacı, dairesel formun sağladığı yük dağılımı avantajını korurken arayüzde oluşabilecek maksimum gerilmeleri belirli bir tolerans aralığında tutmaktır. Bu

doğrultuda, hedef fonksiyonu olarak von-Mises stres parametresi için Box-Behnken deney tasarım setinden elde edilen veriler referans alınarak 32.44 MPa ile 34.67 MPa aralığında bir optimizasyon bandı oluşturulmuştur. Bu kapsamda algoritmaya P11 = 33.56 MPa hedefi tanımlanmış ve sistemin bu değere en yakınsamış en kararlı tasarımı bulması amaçlanmıştır.

Optimizasyon algoritması tarafından türetilen aday noktaların güvenilirliği ve hedeflenen performans kriterlerine uygunluğu ANSYS optimizasyon modülü aracılığıyla derecelendirilmiştir. Bu sınıflandırma sisteminde, aday noktaların tahmin edilen değerleri ile doğrulama sonrası elde edilen gerçek değerleri arasındaki uyum yıldız sembolleri ile ifade edilmektedir. Dairesel bağlantı modeli için belirlenen 5 aday nokta, bu noktaların girdi parametreleri V84, H86, R85, FD1, uygunluk derecelerini belirten semboller ve hesaplanan nihai gerilme değerleri Şekil 4.22'de detaylıca gösterilmiştir.

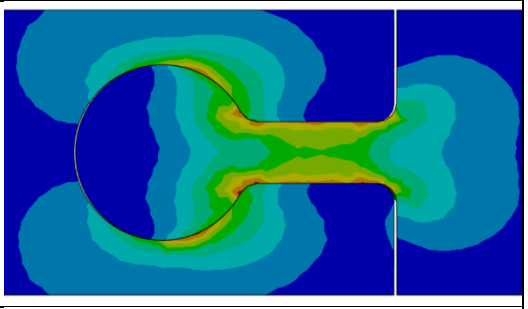
	Candidate Point 1	Candidate Point 1 (verified) DP 70
P19 - ZXPlane.V84 (mm)	2,0995	
P21 - ZXPlane.H86 (mm)	9,7094	
P22 - ZXPlane.R85 (mm)	5,7404	
P23 - FBlend1.FD1 (mm)	1,2618	
P11 - Equivalent Stress Maximum (MPa)	★★★ 33,56	★★ 33,174

1. Aday noktası



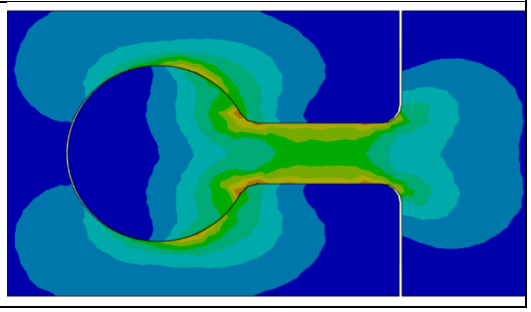
	Candidate Point 2	Candidate Point 2 (verified) DP 71
P19 - ZXPlane.V84 (mm)	2,054	
P21 - ZXPlane.H86 (mm)	9,9936	
P22 - ZXPlane.R85 (mm)	5,857	
P23 - FBlend1.FD1 (mm)	1,2379	
P11 - Equivalent Stress Maximum (MPa)	★★★ 33,56	✕ 32,034

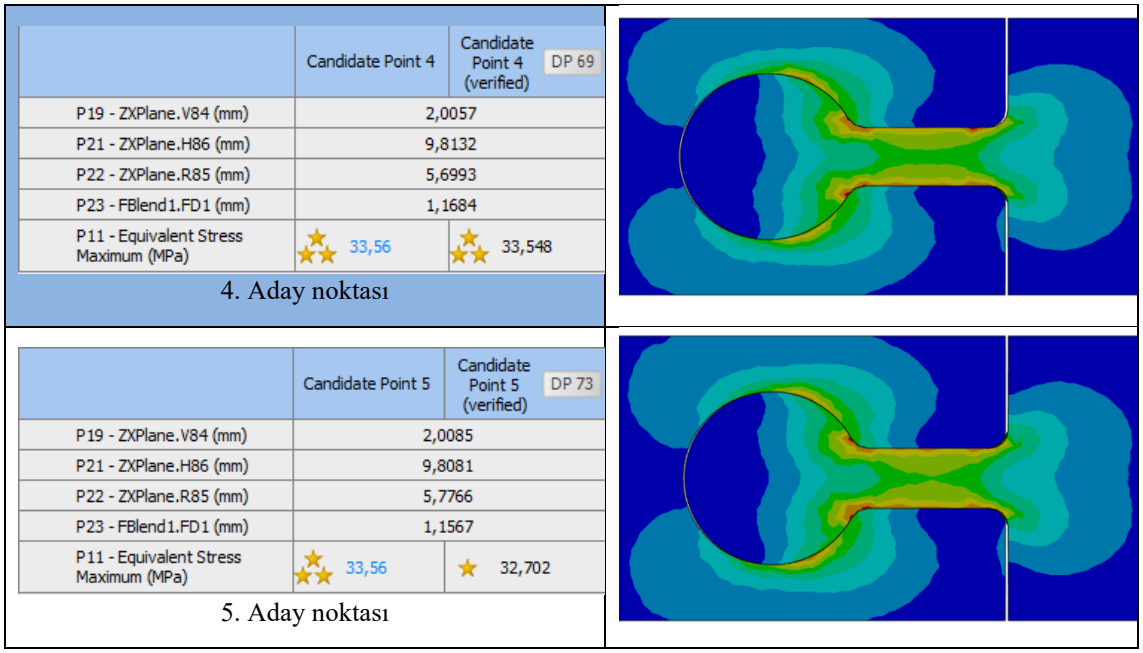
2. Aday noktası



	Candidate Point 3	Candidate Point 3 (verified) DP 72
P19 - ZXPlane.V84 (mm)	2,023	
P21 - ZXPlane.H86 (mm)	9,9057	
P22 - ZXPlane.R85 (mm)	5,8568	
P23 - FBlend1.FD1 (mm)	1,2458	
P11 - Equivalent Stress Maximum (MPa)	★★★ 33,56	★★ 33,308

3. Aday noktası



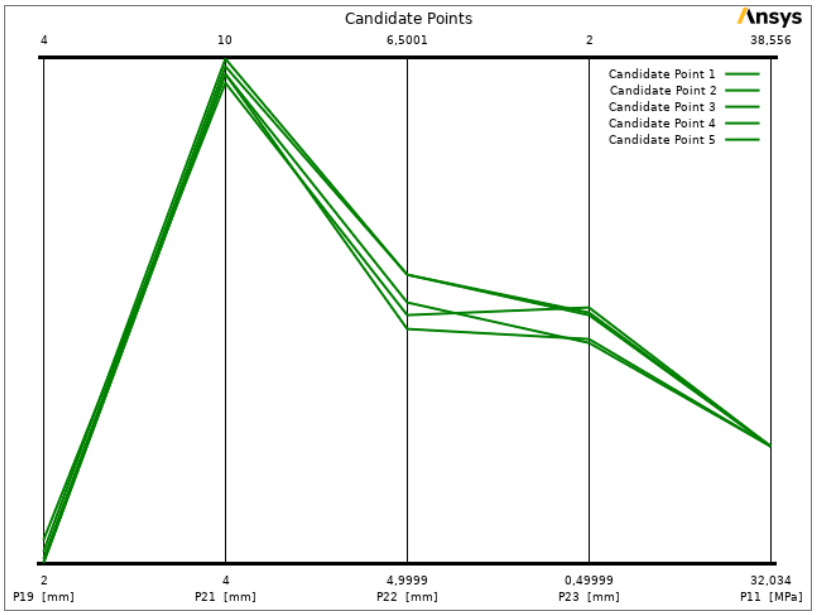


Şekil 4.22 Dairesel bağlantı kenetlenme arayüzüne ait beş optimizasyon aday ve noktası bu noktalara karşılık gelen doğrulanmış eşdeğer gerilme dağılımı görselleri

