

**EKLEMELİ İMALAT ALANINDA KULLANILAN BAĞLANTI
ELEMENLARININ ARAŞTIRILMASI VE YENİ TASARIMLARIN ORTAYA
ÇIKARILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Shadi Essam Saeed SAIF

Danışman

Doç. Dr. Özgür VERİM

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Temmuz 2026

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EKLEMELİ İMALAT ALANINDA KULLANILAN BAĞLANTI
ELEMANLARININ ARAŞTIRILMASI VE YENİ TASARIMLARIN
ORTAYA ÇIKARILMASI

Shadi Essam Saeed SAIF

Danışman

Doç. Dr. Özgür VERİM

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Temmuz 2026

TEZ ONAY SAYFASI

Adı SOYADI tarafından hazırlanan “Tez Onay Sayfası” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca GG / AA / YYYY tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği / oy çokluğu** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Anabilim Dalı Adı Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ / DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Ünvanı Adı SOYADI

İkinci Danışman : Ünvanı Adı SOYADI

Başkan : Ünvanı Adı SOYADI
Üniversite adı, Fakültesi **İmza**

Üye : Ünvanı Adı SOYADI
Üniversite adı, Fakültesi **İmza**

Üye : Ünvanı Adı SOYADI
Üniversite adı, Fakültesi **İmza**

Üye : Ünvanı Adı SOYADI
Üniversite adı, Fakültesi **İmza**

Üye : Ünvanı Adı SOYADI
Üniversite adı, Fakültesi **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 çalışmada;

- 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.

20 / 07 / 2026

İmza

Shadi Essam Saeed SAIF

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

EKLEMELİ İMALAT ALANINDA KULLANILAN BAĞLANTI ELEMANLARININ ARAŞTIRILMASI VE YENİ TASARIMLARIN ORTAYA ÇIKARILMASI

Shadi Essam Saeed SAIF

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. ÖZGÜR VERİM

Eklemeli imalat, hafif ve geometrik açıdan karmaşık yapıların üretimini mümkün kılmakta ve bu yapılar yük taşıyıcı mühendislik uygulamalarında giderek daha fazla kullanılmaktadır. Bununla birlikte, eklemeli imalatla üretilen bileşenlerde bağlantı arayüzlerinin mekanik güvenilirliği, özellikle polimer tabanlı kafes yapılar mekanik bağlantı elemanları ile birleştirildiğinde önemli bir zorluk oluşturmaktadır. Bu çalışmada, eksenel çekme yükü altında fonksiyonel olarak derecelendirilmiş üçlü periyodik minimal yüzey (TPMS) kafes yapılarının mekanik performansı nümerik olarak incelenmiştir. Gyroid, Diamond ve Schwarz-P TPMS kafes yapıları nTop programı yardımıyla tasarlanmış, bağıl yoğunluk (%65, %75, %85 ve %100 katı yapı) ve bağlantı elemanı türünün etkisi değerlendirilmiştir.

Bağlantı sistemleri, yerleştirme yöntemleri ve yük aktarım mekanizmalarına göre üç gruba ayrılmıştır: Birinci grup ısı uygulanarak yerleştirilen doğrudan etkileşimli insert sistemlerini (Helisel Insert ve Düz Insert) içermektedir. İkinci grup ısı işlem olmaksızın mekanik tutunma sağlayan insert sistemlerinden (Altıköşe Başlı Pres Insert, Ahşap Insert, Helicoil Insert, Genleşen Insert ve Kendinden Kılavuzlu Insert) oluşmaktadır. Üçüncü grup ise gömülü/iç bağlantı elemanı sistemlerini (Ağaç Somun, Kare Somun ve Altıköşe Başlı Somun) kapsamaktadır. Sonlu eleman analizleri (SEA), ANSYS Workbench ortamında 500 N eksenel çekme yükü altında gerçekleştirilmiş; deformasyon, eşdeğer von Mises gerilmesi ve gerinim davranışı değerlendirilmiştir.

Sonuçlar, bağıl yoğunluğun artmasının tüm konfigürasyonlarda deformasyon ve gerilme yoğunlaşmalarını azalttığını göstermiştir. Isıl sistemlerde (1. Grup) Düz İnsert, mekanik sistemlerde (2. Grup) Helicoil ve Ahşap İnsert daha üstün mekanik performans sergilerken, Genleşen İnsert tüm doğrudan etkileşimli aparatlar arasında en yüksek deformasyon ve gerilme değerlerini göstermiştir. Gömülü sistemlerde (3. Grup) ise Ağaç Somun en düşük deformasyon ve gerilme değerlerini üretmiştir. TPMS topolojileri arasında Diamond yapısı, özellikle yüksek yoğunluklarda, daha homojen yük aktarımı ve üstün mekanik performans göstermiştir. Bulgular, optimize edilmiş TPMS tasarımının uygun bağlantı elemanı seçimi ile birleştirilmesinin, eklemeli imalatla üretilen yük taşıyıcı bileşenlerin mekanik güvenilirliğini önemli ölçüde artırabileceğini göstermektedir.

2026, xiii + 65 sayfa

Anahtar Kelimeler: Eklemeli İmalat, Üçlü Periyodik Minimal Yüzeyler (TPMS), İnsert, Somun, Sonlu Elemanlar Analizi.

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF CONNECTION APPARATUSES USED IN THE FIELD OF ADDITIVE MANUFACTURING AND DEVELOPMENT OF NOVEL DESIGNS

Shadi Essam Saeed SAIF

Afyon Kocatepe University

Institute of Science

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Özgür VERİM

Additive manufacturing enables the fabrication of lightweight and geometrically complex structures, making them increasingly attractive for load-bearing engineering applications. However, the mechanical reliability of joint interfaces in additively manufactured components remains a significant challenge, particularly when polymer-based lattice structures are combined with mechanical fastening systems. In this study, the mechanical performance of functionally graded Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) lattice structures under axial pull-out loading was numerically investigated. Gyroid, Diamond, and Schwarz-P TPMS lattice structures were designed using nTop software, and the effects of relative density (65%, 75%, 85%, and 100% solid) and fastening system type were evaluated.

The fastening systems were classified into three groups according to their installation method and load-transfer mechanism. The first group consisted of thermally installed direct-interaction insert systems, including helical knurl inserts and straight knurl inserts. The second group comprised mechanically retained insert systems, including hexagonal press-fit inserts, Woodfit inserts, Helicoil inserts, expanding inserts, and self-tapping threaded inserts. The third group consisted of embedded/internal fastening systems, including Woodfit nuts, square nuts, and hexagonal nuts. Finite Element Analyses (FEA) were performed in ANSYS Workbench 2025 R2 under a 500 N axial pull-out load. Total

deformation, equivalent von Mises stress, and equivalent strain were evaluated.

The results demonstrated that increasing the relative density reduced deformation and stress concentrations across all configurations. Within the thermally installed systems (Group 1), the straight threaded insert exhibited the best mechanical performance. Among the mechanically retained insert systems (Group 2), the Helicoil insert and Woodfit insert showed superior mechanical performance, whereas the expanding insert produced the highest deformation and stress values among all direct-interaction fastening systems. Within the embedded/internal fastening systems (Group 3), the Woodfit nut exhibited the lowest deformation and stress values. Among the investigated TPMS topologies, the Diamond structure demonstrated more uniform load transfer and superior mechanical performance, particularly at higher relative densities. These findings indicate that combining optimized TPMS lattice structures with an appropriate fastening system can significantly improve the mechanical reliability of load-bearing components manufactured by additive manufacturing.

2026, xiii + 65 pages

Keywords: Additive Manufacturing, Triply Periodic Minimal Surfaces (TPMS), Insert, Nut, Finite Element Analysis.

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Özgür VERİM 'e ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme teşekkür ederim.

Shadi Essam Saeed SAIF

Afyonkarahisar 2026

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
RESİMLER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	3
2.1. Bağlantı yöntemleri.....	3
2.1.1. Yapıştırıcı ile Birleştirme.....	4
2.1.2. Kaynak ile Birleştirme	5
2.1.3. Mekanik Bağlantı ile Birleştirme	5
2.1.3.1. Birbiriyle Kenetlenme Bağlantısı.....	6
2.1.3.2. Vida-Somun Bağlantısı	7
2.1.3.3. Snap-Fit (Esneyerek Kilitlenme) Bağlantısı	8
2.1.3.4. İnsert Somun Bağlantısı	9
2.1.3.5. Özel İnsert Bağlantısı.....	10
2.2. Hücresel Yapılar	10
3. MATERYAL ve METOT	14
3.1. TPMS Tasarım Yaklaşımları	14
3.2. Farklı Bağlantı Sistemleri Tasarımı	17
3.2.1. İnsert ve Benzeri Bağlantı Aparatları.....	17
3.3. Malzeme Özellikleri.....	27
3.4. Sonlu Elemanlar Analizi	28
3.4.1. Birinci Aşama: İnsert Somun ve Benzeri Bağlantı Aparatlarının Olmaması Durumunda TPMS Kafes Yapılı Numunelerin Analizi.....	28
3.4.2. İkinci Aşama: İnsert Somun ve Benzeri Bağlantı Aparatlarının Olma Durumunda FD TPMS Kafes Yapılı Numunelerin Analizi.....	30
4. BULGULAR.....	33
4.1. Düzenli ve FD Kafes Yapılarının Karşılaştırılması	33
4.2. Gyroid, Diamond ve Schwarz-P Kafes Yapılarının Karşılaştırılması	35

4.2.1. Düzenli Kafes Yapısının Karşılaştırmalı Analizi.....	35
4.2.2. FD Kafes Yapısının Karşılaştırmalı Analizi	36
4.3. Kafes Yapılarında Doluluk Oranının Etkisi.....	36
4.4. FD TPMS Kafes Yapılarında İnsert Somun ve Benzeri Bağlantı Aparatlarının Karşılaştırmalı Analizi	37
4.4.1. Isı ile Yerleştirilen Doğrudan Etkileşimli İnsert Sistemleri (Birinci Grup)...	38
4.4.2. Mekanik, Pres ve Kendinden Dış Açan İnsert Sistemlerinin Karşılaştırmalı Performansı (İkinci Grup).....	41
4.4.3. FD TPMS Yapılarında Gömülü/İç Bağlantı Elemanı Sistemlerinin Karşılaştırmalı Performansı (Üçüncü Grup).....	46
4.5. Özel Durum Çalışması: Kenetlenmeli Eklemeli İmalat İnsert Sisteminin Karşılaştırmalı Performansı.....	53
5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR	57
5.1. FD Kafes Yapısının Mekanik Performansa Katkısı.....	57
5.2. TPMS Kafes Yapısının Mekanik Performans Karşılaştırması	57
5.3. Isıl/Isıtılarak Yerleştirilen İnsert Sistemlerinin Mekanik Performansı (Birinci Grup)	58
5.4. Mekanik, Pres ve Kendinden Dış Açan İnsert Sistemlerinin Mekanik Performansı (İkinci Grup).....	58
5.5. FD TPMS Yapılarında Gömülü/İç Bağlantı Elemanı Sistemlerinin Mekanik Performanslarının Karşılaştırılması (Üçüncü Grup)	59
5.6. Doluluk Oranı Artışının Etkisi ve Optimum Aralığın Belirlenmesi	59
6. KAYNAKLAR	60
ÖZGEÇMİŞ.....	65