Optimizasyon sürecinde elde edilen alternatif çözüm kümeleri incelendiğinde, 4. aday noktanın diğer adaylara kıyasla üstün bir doğruluk seviyesine sahip olduğu görülmüştür. Bu aday nokta, hem matematiksel modelin tahmini aşamasında hem de sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan doğrulama aşamasında en yüksek derecelendirme olan 3 yıldız sembolü ile işaretlenmiştir. Tahmin edilen değer ile doğrulama sonrası elde edilen 33.548 MPa değeri arasındaki sapmanın ihmal edilebilir düzeyde olması ve sonucun hedeflenen 33.56 MPa değerine neredeyse birebir örtüşmesi, kurulan tepki yüzeyi modelinin yüksek tutarlılığını ve bu parametre setinin güvenilirliğini kanıtlamaktadır. Bu nedenle, hem sayısal hedefi tam isabetle yakalayan hem de doğrulama testinden tam not alan bu parametre seti çalışmanın nihai tasarımı olarak seçilmiştir.

Dairesel bağlantı kenetlenme modeli için yürütülen optimizasyon sürecinde, algoritma çeşitli tasarım kısıtları altında en uygun uzlaşma bölgelerini tarayarak ideal çözüm kümesine yakınsamıştır. Tespit edilen bu konfigürasyonlar, parametrik varyasyonların sistem performansı üzerindeki etkilerinin kapsamlı bir biçimde değerlendirilmesine ve nihai geometrinin yüksek bir mühendislik güvenilirliğiyle seçilmesine olanak tanımaktadır. Elde edilen optimizasyon sonucunda, girdi parametrelerinin çıktı üzerindeki yolculuğunu ve belirlenen 5 farklı aday noktanın tasarım uzayındaki izlerini

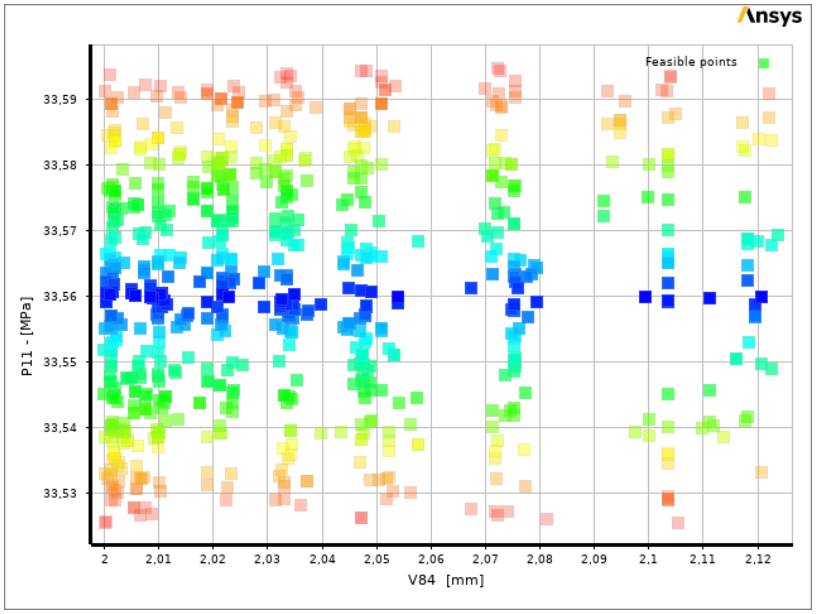
gösteren aday noktaları Şekil 4.23'te verilmiştir.



Şekil 4.23 Dairesel bağlantı aday noktaları grafiği (P19=V84, P21=H86, P22=R85, P23=FD1, P11= von-Mises Stres)

Şekil 4.23 incelendiğinde, aday noktaları sistemindeki yeşil hatlar, algoritma tarafından önerilen 5 farklı aday tasarım noktasını temsil etmektedir. Grafiğin en sağındaki P11 ekseninde çizgilerin hedeflenen 33.56 MPa değeri etrafında çok dar bir makasta kesişmesi, algoritmanın kararlı bir çözüm ürettiğini göstermektedir. Bu grafik, optimum sonuca ulaşmak için özellikle V84 ve R85 parametrelerinin hangi geometrik oranlarda dengelenmesi gerektiğini görsel olarak özetlemektedir.

Çok amaçlı optimizasyon süreçlerinde, birbirine zıt performans kriterleri arasındaki dengeyi kurmak ve en ideal uzlaşma noktalarını saptamak hedeflenen mekanik kararlılık için büyük önem taşımaktadır. Analiz verileri, tasarımcının kritik değişkenler üzerindeki tolerans sınırlarını daha net bir vizyonla değerlendirmesine ve hedeflenen dayanım ömrü için en verimli konfigürasyonları seçmesine olanak sağlamaktadır. Elde edilen sonuçların tasarım uzayındaki dağılımını, özellikle sistemin en hassas parametresi olan V84 değerine göre gerilme davranışının değişimini ve pareto kümelerini gösteren tradeoff grafiği ise Şekil 4.24'te sunulmuştur.



Şekil 4.24 Dairesel bağlantı tradeoff grafiği (P11= von-Mises Stres)

Şekil 4.24'teki tradeoff grafiği analiz edildiğinde, mavi renkli noktaların hedeflenen optimum von-Mises gerilme değerlerini temsil ettiği, kırmızı ve turuncu noktaların ise tolerans dışı yüksek gerilme bölgelerini işaret ettiği görülmektedir. V84 parametresinin 2.00 mm ile 2.02 mm arasındaki dar bandında mavi noktaların ve feasible points olarak adlandırılan uygun çözümlerin yoğunlaştığı tespit edilmiştir. Bu durum, dairesel bağlantının yapısal bütünlüğü açısından V84 parametresinin bu hassas aralıkta tutulmasının kritik önem taşıdığını ortaya koymaktadır.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu tez çalışmasında, eklemeli imalat yöntemiyle üretilen çok parçalı yapıların en kritik zayıf noktası olarak kabul edilen kenetlenme arayüz bölgelerinin mekanik performansının iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Çalışma kapsamında, endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan ve farklı yük aktarım mekanizmalarına sahip üç temel kenetlenme geometrisi T-bağlantı, Kırlangıç kuyruğu bağlantı ve Dairesel bağlantı ele alınmıştır. Çalışmanın temel amacı, bu geometrilerin yapısal davranışlarını sonlu elemanlar yöntemi ile analiz etmek, parametrik tasarım değişkenlerinin gerilme dağılımları üzerindeki etkilerini belirlemek ve tepki yüzeyi metodolojisi ile MOGA kullanarak optimum tasarım parametrelerini elde etmektir.