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

ρ_r	Bağıl Yoğunluk
ϕ_{solid}	Katı cismin yoğunluğu
ϕ_{Lattice}	Kafes yapısının yoğunluğu
C	Sabit
n	Sabit

Kısaltmalar

Eİ	Eklemeli İmalat
3B	Üç Boyutlu
FDM	Eriyik Yığma Modellemesi
FFF	Eriyik Filament İmalatı
EFÜ	Eriyik Filament Üretimi
ABS	Akrilonitril Bütadien Stiren
PLA	Polilaktik Asit
PC	Polikarbonat
FGLS	Fonksiyonel Olarak Derecelendirilmiş Kafes Yapı
TPMS	Üçlü Periyodik Minimal Yüzeyler
nTop	nTopology
Hex	Hexagon
MPa	Megapaskal
mm	Milimetre
FE	Finite Element
SEA	Sonlu Eleman Analizleri
FD	Fonksiyonel Derecelendirilmiş

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 4.1 Düzenli ve Fonksiyonel Derecelendirilmiş Kafeslerde Deformasyonun Karşılaştırmalı Performansı	34
Şekil 4.2 Düzenli ve Fonksiyonel Derecelendirilmiş Kafeslerde Gerilmenin Karşılaştırmalı Performansı	34
Şekil 4.3 Düzenli Kafes Yapısının Karşılaştırılması.....	35
Şekil 4.4 FD Kafes Yapılarının Karşılaştırması.....	36
Şekil 4.5 TPMS Yapılarında Mekanik, Pres ve Kendinden Dış Açan İnsertlerin Deformasyon Analizi	45
Şekil 4.6 FD TPMS Yapılarında Mekanik, Pres ve Kendinden Dış Açan İnsertlerin Eşdeğer Gerilme Analizi	46
Şekil 4.7 FD TPMS Kafes Yapılarında Gömülü/İç Bağlantı Elemanı Sistemlerinin Deformasyonunun Karşılaştırmalı Performansı	52
Şekil 4.8 FD TPMS Yapılarında Gömülü/İç Bağlantı Elemanı Sistemlerinin Gerilmesinin Karşılaştırmalı Performansı.....	53
Şekil 4.9 Tasarlanan Özel İnsert Dübel yapısı ile standart insert ve diğer bağlantı aparatlarının TPMS kafes yapısındaki deformasyon karşılaştırması	55
Şekil 4.10 Tasarlanan Özel İnsert Dübel yapısı ile standart insert ve diğer bağlantı aparatlarının TPMS kafes yapısındaki eşdeğer von Mises gerilme karşılaştırması	56

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1 FD TPMS kafes yapıları için hedef yoğunluğa ulaşmak amacıyla atanan duvar kalınlıkları	17
Çizelge 3.2 Eİ alanında kullanılan insert somun ve benzeri bağlantı aparatları	18
Çizelge 3.3 Sayısal Simülasyonlarda Kullanılan Malzemelerin Mekanik Özellikleri	28
Çizelge 4.1 Düzenli ve Fonksiyonel Olarak Derecelendirilmiş Kafeslerin Karşılaştırmalı Performansı	33
Çizelge 4.2 Artan Doluluk Oranı ile Deformasyon Azalması (Fonksiyonel Olarak Derecelendirilmiş Yapılar)	37
Çizelge 4.3 Artan Doluluk Oranı ile Eşdeğer von Mises Gerilim Değişimi	37
Çizelge 4.4 FD TPMS Yapılarında Isıl Yerleştirilen İntert Aparatlarının Deformasyonlarının Karşılaştırmalı Performansı.....	40
Çizelge 4.5 FD TPMS Yapılarında Isıl Yerleştirilen İntert Aparatlarının Eşdeğer von Mises Gerilmelerinin Karşılaştırmalı Performansı	40
Çizelge 4.6 FD TPMS Yapılarında Isıl Yerleştirilen İntert Aparatlarının Gerinimlerinin Karşılaştırmalı Performansı.....	41
Çizelge 4.7 FD TPMS Yapılarında Mekanik, Pres ve Kendinden Dış Açan İntertlerin Deformasyon Analizi	42
Çizelge 4.8 FD TPMS Yapılarında Mekanik, Pres ve Kendinden Dış Açan İntertlerin Eşdeğer Gerilme Analizi	43
Çizelge 4.9 FD TPMS Yapılarında Mekanik, Pres ve Kendinden Dış Açan İntertlerin Gerinim Analizi	44
Çizelge 4.10 FD TPMS Kafes Yapılarında Gömülü/İç Bağlantı Elemanı Sistemlerinin Deformasyonunun Karşılaştırmalı Performansı	47
Çizelge 4.11 FD TPMS Kafes Yapılarında Gömülü/İç Bağlantı Elemanı Sistemlerinin Gerilmesinin Karşılaştırmalı Performansı.....	47

Çizelge 4.12 FD TPMS Yapılarında Gömülü/İç Bağlantı Elemanı Sistemlerinin Geriniminin Karşılaştırmalı Performansı.....	48
Çizelge 4.13 TPMS Kafes Yapıları ve Katı Modelin (%100) Deformasyon Sonuçları.....	54
Çizelge 4.14 TPMS Kafes Yapıları ve Katı Modelin (%100) Eşdeğer von Mises Gerilme Sonuçları	54
Çizelge 4.15 TPMS Kafes Yapıları ve Katı Modelin (%100) Gerinim Sonuçları	54

RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 2.1 3B Baskı ile üretilen parçalar üzerinde bağlantı yöntemleri.....	4
Resim 2.2 (a) Yapıştırıcı ile Birleştirme, (b) Kaynak ile Birleştirme	5
Resim 2.3 Mekanik bağlantı türleri	6
Resim 2.4 (a) Vida – somun bağlantıları (b) Somunlar için 3B baskı ile üretilmiş boşluklu yapılar (İnt. Kyn. 3, İnt. Kyn. 4)	8
Resim 2.5 3B baskı parçalarının birleştirilmesi için özel tasarlanmış dübel	10
Resim 2.6 Hücresel Yapı Türleri	11
Resim 2.7 Farklı tipte kafes hücre tipi.....	12
Resim 2.8 (a) Homojen hücreli düzenli kafes yapısı, (b) FD kafes yapısı	13
Resim 3.1 nTop programında farklı TPMS türlerini oluşturmak için kullanılan denklemler (İnt. Kyn. 5).....	15
Resim 3.2 (a) Dikdörtgen hücre haritası, (b) TPMS hücresel yapı.....	16
Resim 3.3 Helisel İnsert.....	19
Resim 3.4 Düz İnsert	19
Resim 3.5 Helicoil Insert	20
Resim 3.6 Kendinden kılavuzlu insertler.....	21
Resim 3.7 Altıgen pres geçmeli insert.....	22
Resim 3.8 Ahşap Dübeli	22
Resim 3.9 Genleşen İnsert	23
Resim 3.10 Ağaç Somun	24
Resim 3.11 Altıgen Somunlar.....	25
Resim 3.12 Kare Somunlar.....	25
Resim 3.13 Özel İnsert Dübel: 1a insert, 2a klip ve 3a Özel Dübel	26

Resim 3.14 Düzenli ve FD TPMS kafes yapısı	29
Resim 3.15 Düzenli ve Fonksiyonel Ağ Yapısı.....	29
Resim 3.16 İnsert somun ve benzeri bağlantı aparatlarından oluşan montaj ve TPMS kafes yapısının FE modeli	32
Resim 4.1 Düz İnsert – Diamond – %85 – Deformasyon.....	39
Resim 4.2 Düz İnsert – Diamond – %85 – Gerilme	39
Resim 4.3 Genleşen İnsert – Diamond – %85 – Deformasyon ...	Error! Bookmark not defined.
Resim 4.4 Genleşen İnsert – Diamond – %85 – Gerilme	Error! Bookmark not defined.
Resim 4.5 Ağaç Somun, Schwarz-P, %85, Toplam Deformasyon.....	49
Resim 4.6 Ağaç Somun, Schwarz-P, %85, Eşdeğer von Mises Gerilmesi	49
Resim 4.7 Kare Somun, Schwarz-P, %85, Toplam Deformasyon	50
Resim 4.8 Kare Somun, Schwarz-P, %85, Eşdeğer von Mises Gerilmesi	50
Resim 4.9 Altıköşe Başlı Somun, Schwarz-P, %85, Toplam Deformasyon	51
Resim 4.10 Altıköşe Başlı Somun, Schwarz-P, %85, Eşdeğer von Mises Gerilmesi.....	52
Resim 4.11 Özel İnsert Dübel, Diamond, %85, Toplam Deformasyon.....	54
Resim 4.12 Özel İnsert Dübel, Diamond, %85, Eşdeğer von Mises Gerilmesi.....	55

1. GİRİŞ

Eklemeli İmalat (*Eİ, Additive Manufacturing-AM*) tasarım esnekliği, malzeme tasarrufu ve hızlı prototipleme gibi avantajlarıyla son yıllarda mühendislik, otomotiv, havacılık ve medikal gibi birçok sektörde önemli bir yer edinmiştir. Özellikle sandviç paneller gibi hafif ve dayanıklı yapıların üretiminde Eİ teknolojilerinin kullanımı (Ahmed vd. 2021), geleneksel üretim yöntemlerine alternatif oluşturarak maliyet ve zaman açısından önemli kazanımlar sağlamaktadır. Bununla birlikte, eklemeli imalatla üretilen yapıların mekanik performansı, kullanılan bağlantı elemanları, yüzey tasarımı, doluluk deseni ve doluluk oranı gibi birçok parametreye bağlıdır. Bu bağlamda, bağlantı elemanlarının ve yüzey tasarımının mekanik performansa olan etkilerini anlamak, dayanıklı ve güvenilir yapılar tasarlamak için kritik öneme sahiptir (Severson vd. 2024).