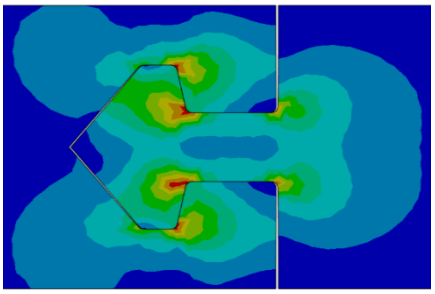
Eklemeli imalat teknolojilerinin, özellikle FFF yönteminin endüstriyel kullanımı arttıkça, parça boyutlarındaki kısıtlamalar ve çoklu malzeme gereksinimleri, parçaların birleştirilerek üretilmesini zorunlu kılmaktadır. Ancak literatürde Bandyopadhyay ve Heer (2018) ile Nazir vd. (2023) tarafından da belirtildiği üzere, çok malzemeli yapılarda arayüzler, malzeme uyumsuzlukları ve proses kaynaklı hatalar nedeniyle yapının en zayıf halkasını oluşturmaktadır. Bu çalışmada elde edilen genel bulgular, düz bağlantılar yerine geometrik kenetlenme stratejilerinin kullanılmasının, yükü daha geniş bir alana yayarak gerilme yığılmalarını azalttığını ve bağlantı güvenilirliğini artırdığını göstermiştir. Bu yaklaşım, literatürde Peralta Marino vd. (2022) ve Liu vd. (2024) tarafından yapılan, geometrik kilitlenmenin arayüz dayanımını yapıştırıcı veya ek bağlantı elemanı kullanmadan artırdığına dair bulgularla tam bir uyum içerisindedir.

Çalışmada uygulanan YYM tabanlı optimizasyon süreci, klasik deneme-yanılma yöntemlerinin aksine, tasarım uzayının sistematik olarak taranmasına ve en iyi noktaların yüksek hassasiyetle belirlenmesine olanak tanımıştır. Box-Behnken deney tasarımı ile oluşturulan simülasyon setleri, geometrik parametrelerin von-Mises gerilmesi, kayma gerilmesi ve sürtünme gerilmesi üzerindeki etkilerini nicel olarak ortaya koymuştur. Elde edilen sonuçlar, her üç geometri tipinde de parametrik optimizasyonun, başlangıç tasarımlarına kıyasla gerilme değerlerini düşürerek daha güvenli yapılar ortaya çıkardığını kanıtlamaktadır. İncelenen her bir kenetlenme modeline ait tartışmalar ve

literatür karşılaştırmaları detaylandırılmıştır. İncelenen her bir kenetlenme modeline ait tartışmalar, sadece optimize edilmiş nihai durum üzerinden değil, aynı zamanda literatürdeki deneysel çekme testi verileriyle kıyaslanabilmesi adına yapının maksimum von-Mises gerilmesi altındaki davranışları da dikkate alınarak detaylandırılmıştır.

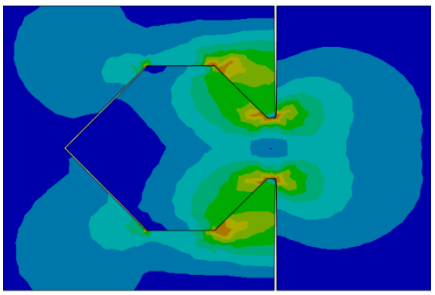
Bu bağlamda, çalışmanın en önemli çıktısı, farklı girdi parametrelerine sahip kenetlenme geometrilerinin parametrik optimizasyon ile mekanik güvenilirliklerinin doğrulanmış olmasıdır. Gerçekleştirilen MOGA optimizasyonu neticesinde, T-bağlantı, Kırlangıç kuyruğu ve Dairesel bağlantı modelleri için tasarım uzayındaki en iyi aday noktalar belirlenmiş ve bu noktaların ANSYS ortamında yapılan doğrulama analizleri ile güvenilirlikleri kanıtlanmıştır. Her üç model için elde edilen bulgular Şekil 5.1'de karşılaştırmalı bir yaklaşımla sunulmuştur. Bu görselleştirmede, (1) indisi ile belirtilen şekiller (a.1, b.1, c.1) optimizasyon sonucu von-Mises maksimum gerilmenin minimize edildiği ideal tasarım durumunu temsil ederken; (2) indisi ile belirtilen şekiller (a.2, b.2, c.2) yapının yük altındaki maksimum von-Mises gerilme dağılımını göstermektedir.

	Candidate Point 3	Candidate Point 3 (verified) DP 39
P1 - ZXPlane.M1A1 (degree)	130,82	
P2 - ZXPlane.M1A2 (degree)	101,72	
P3 - ZXPlane.M1P1 (mm)	2,308	
P4 - ZXPlane.M1P3 (mm)	2,346	
P5 - ZXPlane.M1P2 (mm)	6,6801	
P14 - FBlend1.FD1 (mm)	0,42493	
P11 - Equivalent Stress Maximum (MPa)	34,16	34,206



a.1) T-bağlantı kenetlenme modeli optimize edilmiş tasarım

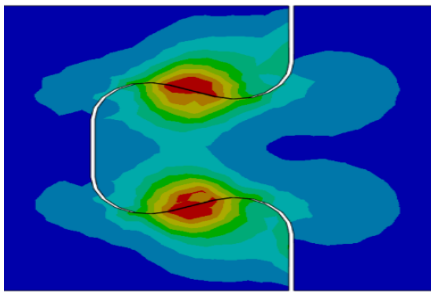
	Candidate Point 1	Candidate Point 1 (verified)
P1 - ZXPlane.M1A1 (degree)	134,83	
P2 - ZXPlane.M1A2 (degree)	134,86	
P3 - ZXPlane.M1P1 (mm)	2,0251	
P4 - ZXPlane.M1P3 (mm)	4,4895	
P5 - ZXPlane.M1P2 (mm)	4,0158	
P14 - FBlend1.FD1 (mm)	0,10209	
P11 - Equivalent Stress Maximum (MPa)	39,694	36,624



a.2) T-bağlantı kenetlenme modeli maksimum von-Mises gerilme dağılımı

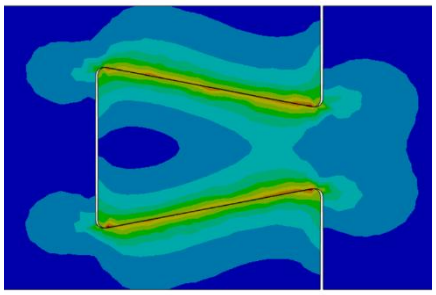
Şekil 5.1 T bağlantı kenetlenme modelleri için optimize edilmiş geometriler ve maksimum von-Mises gerilme dağılımlarının karşılaştırmalı analizi

	Candidate Point 2	Candidate Point 2 (verified) DP 50
P14 - ZXPlane.DJP1 (mm)	2,1592	
P16 - ZXPlane.DJP3 (mm)	8,6941	
P19 - FBlend1.FD1 (mm)	2,4629	
P11 - Equivalent Stress Maximum (MPa)	36,13	35,864