Bu tezin bilime katkısı, eklemeli imalatla üretilen parçalarda farklı bağlantı elemanlarının (ısı ile yerleştirilen insertler, geçme bağlantılar vd.) (Troughton 2008) ve yüzey tasarımlarının (farklı doluluk desenleri ve doluluk oranları) çekme dayanımları üzerindeki etkilerini sistematik ve nümerik bir yaklaşımla ortaya koymaktır. Literatürde benzer konularda çalışmalar bulunsa da bu tez hem doluluk deseni ve doluluk oranlarının hem de farklı bağlantı elemanlarının performansa etkisini birlikte inceleyerek alandaki bilgi boşluğunu doldurmayı amaçlamaktadır (Dezaki ve Mohd Ariffin 2020, Lohuis vd. 2024). Böylece, Eİ teknolojilerinin mühendislik uygulamalarında daha etkin kullanılmasına yönelik önemli bulgular sunacaktır.

Uygulama açısından, bu tez çalışması; otomotiv ve havacılık sektörlerinde hafif ve dayanıklı yapıların tasarımında, mobilya endüstrisinde hızlı ve ekonomik bağlantı çözümlerinin geliştirilmesinde ve inşaat sektöründe modüler yapı bileşenlerinin üretilmesinde doğrudan katkı sağlayacaktır. Özellikle, uygun bağlantı elemanı ve yüzey tasarımının seçilmesiyle üretim süreçlerinde daha verimli ve güvenilir sonuçlar elde edilebilecek, malzeme kullanımında tasarruf sağlanarak çevresel etkiler azaltılabilecektir.

Topluma sağladığı yarar açısından, sürdürülebilir ve çevre dostu üretim tekniklerinin teşvik edilmesi, daha az atık üreten ve enerji verimliliği yüksek üretim süreçlerinin geliştirilmesi, uzun vadede ekonomik ve ekolojik faydalar sunacaktır. Ayrıca, elde edilen

bulgular eğitim ve araştırma kurumlarında eklemeli imalat teknolojilerinin daha iyi anlaşılması ve uygulanmasına olanak tanıyacaktır.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

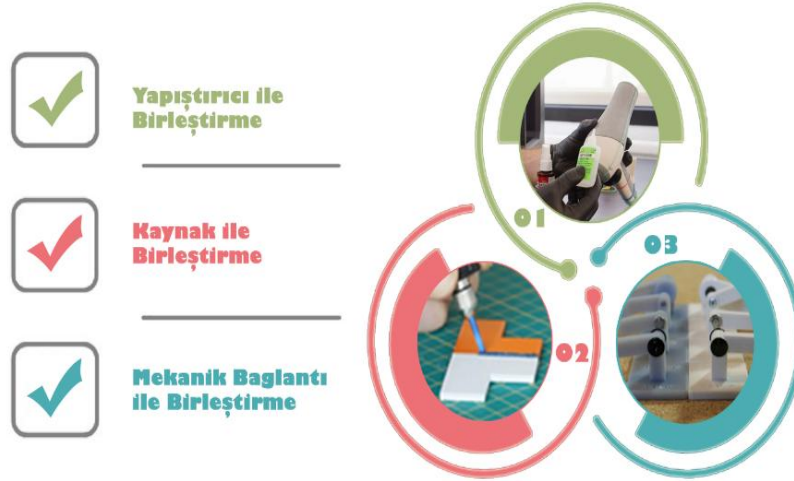
Eİ, yaygın olarak üç boyutlu (3B) baskı olarak bilinen, dijital modeller tarafından yönlendirilen ve malzemenin katman katman eklenmesiyle 3B nesnelerin oluşturulmasını ifade etmektedir. Bu yaklaşım, istenilen şekli elde etmek için katı bir bloktan malzeme çıkararak ürün elde edilmesine yönelik geleneksel talaşlı imalat yöntemlerinden farklıdır. Eİ, karmaşık geometrilerin ve geleneksel yöntemlerle üretilmesi zor veya imkânsız olan iç yapıları oluşturma yeteneği nedeniyle büyük ilgi görmektedir (İnt. Kyn. 1). Eİ ile üretim yönteminde malzemenin yalnızca gerekli yerlere eklenmesiyle oluşabilecek atıkların en aza indirilmesi ve bu sayede daha sürdürülebilir bir üretim uygulaması sunulmaktadır (Abdulhameed vd. 2019). Eİ, kişiselleştirilmiş çözümler gerektiren uygulamalar için ideal olup, tıbbi implantlar veya özel tüketici ürünleri, makine ve otomotiv, havacılık ve uzay sanayi, sağlık, eğitim gibi alanlar öncü olmak üzere neredeyse hayatın her alanında yaygın olarak kullanılmaktadır (Rehman vd. 2023).

Eriyik Yığma Modellemesi (EYM-FDM), aynı zamanda Eriyik Filament İmalatı (Eİ-FFF) olarak da bilinen en yaygın eklemeli imalat tekniklerinden biridir. FFF metodunda termoplastik bir filament, camsı geçiş sıcaklığına (T_g) kadar ısıtılır ve bir nozülünden ekstrüde edilerek katman katman yapı platformunda biriktirilir. Her katman soğuyarak sertleşir ve önceki katmana yapışarak nihai nesneyi oluşturur (Acierno ve Patti 2023). FDM metodunun kökenleri 1980'lerin sonlarına dayanmakta olup 3B baskı teknolojilerinin evriminde önemli bir kilometre taşı olmuştur (Chua vd. 2010). FFF metodunun yaygın olarak benimsenmesi, akrilonitril bütadien stiren (ABS), polilaktik asit (PLA), polikarbonat (PC), kompozitler ve geri dönüştürülmüş filamentler gibi çeşitli termoplastik polimerlerin kullanımına olanak tanıyan malzeme esnekliği ile desteklenmiştir. Bu uyarlanabilirlik, FFF metodunun birçok sektörde karşılık bulmasını sağlamış ve modern üretim ve prototiplemedeki önemini pekiştirmiştir (Acierno ve Patti 2023, Sapkota vd. 2024).

2.1. Bağlantı yöntemleri

Eklemeli imalat alanında, özellikle FFF metodunda bağlantı elemanlarının entegrasyonu,

3B baskılı bileşenlerin yapısal bütünlüğünü ve işlevselliğini artırmak için büyük önem taşımaktadır. 3B baskılı parçaların birleştirilmesi için yapıştırıcı ile birleştirme, kaynak ile birleştirme ve mekanik bağlantı ile birleştirme (mekanik kilitleme ve bağlantı elemanları ile birleştirme) gibi farklı bağlantı teknikleri bulunmaktadır (Tiwary vd. 2021) ve bunlar Resim 2.1’de gösterilmiştir.



Resim 2.1 3B Baskı ile üretilen parçalar üzerinde bağlantı yöntemleri.

2.1.1. Yapıştırıcı ile Birleştirme

Yapıştırıcıyla birleştirme, Resim 2.1’de gösterilmiştir ve bu yöntem 3B baskı topluluğu tarafından büyük hacimli bileşenler üretmek için en yaygın kullanılan tekniktir (Spaggiari ve Denti 2021). Yöntem, yükü bağ hattı boyunca eşit şekilde dağıtarak, vidalar veya perçinler tarafından oluşturulan gerilme yoğunlaşma bölgelerini ortadan kaldırır ve farklı 3B baskılı parçaların birleştirilmesini mümkün kılar. Bu yöntem çoğu zaman daha hafif bir montaj ile sonuçlanır ve daha ekonomik olabilir. Ancak, yapıştırıcıyla birleştirme işlemi, 3B baskılı parçaların yüzey hazırlığını gerektirir. Farklı malzemelerin birleştirilmesinde elastik uyumsuzluğa ve gerilme yoğunlaşmalarına yol açabilir ve birleştirilen parçaların hasar görmeden sökülmesini imkânsız hale getirir (Kumar vd. 2017). Yapıştırıcının sertleşmesi daha uzun sürdüğü için endüstriyel uygulamalarda uygun görülmemektedir (Bhudolia vd. 2020). Ayrıca, mukavemetleri zamanla yaşlanma, sıcaklık ve çevresel etkenlere maruz kalma nedeniyle zayıflayabilir (Campbell 2004).

2.1.2. Kaynak ile Birleştirme

Plastik malzemeler, özellikleri ve işlenme süreçleri bakımından temel olarak termoset ve termoplastik olarak sınıflandırılmaktadır. Termoset plastikler, sertleştikten sonra tekrar ısıtılrsa bile yumuşamaz ve erimez. Bu nedenle, birleştirme mekanik birleştirmeye veya yapışmaya dayanır. Termoplastik polimerler ısı ve basınç uygulanarak yeniden şekillendirilebilir, bu da onları birleştirme için uygun hale getirmektedir (Benatar 2015, Takasu 2003). Daha küçük ve orta boyutlardaki 3B parçaları birleştirmek için yapıştırma çalışmaları yapılırken, daha büyük parçalar veya daha fazla gerilime maruz kalan bölümler için kaynak ile birleştirme gerekebilir (Resim 2.2b). Özellikle havacılık ve otomotiv sektörlerinde hafif yapılar için kaynak ile birleştirme, polimerler ve 3B baskılı parçalar için kullanılmakta ve mekanik sabitleme ve yapıştırıcı bağlamaya alternatif sunulmaktadır (da Costa vd. 2012). Kaynak teknikleri ısıtma yöntemine göre içten ısıtma, dıştan ısıtma ve sürtünmeli ısıtma olarak üç temel kategoriye ayrılabilir (Takasu 2003). 3B parçaların kaynaklanabilirliği fiziksel özelliklerden büyük ölçüde etkilendiğinden, malzemeye göre uygun bir kaynak yönteminin seçilmesi gerekmektedir.



(a)



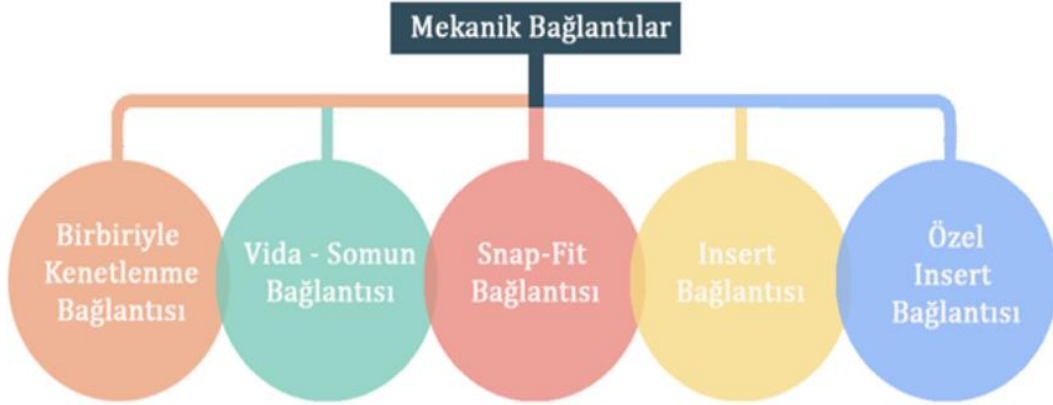
(b)

Resim 2.2 (a) Yapıştırıcı ile Birleştirme, (b) Kaynak ile Birleştirme

2.1.3. Mekanik Bağlantı ile Birleştirme

Mekanik bağlantı elemanları, 3B baskı ile üretilmiş parçaları birleştirmek için fonksiyonel, yeniden kullanılabilir ve modüler bir yöntem sunmaktadır. Yaygın mekanik bağlantı elemanları arasında birbiriyle kenetlenme bağlantısı (Dairabayeva vd. 2022),

vida – somun bağlantısı, esneyerek kilitlenme (Snap-Fit) bağlantısı (Lee ve Kim 2023), İntert bağlantısı (Kastner vd. 2023, İnt. Kyn. 2) ve Özel insert bağlantısı (Omidvarkarjan vd. 2021a) gibi birleştirici ara parçalar bulunmaktadır. Mekanik Bağlantı türleri Resim 2.3'te sunulmuştur. Çoklu malzeme parçalarının hem birleşmelerini sağlamak hem de mekanik mukavemetini artırmak için olası yaklaşımlardan biri mekanik bir kilitleme sağlayabilecek arayüz geometrilerinin modifikasyonudur (Zheng vd. 2021).



Resim 2.3 Mekanik bağlantı türleri

2.1.3.1. Birbiriyle Kenetlenme Bağlantısı

3B Baskı alanında çok parçalı yapıların birleştirilmesi sırasında arayüz geometrilerinin belirlenmesi ve farklı geometrilerin seçimi kritik bir araştırma alanıdır (Frascio vd. 2024). Birbirine benzemeyen malzemelerin birbirleriyle belli bir kurala göre birleştirilmesi veya entegre edilmesi genellikle aralarındaki arayüzün kalitesine bağlıdır. Bu arayüz, nihai ürünün mekanik özelliklerini önemli ölçüde değiştirerek performansını ve dayanıklılığını etkileyebilir (Dairabayeva vd. 2022).

3B baskı ile üretilen parçalar arasında kenetlenme bağlantısı kurulmasının çeşitli avantajları bulunmaktadır (Song vd. 2015). Birbiriyle kenetlenmeli bağlantılar, parçaların kendi geometrileri aracılığıyla gerçekleştirilmekte olup erkek ve dişi bağlantı parçaları gibi ek bağlantı elemanlarına olan ihtiyacı ortadan kaldırmaktadır. Bu durum, üretim sürecinin sadeleşmesini sağlarken montaj sırasında hata payını azaltmakta ve parçalar arasında daha yüksek uyumluluk elde edilmesine katkı sunmaktadır. Malik vd. (2017), doğadaki canlıların yapısal dokularında görülen yüksek uyumluluk ve minimum hata

prensibinden esinlenerek biyomimetik temelli bir kenetlenme formu geliştirmiş ve bunu 3B baskılı parçalar üzerinde uygulamıştır.

Bunun yanında, kenetlenmeli bağlantılar parça bütünlüğünü koruyarak tekrarlı montaj ve sökme işlemlerine olanak tanımaktadır. Bu özellik, yapıların ihtiyaç halinde kolayca demonte edilip yeniden monte edilmesini mümkün kılmakta ve özellikle modüler yapı tasarımlarında önemli bir avantaj sağlamaktadır. Bu nedenle, montaj ve demontaj işlemlerinin kolay gerçekleştirilmesinin istendiğı ve yüksek mukavemet gereksiniminin kritik olmadığı uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir (Nicolau vd. 2025, Song 2022).

Birbiriyle kenetlenme bağlantı yöntemleri, geleneksel mimaride uzun yıllardır kullanılan ve güvenilirliğı kanıtlanmış bağlantı yaklaşımlarından biridir (Karayıl Thekkoot vd. 2010). Bu bağlantı türü, parçaların geometrik tasarımı yoluyla mekanik blokaj oluşturulmasına imkân tanıyarak daha sağlam ve dayanıklı yapı bileşenlerinin üretilmesini desteklemektedir. Ayrıca, 3B baskı teknolojileri sayesinde delme, ek çıkıntılar veya ilave bağlantı bileşenlerine ihtiyaç duyulmadan pürüzsüz yüzeylere sahip, estetik açıdan daha uygun ve işlevsel parçalar üretilebilmektedir. Bu durum, nihai ürünlerin hem görsel kalitesini hem de fonksiyonel performansını artırmaktadır.

Kenetlenmeli bağlantıların tasarım yaklaşımında biyomimetik prensipler önemli bir rol oynamaktadır. Doğada bulunan optimum yapısal çözümler, organizmalar arasındaki etkileşim mekanizmaları ve doğal bağlanma sistemleri, 3B baskılı parçalar için geliştirilen kenetlenme geometrilerine ilham kaynağı olmaktadır. Böylece, doğadaki verimli ve dayanıklı bağlantı mekanizmalarının mühendislik uygulamalarına aktarılması mümkün hale gelmektedir.

2.1.3.2. Vida-Somun Bağlantısı

Uygulamada, doğrudan vidalı bağlantılar sıklıkla geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılmaktadır. Vidalar önceden tasarlanmış geçmeli bağlantılarla veya gömülü somunlarla kullanılır. Vida, baskılı parçalara doğrudan takılabilir; ancak bu yöntemin güvenilirliğı sınırlıdır ve bağlantı zamanla aşınabilir. Daha güvenilir bağlantılar için,

genellikle nesne üzerinde önceden tasarlanmış yuvalara standart metal somunlar yerleştirilir. FFF metodu ile üretilen baskıda, parçaların iç kısımlarında boşluklar bırakılarak, parçanın dış formunu etkilemeden daha hafif hale getirilmesi sağlanabilir ve bu boşluklar ses dalgalarına ve RF sinyallerine farklı tepki verebildikleri için farklı amaçlarla da kullanılabilir (Fürst ve Göhlich 2024). Bu boşluklar ayrıca baskı sırasında parçanın içine fonksiyonel nesneler yerleştirmemize olanak tanır. Bu fonksiyonel nesneler bir mıknatıs, sensör veya mukavemet artırıcı destek yapısı olabilir veya vida-somun gibi bağlantı elemanları yerleştirmek de mümkün olabilir (Resim 2.4). Bağlantı elemanı için oyuk CAD sürecinde tasarlanabilir ve bazı çalışmalara göre oyuk, bağlantı elemanı ile ilgili yazılım tarafından da hesaplanabilir. Hibrit sistemler kullanılarak, somunlar veya diğer bağlantı elemanları insan etkileşimi olmadan otomatik olarak gömülebilir (Ahlers vd. 2021, Malviya vd. 2020).



(a)



(b)

Resim 2.4 (a) Vida – somun bağlantıları (b) Somunlar için 3B baskı ile üretilmiş boşluklu yapılar (İnt. Kyn. 3, İnt. Kyn. 4)

2.1.3.3. Snap-Fit (Esneyerek Kilitlenme) Bağlantısı

Esneyerek kilitlenme iki farklı bileşeni, bağlantı elemanları kullanmadan veya parçaları kalıcı olarak birbirine yapıştırmadan bağlamanın bir yoludur. İki parça birbirine itilir ve geçmeli bağlantılar yerlerini kilitler (Klahn vd. 2016). Parçaları sabitlemek için bir veya daha fazla parçanın esneyerek şekil değiştirmesine veya biraz bükülmesine dayanırlar (Ramírez vd. 2019). Bu nedenle esneyerek kilitlenme bağlantısı, kırtasiye malzemelerinden otomotiv parçalarına kadar her tür plastik üründe kullanılmaktadır.

Geçmişte bu tarzdaki bağlantılar için hassas prototipler yapmak pahalı kalıplar gerektiriyordu. Günümüzde ise 3B baskı yardımıyla istenilen esneyerek kilitlenme bağlantısı kolay bir şekilde yapılmakta ve geri dönüşüm açısından da kullanıcı dostu bir yapı oluşturmaktadır. Diğer çalışmalar, eklemeli imalat yöntemiyle üretilen esneyerek kilitlenme bağlantılarının, enjeksiyonla kalıplanmış özelliklere benzer bir davranış sergilediğini ve enjeksiyonla kalıplanmış esneyerek kilitlenme bağlantıları için boyutlandırma tasarım kurallarının, eklemeli imalat yöntemiyle üretilen esneyerek kilitlenme bağlantılarına da uygulanabilir olduğunu bildirmiştir (Klahn vd. 2016). Plastik ürünlerde farklı tipte esnek kilitli bağlantı elemanları kullanılmaktadır (Bonenberger 2016).

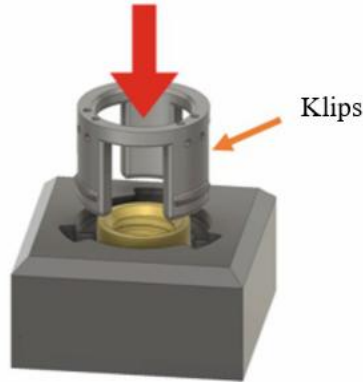
2.1.3.4. İnsert Somun Bağlantısı

Büyük montaj elemanlarının kullanılmasının mümkün olmadığı veya sık sık montaj ve demontaj gerektiren durumlarda metal bağlantı elemanlarının kullanılması kaçınılmazdır. FFF teknolojisi için kullanılabilecek yöntemler genellikle insert somunların mekanik veya ısıyla yerleştirilmesidir. Literatürde, Eİ ile üretilen parçaların montajına yönelik özel tasarımların yanı sıra standart bağlantı elemanlarının yerleştirilmesine yönelik çalışmalar da bulunmaktadır (Kajzer vd. 2019, Kastner vd. 2023, Omidvarkarjan vd. 2021). İnsansız hava araçları, elektrikli araçlar, yeni nesil müşteriye özgü cihazların üretimi ve protez tasarımları gibi özel parçaların üretilmesini gerektiren durumlarda Eİ kullanıldığında, üretilen parçaların birbirine bağlanması gereken durumlar sıklıkla ortaya çıkmaktadır. Bu durumlarda üretilen parçanın çekme-basma kuvvetine mi yoksa eğilmeye mi dayanıklı olması gerektiği bağlantının tipini ve tasarımını değiştirmektedir.