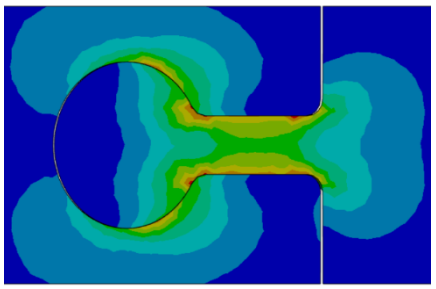
b.1) Kırlangıç kuyruğu bağlantı kenetlenme modeli optimize edilmiş tasarım

	Candidate Point 1	Candidate Point 1 (verified)
P14 - ZXPlane.DJP1 (mm)	2,6267	
P16 - ZXPlane.DJP3 (mm)	14,499	
P19 - FBlend1.FD1 (mm)	0,50307	
P11 - Equivalent Stress Maximum (MPa)	41,755	41,289



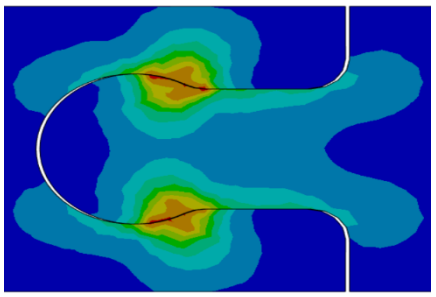
b.2) Kırlangıç kuyruğu bağlantı kenetlenme modeli maksimum von-Mises gerilme dağılımı

	Candidate Point 4	Candidate Point 4 (verified) DP 69
P19 - ZXPlane.V84 (mm)	2,0057	
P21 - ZXPlane.H86 (mm)	9,8132	
P22 - ZXPlane.R85 (mm)	5,6993	
P23 - FBlend1.FD1 (mm)	1,1684	
P11 - Equivalent Stress Maximum (MPa)	33,56	33,548



c.1) Dairesel bağlantı kenetlenme modeli optimize edilmiş tasarım

	Candidate Point 1	Candidate Point 1 (verified)
P19 - ZXPlane.V84 (mm)	3,9978	
P21 - ZXPlane.H86 (mm)	7,9449	
P22 - ZXPlane.R85 (mm)	5,0009	
P23 - FBlend1.FD1 (mm)	1,9981	
P11 - Equivalent Stress Maximum (MPa)	38,551	38,567



c.2) Dairesel bağlantı kenetlenme modeli maksimum von-Mises gerilme dağılımı

Şekil 5.2 Kırlangıç kuyruğu ve dairesel kenetlenme modelleri için optimize edilmiş geometriler ve maksimum von-Mises gerilme dağılımlarının karşılaştırmalı analizi

Şekil 5.1'de sunulan karşılaştırmalı görseller incelendiğinde, a.1, b.1, c.1 indisleri ile tanımlanan optimizasyon çıktılarının, yazılımın önerdiği aday noktalar ile doğrulandığı ve hedeflenen minimum gerilme değerlerine başarıyla yakınsadığı görülmektedir. Buna karşılık, 2 indisi ile verilen a.2, b.2, c.2 çıktıların maksimum gerilme haritaları, yapıların fiziksel dayanım limitlerindeki davranışlarını ve potansiyel hasar bölgelerini sergilemektedir. Bu iki durum kıyaslandığında; optimize edilen geometrilerin, kritik

yükleme koşullarında dahi gerilme yığılmalarını minimize ettiği ve yükü malzeme hacmine daha homojen yaydığı açıkça anlaşılmaktadır. Özellikle Dairesel bağlantı modelinde, hem optimize hem de maksimum zorlanma durumlarında gerilme geçişlerinin T-Bağlantı ve Kırlangıç kuyruğu Bağlantı modellerine nazaran çok daha yumuşak olduğu, gerçekleştirilen çekme testi simülasyonlarıyla da teyit edilmiştir.

5.1. T-bağlantı Kenetlenme Modeli

T-bağlantı kenetlenme modeli, keskin köşeli yapısı ve doğrusal yük aktarım karakteristiği ile bu çalışmada referans bir model olarak değerlendirilmiştir. Analiz sonuçları, T-bağlantı yapısında özellikle M1A1 ve M1A2 açı parametrelerinin gerilme dağılımı üzerinde belirleyici bir role sahip olduğunu göstermiştir. Optimizasyon sürecinde, M1A2 açısının 90° ile 105° aralığında optimize edilmesinin, gerilme yığılmalarını minimize ettiği ve yapının stabilitesini artırdığı tespit edilmiştir. Bu baskın açısal parametrelerin yanı sıra, tasarımın diğer girdileri olan M1P1, M1P2 ve M1P3 uzunluk parametrelerinin gerilme üzerindeki etkisinin daha lineer ve sınırlı olduğu; buna karşın FD1 (köşe yuvarlatma) parametresindeki artışın, keskin köşe etkisini yumuşatarak gerilme yığılmalarını ters orantılı olarak düşürdüğü belirlenmiştir.

Bu bölümde Şekil 5.1'de sunulan karşılaştırmalı analizler, literatürdeki deneysel bulgularla güçlü bir korelasyon göstermektedir. Şekil 5.1 (a.2)'de gösterilen maksimum gerilme durumu, literatürde Ribeiro vd. (2019) ve Dairabayeva vd. (2023) tarafından işaret edilen, keskin köşe geçişlerinin gerilme konsantrasyonunu artırarak çatlak başlangıcına neden olduğu bulgusuyla örtüşmektedir. Maksimum zorlanma anında gerilmenin tam köşe noktalarında yoğunlaşması, klasik T-bağlantıların en zayıf noktasını temsil etmektedir.

Ribeiro vd. (2019), T-şekilli arayüzlerin düz arayüzlere kıyasla çekme dayanımını artırdığını belirtirken, bu çalışmadaki analizler bu artışın ancak köşe gerilmelerinin yönetilmesiyle sürdürülebileceğini göstermiştir. Frascio vd. (2024), T-bağlantı arayüzlerin dayanım artışında etkili olduğunu ancak deformasyon kapasitesinin sınırlı kalabileceğini belirtmiştir. Şekil 5.1 (a.2)'de sunulan maksimum gerilme durumu incelendiğinde, von-Mises gerilmelerinin tam olarak köşe noktalarında yoğunlaştığı ve

yapının en zayıf halkasını oluşturduğu açıkça görülmektedir. Bu görsel kanıt, literatürdeki köşe kaynaklı kırılma riskini doğrulamakta olup; M1A2 açısının ve FD1 parametresinin optimize edilmesinin, bu kritik gerilme yığılmalarını sönümlemek ve yapının elastik limitler dahilinde kalmasını sağlamak adına kritik bir öneme sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

5.2. Kırlangıç Kuyruğu Bağlantı Kenetlenme Modeli

Kırlangıç kuyruğu bağlantı kenetlenme modeli, sağladığı mekanik kilitlenme avantajı ile özellikle çekme yüklerine karşı yüksek direnç gösterme potansiyeli nedeniyle incelenmiştir. Analiz bulguları, bu modelde DJP3 parametresinin ve DJP1 parametresinin von-Mises gerilmesi üzerinde en baskın etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Özellikle çalışmanın 4. Bölümünde yer alan Şekil 4.13'teki 3B tepki yüzeyi grafikleri incelendiğinde; DJP3 ve DJP1 parametrelerinin oluşturduğu gerilme dağılım yüzeyinin, Mihalache vd. (2022) tarafından sunulan ve benzer geometrik kilitlenmeleri inceleyen 3B grafiklerin topolojisiyle büyük bir paralellik gösterdiği tespit edilmiştir. Bu durum, girdi parametrelerimizdeki değişimin gerilme üzerindeki etkisinin, literatürdeki doğrusal olmayan davranış modelleriyle örtüştüğünü kanıtlamaktadır. Sistemin ikincil geometrik girdisi olan FD1 değerindeki artışın ise, boyun kökündeki gerilme yığılmalarını hafifleterek gerilme dağılımını daha homojen hale getirdiği ve DJP parametrelerinin etkinliğini desteklediği gözlemlenmiştir. Başlangıç analizlerinde yüksek seviyelerde seyreden gerilme değerleri, optimizasyon sonucunda hedeflenen banda çekilerek iyileştirilmiştir.