İnsert somunlar genellikle bir parçanın montajını ve demontajını sağlayan metal bağlantı elemanlarıdır (Çizelge 3.2). Bu nedenle, birçok durumda, farklı alternatif geçmeli bağlantı elemanı olarak görülmektedirler. İnsert somunlar, mevcut bağlantı uzunluğunun bağlantının iyi mekanik özelliklerini elde etmek için yeterli olmadığı durumlarda da kullanılır. Tek başına bağlantı elemanı yüklerine dayanamayan düşük kesme dayanımlı polimerler, ahşap malzemeler ve son yıllarda gittikçe artan 3B baskı polimer parçaların birleştirilmesinde kullanılmaktadırlar. İnsert somunlar tırtıllar, oluklar ve yuvalar yardımıyla mekanik olarak yerine kilitlenir ve hem eksenel hem de açısal harekete karşı mükemmel direnç sağlarlar.

2.1.3.5. Özel İnsert Bağlantısı

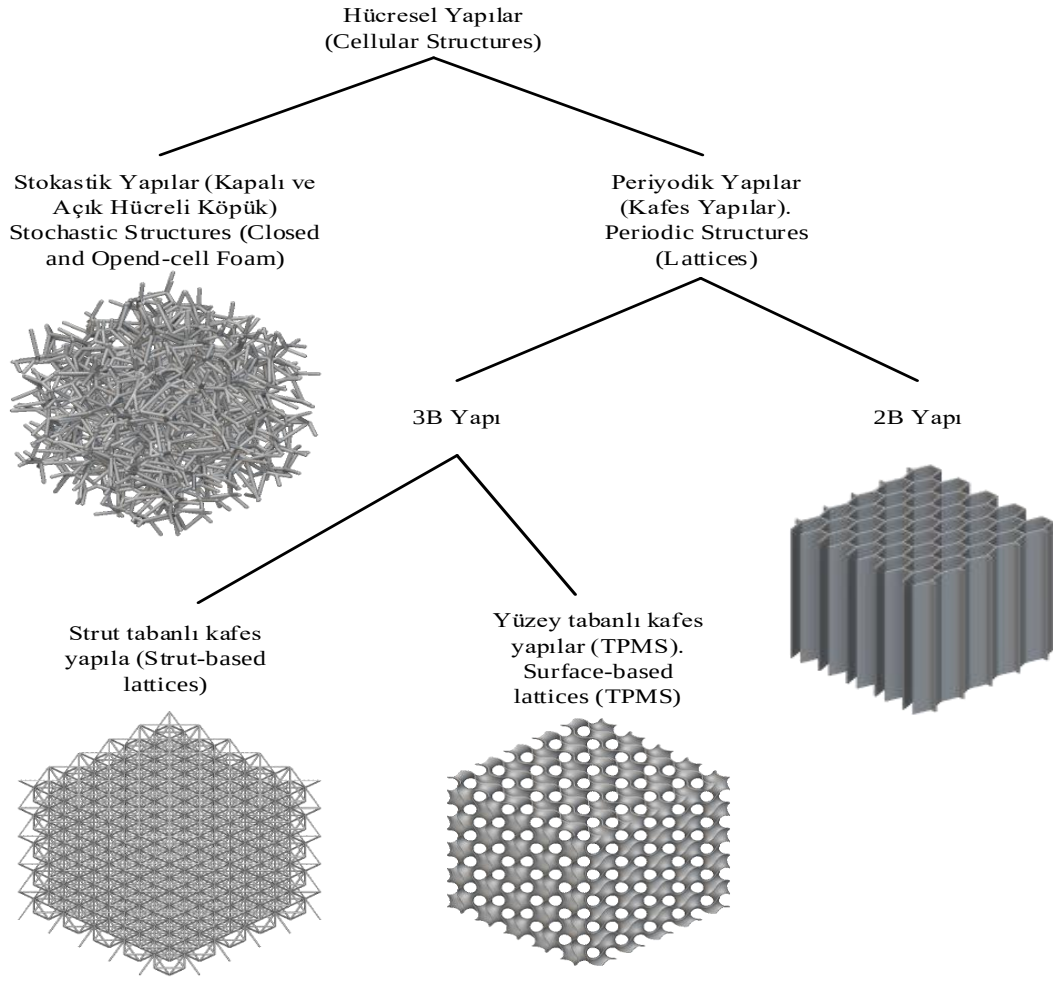
Eİ alanında sık sık montaj ve demontaj gerektiren durumlarda yani sökülebilir mekanik bağlantılar arasında olan insert somun bağlantısı içerisinde farklı bağlantı aparatları Çizelge 3.2’de gösterilmiştir. Bu bağlantı elemanları kendi içerisinde hem kendi formları hem de bağlantı arayüzlerindeki geometrik farklılıklarından dolayı parça üzerinde değişik mekanik karakteristiklere sahiptir. Resim 2.5’te ile gösterilen özel insert dübel kendine özgü mekanik karakteristiği ile Eİ alanında kullanılan yeni nesil dübel yöntemi olarak görülmektedir (Omidvarkarjan vd. 2021). Burada insert parça, polimer blok içerisine gömülmüş ve boşluk olan kısımlar polimer klips yardımıyla kilitli bir şekilde kapatılmıştır. Böylece insert parça polimer blok içerisine gizlenerek polimer blok üzerinde düz bir yüzey elde edilmiş ve bağlantı sonucu insert parçaya etkiyen kuvvet polimer blok içerisine yayılmıştır. Bu yöntemin (insert dübel) diğer insert yapılarına göre daha iyi sonuç verdiği yapılan çalışmayla desteklenmiştir.



Resim 2.5 3B baskı parçalarının birleştirilmesi için özel tasarlanmış dübel

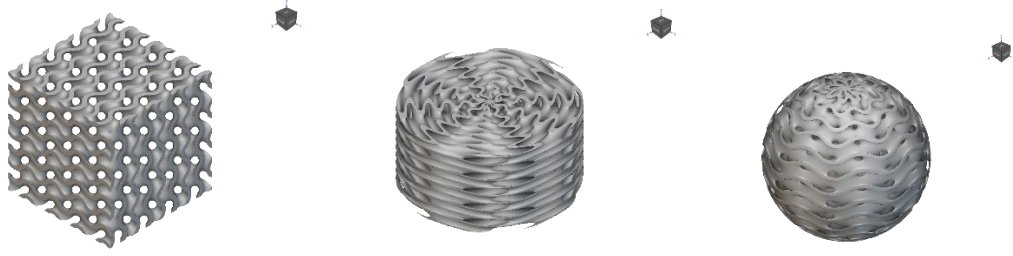
2.2.Hücresel Yapılar

Hücresel yapılar doğadaki canlıların iç yapılarında sıklıkla bulunmaktadır; birçok malzeme, uzayı verimli şekilde doldurmak için katı kenar ve yüzeylerle birbirine bağlanmış prizmatik veya çokyüzlü hücrelerden oluşmaktadır (Gibson 2003). Katı cisim malzemelerinden farklı olarak, hücresel yapılar basma yükleri altında yüksek enerji soğurma kapasitesine sahiptir; aynı zamanda verimli bir ısı ve akustik yalıtım sağlar ve hafifliğini korurken yüksek dayanım sunmaktadır (Ufodike vd. 2021).



Resim 2.6 Hücresel Yapı Türleri

Bir kafes yapısı, çok sayıda özdeş elemandan, genellikle ince kirişler veya çubuklardan oluşan, yalnızca birkaç elemandan meydana gelen basit bir birim hücrenin uzayda döşenmesiyle oluşturulan hücresel veya ağısı bir yapı olarak tanımlanır (Fleck vd. 2010). Birim hücre, kafesin temel tekrar eden elemanını temsil eder ve geometrisi kafes tipini belirler (Resim 2.6). Kafesler, dikdörtgen, silindirik, küresel ya da iki yüzey arasında uyacak şekilde bozulmuş bir hücre haritasına göre birim hücrelerin uzaya yerleştirilmesiyle oluşur. Farklı kafes hücre tipi Resim 2.7’de gösterilmektedir. Bir kafesin mekanik, termal, akustik ve diğer özellikleri; kafes tipi ile, birim hücre boyutu ve kiriş ya da duvar kalınlığı gibi diğer tasarım parametreleri tarafından belirlenir.



Resim 2.7 Farklı tipte kafes hücre tipi

Kafes yapılar, onları farklı uygulamalara uygun kılan çeşitli avantajlı özellikler sergiler. Yüksek özgül rijitlik ve dayanımları hafif tasarımlara imkân verirken, geniş yüzey alanları verimli ısı transferini destekler, nispeten düşük gerilme altında büyük deformasyon kabiliyetleri etkili enerji soğurulmasını sağlarken çok sayıdaki iç gözenekleri ise akustik yalıtım sunmaktadır (Tao ve Leu 2016).

Düzenli kafes yapılar homojen bir kompozisyona sahiptir; yani hücre boyutu, tipi, yönelimi ve kalınlığı tüm geometrisi boyunca sabit kalır (Resim 2.8a). Bu, aynı birim hücrenin tüm yapı boyunca periyodik biçimde tekrarlandığı ve tüm bölgelerde tutarlı bir mekanik tepki elde edildiği anlamına gelmektedir. Kafeslerin mekanik performansı elastisite modülü, dayanım (akma/çekme dayanımı) ve tokluk gibi özelliklerle ifade edilir (2.1) ve göreceli yoğunluk ile yapı topolojisine sıkı şekilde bağlıdır (Gibson 2003).

$$\Phi_{lattice} = \Phi_{solid} C \rho_r^n \quad (2.1)$$

Bu denklemde, Φ incelenen genel mekanik veya fiziksel özelliği temsil eder. Bu özellik elastisite modülü, dayanım veya tokluk olabilir. $\Phi_{lattice}$ kafes yapısının (gözenekli/hücreli malzemenin) efektif mekanik özelliğidir. Φ_{solid} kafes yapıyı oluşturan katı ana malzemenin (malzemenin gözeneksiz, masif halinin) kendi mekanik özelliğidir. C kafes yapısının geometrisine, hücre topolojisine ve düğüm noktalarının bağlantı şekline bağlı olan ampirik bir geometrik sabittir (genellikle deneysel olarak veya sonlu elemanlar analiziyle belirlenir). ρ_r göreceli (bağıl) yoğunluktur, kafes yapısının yoğunluğunun, yapıldığı katı malzemenin yoğunluğuna oranıdır ($\rho_r = \rho_{lattice}/\rho_{solid}$). n kafes yapısının deformasyon mekanizmasına (hücre duvarlarının eğilme, uzama veya

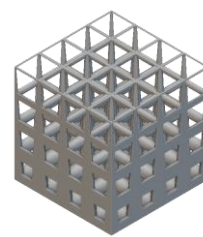
burkulma davranışına) bağlı olan üstel katsayısıdır.

Bu tekdüzelik tasarımı ve analizi kolaylaştırırsa da yapının değişken gerilme koşullarına veya işlevsel gereksinimlere uyum kabiliyetini sınırlar. Sonuç olarak, düzenli kafesler yerel olarak ayarlanamayan, yani belirli performans ihtiyaçlarına göre değiştirilemeyen rijitlik, dayanım ve yoğunluk gibi homojen özellikler sergiler. Bu sınırlama genellikle malzeme dağılımının istenen şekilde ayarlanmasına ve genel verimliliğin artırılmasına olanak tanıyan fonksiyonel olarak derecelendirilmiş veya topoloji optimize edilmiş kafes yapıların geliştirilmesini teşvik etmektedir.

Bir kafes yapı, geometri veya bileşiminde yerel değişiklikler gösterdiğinde, fonksiyonel derecelendirilmiş (FD) kafes yapısı (Functionally Graded Lattice Structure-FGLS) olarak adlandırılır (Resim 2.8b). Homojen hücelere sahip düzenli kafeslerin aksine, FD kafes yapısı hücre boyutu, şekli, yönelimi veya duvar kalınlığı gibi parametrelerde kademeli değişiklikler içerir ve böylece malzeme dağıtımını optimize eder. Bu tasarım yaklaşımı, yüksek yük altındaki bölgeleri güçlendirirken kritik olmayan alanlarda malzeme tüketimini azaltarak daha yüksek mekanik verimlilik ve karmaşık yükleme koşullarında dengeli performans sağlar. Bu kavramın gerçek bir doğal örneği kemik yapılarında görülür. Doğal kemiğin iç mimarisi hücresel FD kafes yapısıdır (Schaedler ve Carter 2016). Yapısal optimizasyonun ötesinde, FD enerji soğurulması, ısı transferi ve gerilme dağılımı gibi özellikleri de geliştirebilir. Derecelendirme işlemi, örneğin çubuk kalınlığının yapı yüksekliği boyunca doğrusal olarak manuel artırılmasıyla (Resim 2.8b) veya kafes tipi, birim hücre boyutu veya yöneliminin kademeli olarak değiştirilmesine olanak tanıyan gelişmiş yöntemlerle uygulanabilir.



(a)



(b)

Resim 2.8 (a) Homojen hücreli düzenli kafes yapısı, (b) FD kafes yapısı

3. MATERYAL ve METOT

3.1.TPMS Tasarım Yaklaşımları

Bu çalışmada incelenen kafes hücre tipleri periyodik yüzey denklemlerinden türetilmiş olup, çoğu TPMS (Triply Periodic Minimal Surfaces, Üçlü Periyodik Minimal Yüzeyler) sınıfına aittir. TPMS, her noktasında sıfır ortalama eğriliğe sahip olmalarıyla karakterize edilen, sürekli ve düzgün geometriye sahip, üç boyutlu uzayda periyodik olarak tekrar eden özel bir matematiksel yüzey sınıfını temsil eder. En yaygın TPMS örnekleri arasında Schwarz-P tarafından tanımlanan Primitive (P) ve Diamond (D) yüzeyleri ile Schoen tarafından geliştirilen Gyroid (G) ve I-WP yüzeyleri yer almaktadır (Schwarz-P 1972, Schoen 1970). Bu üç TPMS tabanlı kafes yapısı karşılaştırma amacıyla incelenmiştir.

Diferansiyel geometri alanında TPMS yüzeyleri analitik olarak Weierstrass-Enneper denklem gösterimiyle tanımlanabilir; ancak mühendislik tasarımı için bu yüzeyler genellikle Fourier serisi açılımlarıyla daha pratik şekilde modellenir (Gandy vd. 2001, Wohlgemuth vd. 2001). Bu çalışmada TPMS tabanlı kafes yapıları nTopology (nTop) programı kullanılarak modellenmiş, simüle edilmiş ve üretime hazırlanmıştır. Bu program, her bir TPMS birim hücrelerini kendi örtük (implicit) trigonometrik denklemleri ile tanımlar. Seçilen TPMS yapılarının oluşturulmasında kullanılan matematiksel formülasyonlar Resim 3.1’de verilmiştir. Bu örtük denklemler, tabaka tipi kafes mimarilerinin oluşturulmasında, gözeneklilik ve mekanik davranışı ayarlanabilir sürekli yüzeylerin tanımlanmasında ideal çözümler oluşturduğu için Eİ alanında sıklıkla kullanılmaktadır.

Bu çalışmada mevcut kafes yapı seçenekleri (çubuk tabanlı, TPMS tabanlı veya özelleştirilmiş birim hücre) arasından üç tip Duvarlı (Walled) TPMS birim hücresi seçilmiştir: Gyroid, Schwarz-P ve Diamond. Walled TPMS yaklaşımı; sürekli ve düzgün yüzey morfolojisi, yüksek yüzey hacim oranı ve basma yükleri altında üstün mekanik verimliliği nedeniyle tercih edilmiştir. Bu özellikler, enerji soğurulmasını, ısı transferini ve gerilme dağılımını etkilediği için 3B baskı alanında yaygın kullanılmaktadır. Birim hücre türü seçildikten sonra, her bir TPMS yüzeyine karşılık gelen geometrik ve

matematiksel parametreler yazılım tarafından örtük denkleme göre otomatik olarak atanmıştır.



Gyroid

$$\sin(x) \cos(y) + \sin(y) \cos(z) + \sin(z) \cos(x)$$



Diamond

$$\sin(x)*\sin(y)*\sin(z) + \sin(x)*\cos(y)*\cos(z) + \cos(x)*\sin(y)*\cos(z) + \cos(x)*\cos(y)*\sin(z)$$



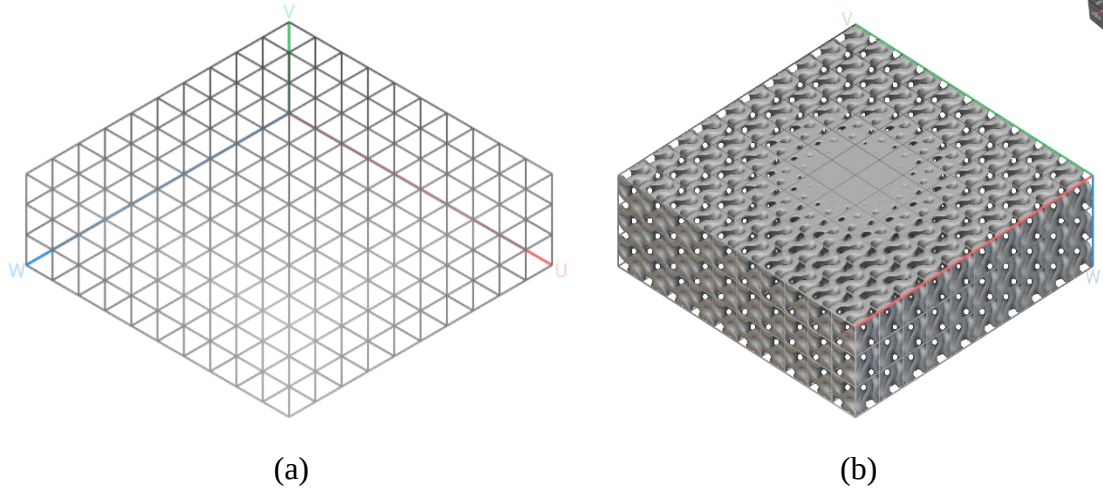
Schwarz-P

$$\cos(x) + \cos(y) + \cos(z)$$

Resim 3.1 nTop programında farklı TPMS türlerini oluşturmak için kullanılan denklemler (İnt. Kyn. 5)

Ardından hücrelerin uzaysal yerleşimini ve periyodik düzenini kontrol etmek için bir hücre haritası bağımsız olarak tanımlanmıştır (Resim 3.2a). Numune boyutları $50 \times 50 \times 15$ mm olarak belirlenmiş ve birim hücrelerin hacim boyunca düzgün şekilde dağılması için hücre haritası bu tasarım alanına hizalanmıştır. Birim hücre ve hücre haritası ayarlandıktan sonra, bu bileşenler periyodik kafes bloğunda birleştirilmiş ve model boyunca tutarlı TPMS yapıları oluşturmak için çözünürlük, periyodiklik ve ölçek parametreleri tanımlanmıştır (Resim 3.2b).

FD kafes yapısı numuneleri için, her bir TPMS yapısı, numune merkezinden 8 mm radyal mesafede 2,5 mm duvar kalınlığı ile başlatılmıştır. Bu bölgenin ötesinde, duvar kalınlığı, bağıl yoğunlukta kontrollü değişimler elde etmek için rampa tabanlı derecelendirme alanı kullanılarak dışa doğru kademeli olarak azaltılmıştır. Son kalınlık değerleri, sırasıyla %65, %75 ve %85 hedef dolgu seviyelerini elde etmek için Çizelge 3.1'de listelenen değerlere göre atanmıştır.



Resim 3.2 (a) Dikdörtgen hücre haritası, (b) TPMS hücresel yapı

FD kafes yapısı analizi için Gyroid, Diamond ve Schwarz-P TPMS topolojilerinin seçimi yalnızca mekanik uygunluklarına değil, aynı zamanda kalınlık derecelendirme uygulaması altındaki geometrik kararlılıklarına da dayanmaktadır. Ön tasarım aşamasında, Lidinoid, Split-P ve Neovius dâhil olmak üzere çeşitli ek TPMS mimarileri aynı fonksiyonel derecelendirme stratejisi kullanılarak değerlendirilmiştir. Derecelendirme yaklaşımında, periyodik kafes üretim süreci içerisinde kullanılan rampa tabanlı derecelendirme alanı kullanılarak insert geometrisi skaler alan olarak tanımlanmış ve kafes duvar kalınlığı maksimum değerden minimum değere kademeli olarak değiştirilmiştir.

Bununla birlikte, bazı TPMS morfolojilerinde, özellikle daha düşük bağıl yoğunluklarda (%65 gibi) ve Ağaç Somun gibi daha büyük boyutlu insertlerin kullanıldığı numunelerde, uygulanan kalınlık derecelendirmesi geometrik sürekliliğin kaybolmasına neden olmuştur. Bu durumlarda, sınır bölgeleri ve insert ara yüzeyleri yakınında meydana gelen yerel incelmeler, kafes ağında süreksizliklere yol açmış ve özellikle numune kenarlarında TPMS yapısının bağlantısız küçük bölgelere ayrışmasına neden olmuştur. Bu tür bir davranış, ağ yapısı tutarlılığını azaltmış ve güvenilir sonlu elemanlar analizleri için gerekli olan yapısal bütünlüğü olumsuz etkilemiştir.