Kırlangıç kuyruğu bağlantılarının mekanik davranışı, Şekil 5.1'deki (b.1) optimize durum ve (b.2) maksimum gerilme durumu üzerinden değerlendirildiğinde literatürle uyumlu kritik sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Literatürde Liu vd. (2024), Kırlangıç kuyruğu bağlantı yapılarında gömülme derinliğinin artmasıyla taşıma kapasitesinin arttığını, ancak bu durumun aynı zamanda yerel gerilme yığılmalarını tetiklediğini belirtmiştir. Şekil 5.1 (b.2)'de görülen maksimum gerilme haritası, Mihalache vd. (2022) tarafından da vurgulanan yerel gerilme yoğunlaşmalarının, özellikle boyun bölgesindeki keskin geçişlerde oluştuğunu doğrulamaktadır. Çalışmadaki hassasiyet analizleri, kilitlenme derinliği ile gerilme yığılması arasında bir tradeoff olduğunu göstermektedir. Buna

karşılık, MOGA algoritması ile elde edilen Şekil 5.1 (b.1) geometrisi, DJP1 ve DJP3 parametrelerini dengeleyerek bu gerilmeleri tabana yaymış ve malzeme limitlerini aşmayan bir geometri sunmuştur. Bu bulgu, Kırlangıç kuyruğu bağlantı modelinin yüksek tutunma sağlarken yapısal bütünlüğünü koruyabilmesi için geometrik oranların optimizasyonunun şart olduğunu ortaya koymaktadır.

5.3. Dairesel Bağlantı Kenetlenme Modeli

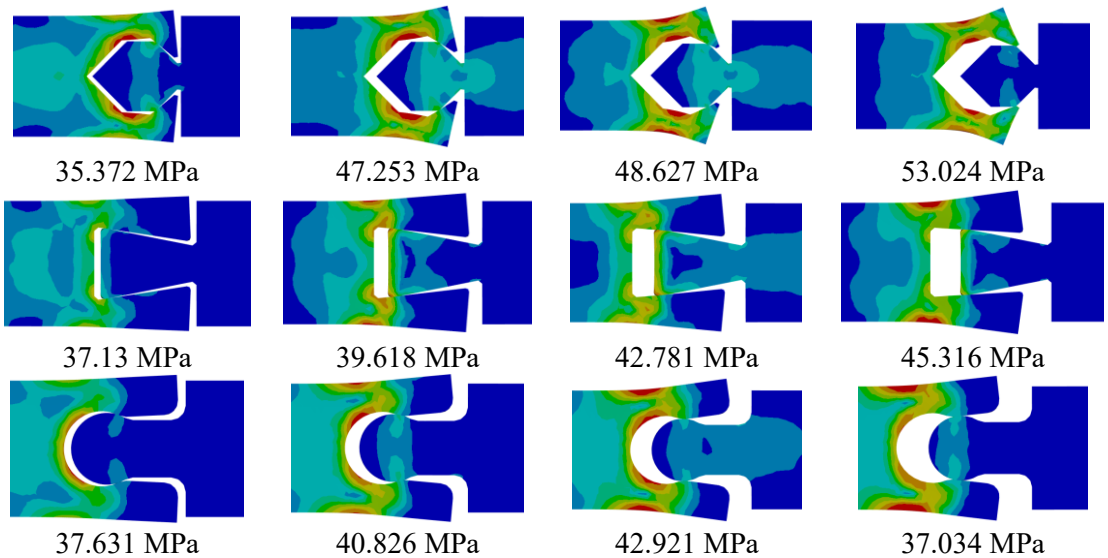
Dairesel bağlantı kenetlenme modeli, eğrisel yüzeylerin gerilme akışını yumuşatma potansiyeli nedeniyle modern bir tasarım yaklaşımı olarak ele alınmıştır. Analizler, bu geometride V84 parametresinin sistemin en hassas değişkeni olduğunu ve R85 ile birlikte optimize edildiğinde gerilme değerlerinin önemli ölçüde düştüğünü göstermiştir. Şekil 4.15'te sunulan; V84, H86 ve R85 parametrelerinin von-Mises gerilmesi üzerindeki etkisini gösteren 3B grafiklerimiz, Mihalache vd. (2022) çalışmasındaki parametrik yüzey eğrileriyle kıyaslandığında, girdi-çıktı ilişkisi bakımından tutarlı bir benzerlik sergilemektedir. Eğrisel yüzey parametrelerinin oluşturduğu bu karakteristik grafik yapısı, çalışmadaki parametre setinin literatürde kabul gören mekanik davranış sınırları içinde çalıştığını doğrulamaktadır. Bu temel parametrelere ek olarak, H86 parametresindeki değişimin yük merkezini kaydırarak gerilme dağılımını dengelediği, FD1 parametresinin ise boyun geçiş bölgesindeki sürekliliği sağlayarak ani gerilme artışlarını sönümlediği belirlenmiştir.

Şekil 5.1 (c.2)'de sunulan maksimum gerilme durumu, dairesel formun sağladığı geometrik süreklilik sayesinde keskin köşelerden kaynaklanan zayıflıkları nasıl bertaraf ettiğini açıkça ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, Frascio vd. (2024) tarafından incelenen eğrisel arayüzlerin, keskin köşeli yapılara kıyasla daha homojen bir gerilme dağılımı sağladığı yönündeki literatür bilgisiyle tam bir uyum içindedir. Eğrisel formlar, T-bağlantı ve Kırlangıç kuyruğu bağlantı modellerinde görülen ani gerilme sıçramalarını engelleyerek yükün arayüz boyunca daha akıcı bir şekilde transfer edilmesini sağlamıştır. Optimize edilmiş durum olan Şekil 5.1 (c.1) incelendiğinde, yapının neredeyse gerilmesiz bir formda yük aktardığı görülmektedir. Literatürde daha az rastlanan bu geometrinin, özellikle yorulma direnci ve tekrarlı yüklemeler söz konusu olduğunda, keskin köşeli muadillerine göre daha uzun ömürlü olabileceği, elde edilen düşük von-Mises değerleri

ile öngörülmektedir. Dairesel bağlantı modeli, geometrik sürekliliğin gerilme azaltmadaki önemini kanıtlamış ve en dengeli mekanik performansı sergilemiştir.

5.4. Optimum Kenetlenme Geometrilerinin Explicit Dynamics Çekme Testi

Önceki bölümlerde Kırlangıç kuyruğu bağlantı, Dairesel bağlantı ve T-bağlantı kenetlenme geometrileri üzerinde gerçekleştirilen detaylı statik yapısal analizler neticesinde, mekanik dayanımı en yüksek olan optimum kenetlenme formları belirlenmiştir. Bu bölümde, statik koşullarda doğrulanan söz konusu optimum tasarımların ani ve dinamik yükler altındaki deformasyon, gerilme ve kopma davranışlarını inceleyebilmek amacıyla Explicit Dynamics (Açık Dinamik) çekme simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Uygulanan bu dinamik çekme testleri, geliştirilen kenetlenme geometrilerinin gerçek çalışma şartlarına daha yakın koşullardaki yapısal bütünlüğünü ve güvenilirliğini ortaya koymayı amaçlamaktadır. Bu bağlamda, statik analizlerde yapının en fazla zorlandığı durumu ifade eden ve yük altındaki maksimum von-Mises gerilme dağılımını temsil eden Şekil 5.1'deki a.2, b.2, c.2 indisli optimum kenetlenme formlarının dinamik kopma sürecindeki adım adım deformasyon aşamaları Şekil 5.2'de verilmiştir.

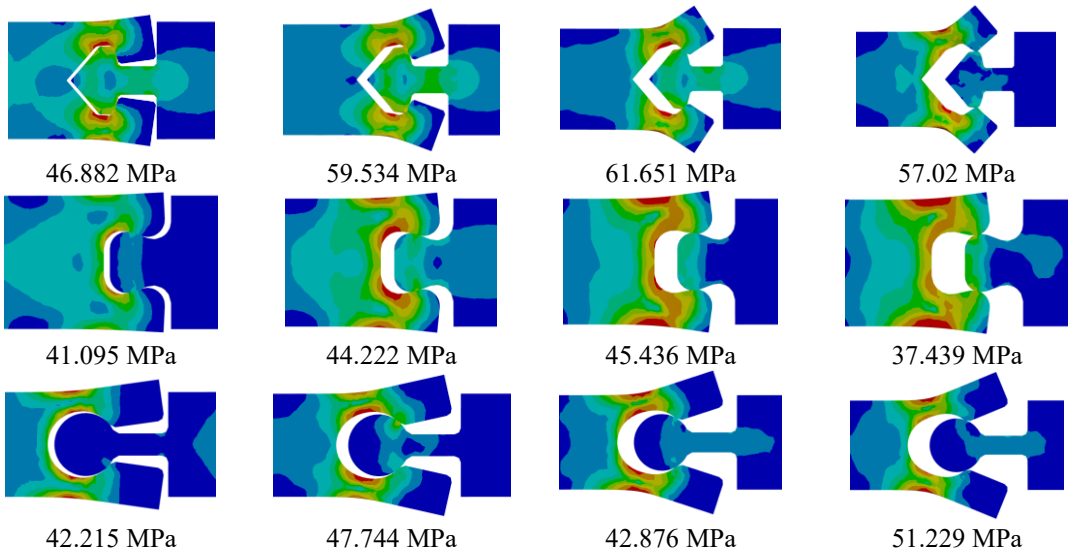


Şekil 5.3 von-Mises gerilmesini maksimize eden kenetlenme geometrilerinin dinamik çekme yükü altındaki deformasyon aşamaları ve eşdeğer gerilme dağılımları

Şekil 5.2 incelendiğinde, T-bağlantı kenetlenme modelinde yük aktarımının keskin iç köşelerde ani gerilme yığılmalarına neden olduğu ve çekme işlemi ilerledikçe bu sivri

hatlarda 53.024 MPa değerine ulaşan kritik gerilme yığılmalarının oluştuğu görülmektedir. Kırlangıç kuyruğu Bağlantı kenetlenme modelinde ise gerilme dağılımı T-bağlantı kenetlenme modeline kıyasla daha geniş bir yük taşıma alanına yayılsa da yapının açılı iç köşe geçişlerindeki yerel gerilme yoğunlaşmaları kopma başlangıcı için riskli bölgeler oluşturmaya devam etmektedir. Buna karşılık, Dairesel bağlantı kenetlenme modelinde keskin geometrik hatların yerini kavisli yüzeylerin alması gerilme yığılmalarını başarıyla minimize etmiş; yükün çok daha homojen bir şekilde aktarılarak statik analizlerde öngörülen Şekil 5.1 c.2'deki yumuşak gerilme geçişi davranışının dinamik süreçte de korunduğu doğrulanmıştır.

Statik optimizasyon çalışmaları sonucunda minimum von-Mises gerilme değerleri hedeflenerek elde edilen ideal kenetlenme geometrilerinin dinamik yükler altındaki performansları da Explicit Dynamics çekme simülasyonları ile incelenmiştir. Statik koşullarda en homojen gerilme dağılımını sunan bu özgün kenetlenme modellerinin, ani ve yüksek hızlı çekme kuvvetlerine karşı gösterdikleri yapısal tepkiler, deformasyon evreleri ve kopma davranışları adım adım analiz edilmiştir. Bu bağlamda, Şekil 5.1'de a.1, b.1 ve c.1 indisleriyle tanımlanan optimize tasarımların dinamik kopma sürecindeki aşamaları Şekil 5.3'te verilmiştir.



Şekil 5.4 Maksimum von-Mises gerilmesini minimize eden optimize kenetlenme geometrilerinin dinamik çekme yükü altındaki deformasyon aşamaları ve eşdeğer gerilme dağılımları

Şekil 5.3'te sunulan dinamik çekme aşamaları incelenerek, Şekil 5.1'de tanımlanan 1. indisli a.1, b.1, c.1 modellere ait yapısal davranışlar değerlendirilmiştir. T-bağlantı a.1

kenetlenme modelinde optimizasyona rağmen keskin geometrik hatların dinamik yük altında dezavantaj oluşturmaya devam ettiği ve çekme yönündeki iç köşelerde 61.651 MPa değerine ulaşan ani gerilme yığılmalarının meydana geldiği görülmektedir. Kırlangıç kuyruğu b.1 modelinde, yükün açılı yüzeylere daha geniş bir açıyla dağıtılması sayesinde maksimum gerilme nispeten daha düşük seviyelerde 45.436 MPa sınırlandırılmış olup, hasar başlangıcının yine bu köşe geçişlerinde yoğunlaştığı tespit edilmiştir. Diğer taraftan, Dairesel bağlantı c.1 modeli incelendiğinde; kavisli formun sağladığı avantajla gerilmenin bağlantı arayüzeyinde çok daha pürüzsüz yayıldığı, kopma evresine yaklaşırken oluşan yüksek gerilmelerin 51.229 MPa bölgesel bir yığılmadan ziyade malzemenin boyun verme davranışından kaynaklandığı ve yapının dinamik yükleri karşılama yeteneğinin statik optimizasyon sonuçlarıyla son derece uyumlu olduğu doğrulanmıştır.