Buna karşılık, Gyroid, Diamond ve Schwarz-P yapıları incelenen tüm bağıl yoğunluk ve insert konfigürasyonlarında sürekli ve üretilebilir geometrilerini korumuştur. Bu yapıların

morfolojik sürekliliği, FD kafes yapısı sırasında kararlı duvar geçişlerine olanak sağlarken, büyük insert ara yüzleri etrafında kafes bağlantılılığının korunmasına katkıda bulunmuştur. Bu nedenle, çalışma boyunca geometrik sağlamlık, sayısal tutarlılık ve anlamlı mekanik karşılaştırmaların sağlanabilmesi amacıyla bu üç TPMS topolojisi tercih edilmiştir.

Çizelge 3.1 FD TPMS kafes yapıları için hedef yoğunluğa ulaşmak amacıyla atanan duvar kalınlıkları.

Kafes Yapısı	Hedef Dolgu Yoğunluğu (%)	Son Kalınlık (mm)
Gyroid	65%	1.2214
	75%	1.5790
	85%	1.9247
Schwarz-P	65%	0.5578
	75%	0.8242
	85%	1.1991
Diamond	65%	0.9254
	75%	1.2472
	85%	1.5758

3.2. Farklı Bağlantı Sistemleri Tasarımı

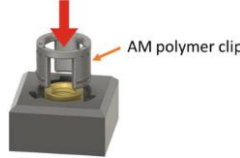
Bu çalışmada, Çizelge 3.2 'de gösterildiği gibi, FD TPMS tabanlı kafes yapıların mekanik bağlantı performansını değerlendirmek amacıyla farklı tipte insert yapıları tasarlanmış ve çekme testi odaklı bir bağlantı konfigürasyonuna entegre edilmiştir. Bu insert yapıları, Eİ ile üretilen TPMS kafes yapıları üzerine mekanik bağlantı uygulanırken oluşabilecek yük aktarımı, gerilme dağılımı ve çekme dayanımı açısından farklı tasarım avantajları sunmaktadır.

3.2.1. İntert ve Benzeri Bağlantı Aparatları

Helisel İntert, Resim 3.3'te gösterildiği gibi, dış yüzeyindeki helisel diş geometrisi sayesinde ısı uygulanarak polimer yüzeyine kontrollü bir şekilde gömülme ve yüksek yüzey temas alanı oluşturmaktadır. Bu insert türü genellikle insert üreticisi tarafından önerilen boyutlarda, insert dış çapından biraz daha küçük önceden oluşturulmuş bir deliğe

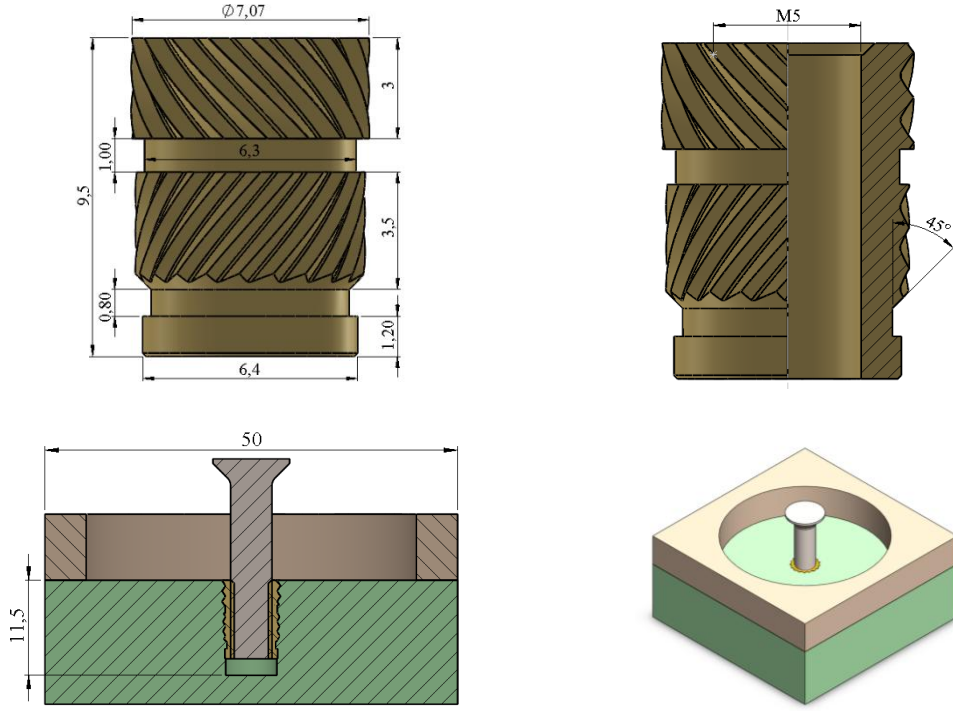
yerleştirilir. Delik, üretim sırasında doğrudan oluşturulabileceği gibi sonradan delme işlemi ile de hazırlanabilmektedir. İnsert aparatının dış geometrisi düz veya konik formda olabilmekte; özellikle konik tasarımlar, kendinden hizalama özelliği sayesinde daha hızlı ve kolay montaj avantajı sağlamaktadır (İnt. Kyn. 6).

Çizelge 3.2 Eİ alanında kullanılan insert somun ve benzeri bağlantı aparatları

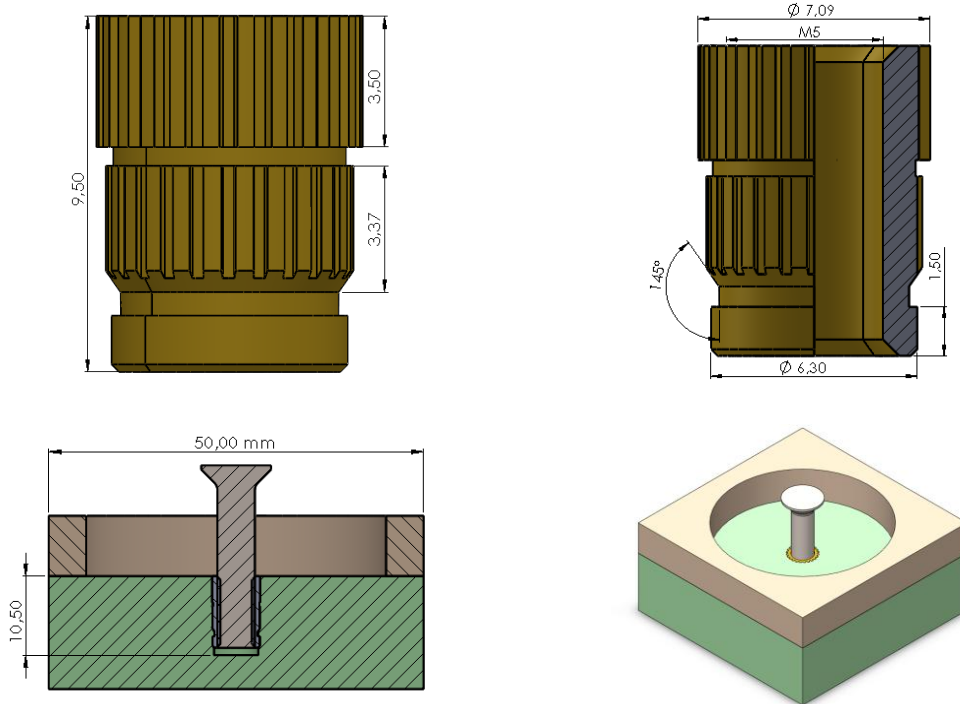
Ağaç Somun	Düz İnsert	Kendiliğinden Kılavuzlu İnsert	Helicoil Yay (Helicoil Insert)
			
(1)	(2)	(3)	(4)
Altıköşe Başlı Pres İnsert	Genleşen İnsert	Ahşap İnsert	Kare Somun (Square Nut)
			
(5)	(6)	(7)	(8)
Altıköşe Başlı Somun	Helisel İnsert	Özel İnsert Dübel	
			
(9)	(10)	(11)	

Isıl montaj işleminde insert, termal bir pres veya ısıtılmış uç yardımıyla belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılır ve polimer malzeme içerisine kontrollü olarak bastırılır. Bu süreçte insert çevresindeki polimer malzemenin küçük bir kısmı yumuşayarak veya eriyerek dış yüzeydeki tırtıl/dış geometrisi içine akmakta ve soğuma sonrasında mekanik olarak güçlü bir bağ oluşturmaktadır. Sürecin kolay kontrol edilebilir olması, düşük maliyetli uygulanabilmesi ve aynı anda birden fazla insert aparatının yerleştirilmesine olanak sağlayarak otomasyona uygunluğu nedeniyle, özellikle termoplastik malzemelerde yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu insert aparatı, TPMS yüzeyinin lokal deformasyonunu azaltmak ve yük aktarımını yüzey boyunca daha homojen bir şekilde

dağıtmak amacıyla değerlendirilmiştir (İnt. Kyn. 7).

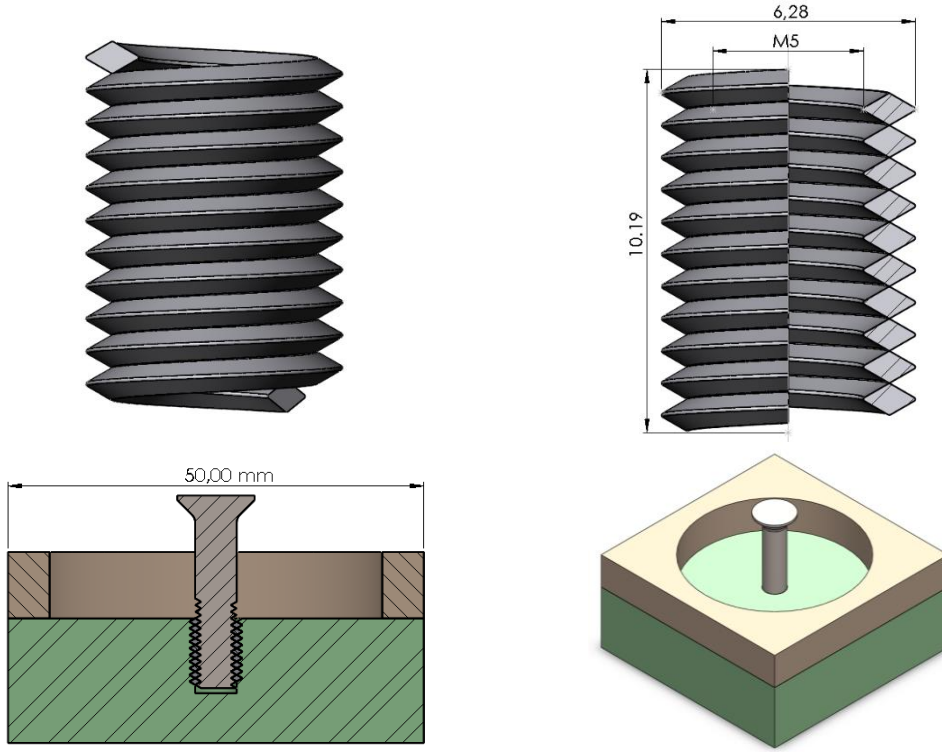


Resim 3.3 Helisel İnsert



Resim 3.4 Düz İnsert

Düz İnsert (Resim 3.4), dış yüzeyinde daha düz ve basit bir diş profili barındıran, ısı ile yerleştirme prensibiyle çalışan bir diğer insert bağlantı aparatıdır. Bu model, özellikle düşük deformasyonlu yerleştirme gerektiren ve daha öngörülebilir gömülme davranışının istendiği uygulamalarda tercih edilmektedir. Bu nedenle, TPMS tabanlı yapılar üzerindeki yerleştirme kuvveti ve termal etkilerin mekanik sonuçlarını karşılaştırmak için analiz edilmiştir.