Bu üç kenetlenme geometrisi genel bir çerçevede karşılaştırıldığında, T-bağlantı modeli üretim kolaylığı ve stabil yük aktarımı ile genel amaçlı uygulamalar için güvenilir bir seçenek sunarken Kırlangıç kuyruğu bağlantı modeli, mekanik kilitlenme mekanizmasıyla tasarım esnekliği sunan işlevsel bir alternatif oluşturmaktadır ancak keskin köşelerindeki gerilme yığılmaları dikkatli bir optimizasyon gerektirmektedir. Dairesel bağlantı modeli ise, optimize edildiğinde en düşük von-Mises gerilme değerlerine ulaşarak, geometrik sürekliliğin gerilme azaltmadaki önemini kanıtlamış ve en dengeli mekanik performansı sergilemiştir. T-bağlantı ve Kırlangıç kuyruğu bağlantı modelleri literatürde sıkça kıyaslansa da bu çalışma Dairesel bağlantı modelinin optimize edilmiş halinin, gerilme yönetimi açısından bu iki klasik modele güçlü bir alternatif olduğunu ortaya koymuştur.

Sonuç olarak, bu tez çalışması ile eklemeli imalatla üretilen çok parçalı yapılarda, YYM ve MOGA tabanlı optimizasyon yöntemlerinin arayüz dayanımını artırmada etkin bir araç olduğu gösterilmiştir. Bununla birlikte her bir geometri için kritik tasarım parametreleri belirlenmiş ve bu parametrelerin etkileri sayısallaştırılarak literatürdeki boşluk doldurulmuştur. Ayrıca eğrisel geometrilerin, keskin köşeli geometrilere kıyasla gerilme yığılmalarını sönümlemede daha başarılı olduğu tespit edilmiştir.

Bu tez çalışmasından elde edilen bulgular, incelenen üç kenetlenme geometrisinin farklı

endüstriyel sektörlerdeki potansiyel uygulamalarına doğrudan ışık tutmaktadır. T-bağlantı modeli, üretim kolaylığı ve stabil yük aktarımı sayesinde özellikle inşaat sektöründe prefabrike beton panellerin birleştirilmesinde, çelik konstrüksiyonlarda kiriş-kolon bağlantılarında ve gemi inşasında modüler bölme duvarlarının montajında güvenilir bir çözüm sunmaktadır. Kırlangıç kuyruğu bağlantı modeli ise mekanik kilitlenme prensibiyle özellikle ahşap mobilya endüstrisinde çekmece kenetlerinde, havacılıkta kompozit kanat profillerinin birleştirilmesinde ve otomotiv sektöründe plastik enjeksiyon parçaların modüler konsollarında tasarım esnekliği sağlamakla birlikte, keskin köşelerindeki gerilme yığılmaları nedeniyle yorulma yükü taşıyan kritik bileşenlerde dikkatli optimizasyon gerektirmektedir. Dairesel bağlantı modeli ise, optimize edildiğinde en düşük von-Mises gerilme değerlerine ulaşarak geometrik sürekliliğin önemini kanıtlamıştır; bu özelliğiyle biyomedikal alanda uyluk kemiği protezlerinde implant-kemik arayüzünde, robotikte modüler eklem bağlantılarında, rüzgâr türbini kanatlarının segmentli yapılarında ve eklemeli imalatla üretilen ısı eşanjörlerinde katmanlar arası bağlantı dayanımının kritik olduğu uygulamalarda en dengeli mekanik performansı sergilemektedir. Sonuç olarak, bu çalışma dairesel bağlantı modelinin optimize edilmiş halinin, havacılıkta kanat altı ekipman bağlantıları gibi yüksek gerilme yönetimi gerektiren alanlarda klasik T-bağlantı ve kırlangıç kuyruğuna güçlü bir alternatif olduğunu ortaya koyarken; inşaat ve mobilya gibi geleneksel sektörlerde ise her geometrinin kendine özgü imalat ve yük aktarım avantajlarıyla tercih edilebileceğini göstermektedir.

Bu çalışmadan elde edilen bulgular ışığında, gelecekteki çalışmalar için aşağıda sunulan önerilerde bulunulabilir:

- Bu tezde sayısal olarak optimize edilen kenetlenme arayüz geometrilerinin, farklı mekanik özelliklere sahip çeşitli malzeme çiftlerine uygulanarak analiz edilmesi, önerilen tasarım yaklaşımının malzeme bağımsız genellenebilirliğini ortaya koyacaktır.
- Elde edilen sayısal simülasyon sonuçlarının, üretilen numuneler üzerinde gerçekleştirilecek deneysel çekme testleri ile doğrulanması, sonlu elemanlar modellerinin fiziksel gerçeklikle olan korelasyonunu ve güvenilirliğini önemli

ölçüde güçlendirecektir.

- Çalışmada sadece tek eksenli çekme yükü dikkate alınmıştır; ileriki çalışmalarda eğilme, burulma ve darbe yükleri altındaki davranışların incelenmesi, arayüz performansının çok yönlü karakterizasyonu için faydalı olacaktır.
- Mevcut çalışmada kenetlenme arayüzü bağlantı modellerinin performansı, Static Structural yöntemleriyle değerlendirilmiştir. Ancak, özellikle kopma anındaki ani kırılma davranışlarını, çatlak ilerlemesini ve yüksek şekil değiştirme oranlarını daha hassas simüle edebilmek adına, ileriki çalışmalarda Explicit Dynamics analiz yöntemlerinin kullanılması, kenetlenme arayüzlerinin mekanik performansını anlamak için daha detaylı veriler sunacaktır.
- Katmanlar arası yapışma ve baskı yönü gibi üretim parametrelerinin, optimize edilmiş geometrilerin performansı üzerindeki etkilerinin araştırılması, MMAM ile imalat literatürüne ve kenetlenme arayüzü optimizasyon çalışmalarına önemli katkılar sağlayacaktır.

6. KAYNAKLAR

Bandyopadhyay A, Heer B, 2018, Additive Manufacturing of Multi-Material Structures, Materials Science and Engineering: Reports, 129, 1-16.

Dairabayeva D, Perveen A, Talamona D, 2023, Investigation on the Mechanical Performance of Mono-Material vs Multi-Material İnterface Geometries Using Fused Filament Fabrication, Rapid Prototyping Journal, 29, 40-52.

Davaasambuu K, Dong Y, Pramanik A, Basak K, 2025, Mechanisms and Performance of Composite Joints Through Adhesive and Interlocking Means A Review, Journal of Composites Science, 9, 359.

Demirel S, Manav N, 2025, Comparison of Tensile Strength of Furniture Dovetail Fasteners Produced with 3d Printers and Those Produced with İnjection Molding Method, Turkish Journal of Forestry, 26, 617-623.

Dengiz O, 2017, Endüstri 4.0: Üretimde Kavram ve Algı Devrimi. Makina Tasarım ve İmalat Dergisi, 15, 38-45.

Ermolai V, Sover A, Boca M A, Mihalache A M, Irimia A I, Hrițuc A, Slătineanu L, Nagîț G, Stavarache R C, 2024, Mechanical Behavior of Macroscopic İnterfaces for 3D Printed Multi-Material Samples Made of Dissimilar Materials, Mechanics & Industry, 25, 24.

Fenollosa F, Gomà J R, Buj-Corral I, Otero A T, Minguella-Canela J, Uceda R, Valls A, Ayats M, 2019, Foreseeing New Multi-Material FFF-Additive Manufacturing Concepts Meeting Mimicking Requirements with Living Tissues, Procedia Manufacturing, 41, 1063-1070.

Frascio M, Zafferani A, Monti M, Avalle M, 2024, Investigating Enhanced İnterfacial Adhesion in Multi-Material Filament 3D Printing: a Comparative Study of T and Mickey Mouse Geometries, Progress in Additive Manufacturing, 9(6), 2113-2122.

Groumpos P P, 2021, A Critical Historical and Scientific Overview of All Industrial Revolutions, IFAC-PapersOnLine, 54, 464-471.

Güdek B, 2023, Endüstriyel Dönüşüm ve Endüstri 5.0, Ömer Halisdemir Üniversitesi,

İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 16(4), 1129-1142.

Hadiyat M A, Sopha B M, Wibowo B S, 2022, Response Surface Methodology Using Observational Data: A Systematic Literature Review. Applied Sciences, 12(20), 10663.

Han D, Lee H, 2020, Recent Advances in Multi-Material Additive Manufacturing: Methods and Applications, Current Opinion in Chemical Engineering, 28, 158-166.

Hisada S, Minakuchi S, Takeda N, 2020, Damage Tolerance İmprovement of Composite T-Joint Under Pull-Up Conditions Using an İnterlocking-Fiber-Based Crack Arrester, Composite Structures, 253, 112792.

Ilgin H, Karjalainen M, 2024, Dovetail Massive Wood Board Elements, 79, 114-119.

Kadiroğlu S, Seçgin Ö, 2025, Eklemeli İmalat Yöntemi İle Bağlantı Elemanı Üretiminin Araştırılması, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 93s, Sakarya.

Kakaraparthi S, Chen N, 2023, A Multi-Material Additive Manufacturing Virtual Prototyping Method for Design to İmprove Part Strength, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 127, 1505-1516.

Karagöz İ, Danış Bekdemir A, Tuna Ö, 2021, 3B Yazıcı Teknolojilerindeki Kullanılan Yöntemler ve Gelişmeler Üzerine Bir Derleme, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 9, 1186-1213.

Kepenekçi M, 2021, Mechanical Behavior Of Additively Manufactured Polymer Composite Structures And Interfaces, Middle East Technical Unıversity, The Graduate School Of Natural And Applied Sciences, Master's Thesis, 84p, Ankara.

Kılıç R, 2023, Sanayi Devrimlerinin Serüveni: Endüstri 1.0'dan Endüstri 5.0'a, Takvim-i Vekayi, 11, 276-291.

Li X, Zhu Z, Li Y, Hu Z, 2020, Design and Mechanical Analysis of a Composite T-Type Connection Structure for Marine Structures. Polish Maritime Research, 27, 145-157.

Liu B, Xu Y, Cao W, Lu P, Huang C, 2024, Cooperative Enhancement of Multi-Material İnterface Strength by Mechanical İnterlocking Structures and FDM Path Planning, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 134(9-10), 4099-4115.

Liu F, Li T, Jiang X, Jia Z, Xu Z, Wang L, 2020, The Effect of Material Mixing on İnterfacial Stiffness and Strength of Multi-Material Additive Manufacturing, Additive Manufacturing, 36, 101502.

Lumpe T S, Mueller J, Shea K, 2019, Tensile Properties of Multi-Material İnterfaces in 3D Printed Parts, Materials & Design, 162, 1-9.

Mihalache A M, Ermolai V, Sover A, Nagîț G, Boca M A, Slătineanu L, Hrițuc A, Dodun O, Rîpanu M I ,2022, Tensile Behavior of Strip Ends Made of Polymeric Materials, Polymers, 14(22), 4990.

Mustafa I, Kwok T, 2022, Interlacing Infills for Multi-Material Fused Filament Fabrication Using Layered Depth Material Images, Micromachines, 13(5), 773.

Nazir A, Gokcekaya O, Masum Billah K, Ertugrul O, Jiang J, Sun J, Hussain S, 2023, Multi-Material Additive Manufacturing: A Systematic Review of Design, Properties, Applications, Challenges, and 3D Printing of Materials and Cellular Metamaterials, Materials & Design, 226, 111661.

Nursultan Z, Marco C, Balbayev G, 2023, A Portable Robotic System for Ankle Joint Rehabilitation, Electronics, 12, 4271.

Peralta Marino G, De la Pierre S, Salvo M, Díaz Lantada A, Ferraris M, 2022, Modelling, Additive Layer Manufacturing and Testing of İnterlocking Structures for Joined Components, Scientific Reports, 12(1), 2526.

Raschke S U, 2022, Limb Prostheses: Industry 1.0 to 4.0: Perspectives on Technological Advances in Prosthetic Care, Frontiers in Rehabilitation Sciences, 3.

Rezaei S, Rahimi A, Parvizian J, Mansourzadeh S, Düster A, 2022, Dimensional Optimization of a Two-Body Wave Energy Converter Using Response Surface Methodology, Ocean Engineering, 261, 112186.

Ribeiro M, Sousa Carneiro O, Ferreira da Silva A, 2019, Interface Geometries in 3D

Multi-Material Prints by Fused Filament Fabrication, Rapid Prototyping Journal, 25(1), 38-46.

Rossing L, Scharff R B N, Chömpff B, Wang C C L, Doubrovski E L, 2020, Bonding Between Silicones and Thermoplastics Using 3D Printed Mechanical İnterlocking, Materials & Design, 186, 108254.

Sebera V, Simek M, 2014, Finite Element Analysis of Dovetail Joint Made with the Use of CNC technology, Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis, 58, 321-328.

Test Method for Tensile Properties of Plastics, 2014, ASTM D638 International.

Tezel T, 2019, Üç Boyutlu Metal Yazıcı Teknolojisi ile Üretilen Metal Dişlilerin Geleneksel İmalat Yöntemiyle Üretilenler Yerine Kullanılabilirliğinin Deneysel Olarak İncelenmesi, Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 84s, Antalya.

Urai K, Nakata Y, Nakamura Y, Ishiguro H, 2016, Development of a Large Moving Range Shoulder Joint for a Humanoid Robot, Journal of the Robotics Society of Japan, 34(9), 623-630.

Wu W, Xu W, Wu S, 2024, Mechanical Performance Analysis of Double-Dovetail Joint Applied to Furniture T-Shaped Components, BioResources, 19, 5862-5879.

Yadav D, Chhabra D, Kumar Garg R, Ahlawat A, Phogat A, 2020, Optimization of FDM 3D Printing Process Parameters for Multi-Material Using Artificial Neural Network. Materials Today: Proceedings, 21, 1583-1591.

Yadav S, Pawar S, Sambare A, Deshpande S, 2024, Finite Element Analysis and Design Optimization of Composite T-Joints for Enhanced Maritime and Aerospace Applications, Engineering Solid Mechanics, 12, 157-164.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Oktay Gökhan ÇELİK

Doğum Yeri ve Tarihi : Ankara, 22.10.1997

Yabancı Dili : İngilizce

İletişim (Telefon / e-posta) : oktaygokhan_celik@hotmail.com

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Açık Öğretim Lisesi (2011 – 2015)

Lisans : Kırıkkale Üniversitesi, Makine Müh. Böl., (2016– 2020)

Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Ens., Makine Müh ABD, (2023 – 2026)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

: Omtes Makina (2022 – 2023)

: MP System Pano (2023 – 2023)

: Toprak Mahsulleri Ofisi (2023 – 2024)

: Sağlık Bakanlığı Sağlık Yatırımları Genel Müdürlüğü (2023 – 2024)

: Çelik İnşaat (2025 – 2025)