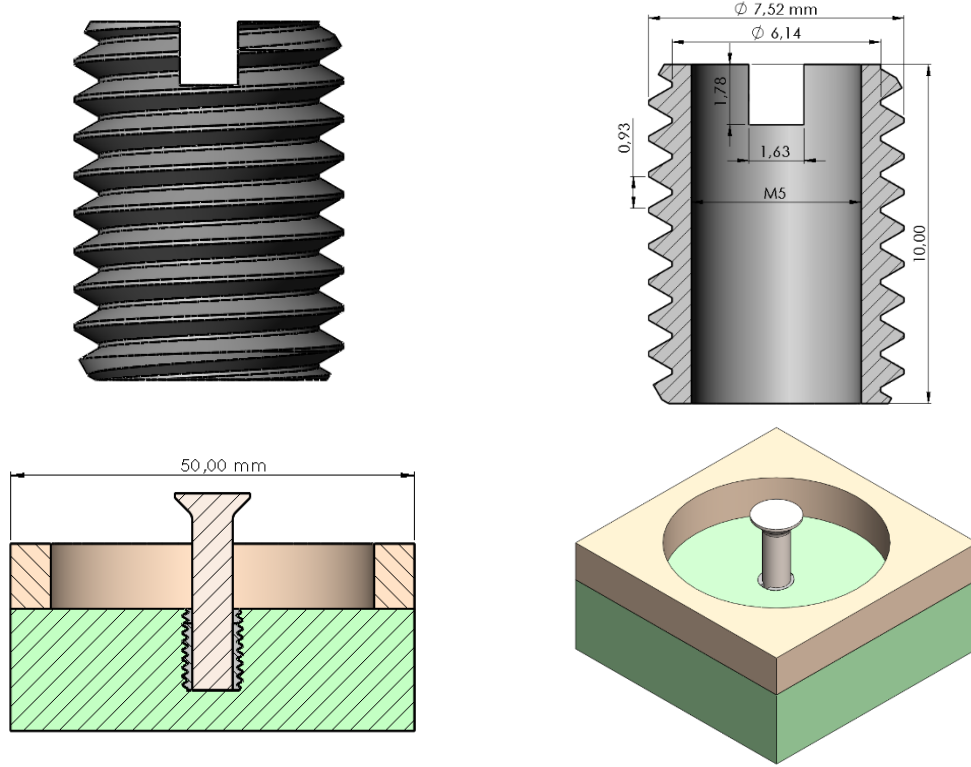


Resim 3.5 Helicoil Insert

Helicoil İnsert (Resim 3.5), hasar görmüş dişleri onarmak veya bir cıvata bağlantısının yük taşıma kapasitesini artırmak için kullanılır. Genellikle paslanmaz çelikten üretilirler; bu malzeme korozyon direnci ve dayanıklılık sağlar. Bu insert aparatı, gerilimin dişler üzerinde homojen dağılımını sağlamakta ve bu sayede bağlantının yük taşıma kapasitesini artırmaktadır. Bu tasarım, özellikle alüminyum alaşımları gibi daha yumuşak malzemelerin kullanıldığı bağlantılarda ve bağlantının sık sık sökülüp tekrar takıldığı durumlarda oldukça faydalıdır (Paska vd. 2021).

Bu çalışmada Helicoil insert, TPMS kafes yapısının içinde oluşturulan standart bir vida deliğine yerleştirilmiş ve yük aktarım mekanizması, deformasyon konsantrasyonu ve

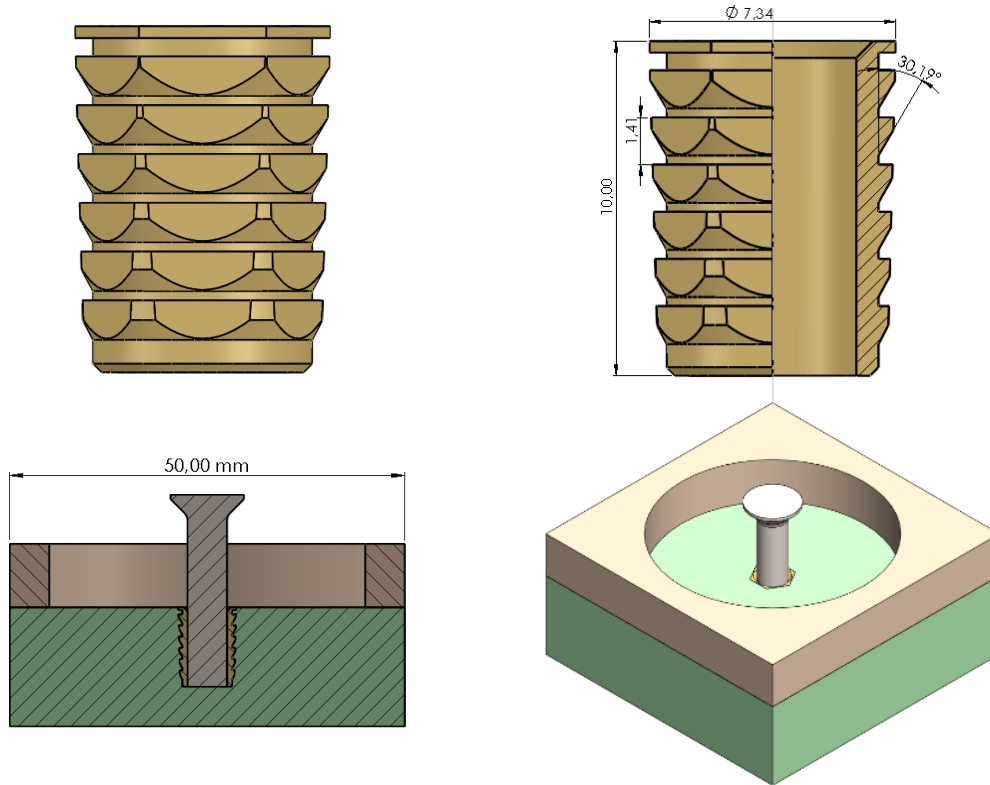
yerel sertlik artışı bakımından incelenmiştir.



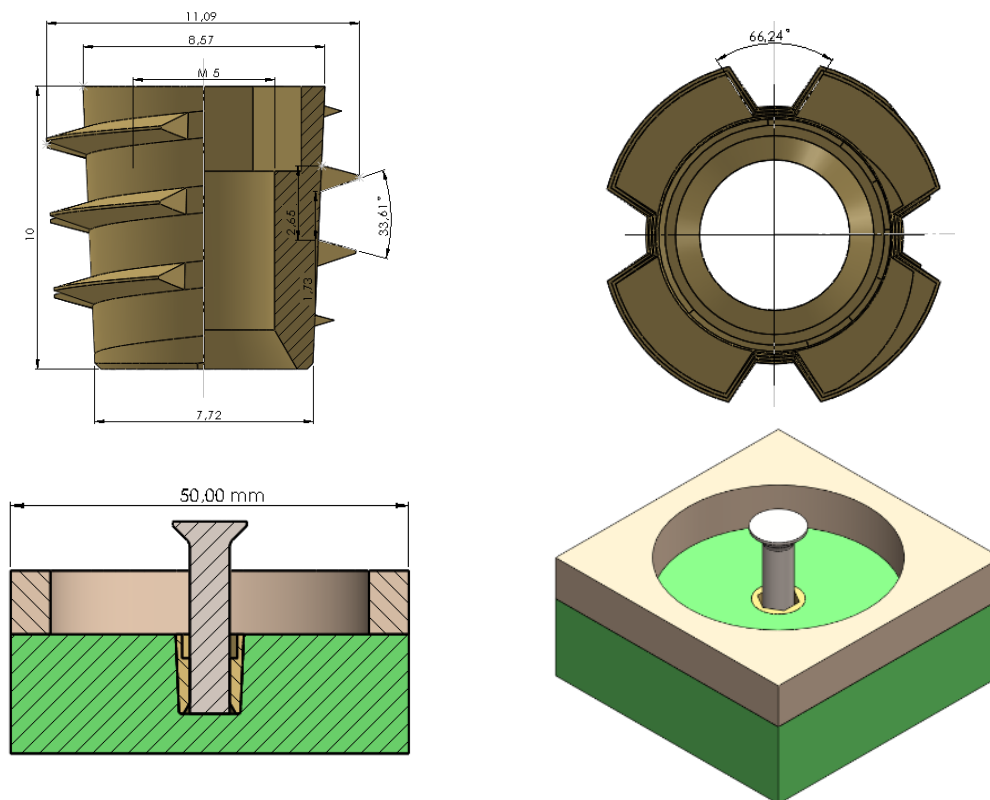
Resim 3.6 Kendinden kılavuzlu insertler

Kendinden kılavuzlu insert aparatının (Resim 3.6) hem iç hem de dış yüzeylerinde dişleri bulunmaktadır. Önceden açılmış deliklere monte edilirken kendi dişlerini açarlar, bu da onları hız ve basitliğin önemli olduğu projeler için ideal hale getirir. Sıkma işlemi, plastik ile dişler arasındaki sürtünmeyi artırır. Bu insertler özellikle ahşap veya plastik gibi daha yumuşak malzemelerde iyi performans gösterir (İnt. Kyn. 8).

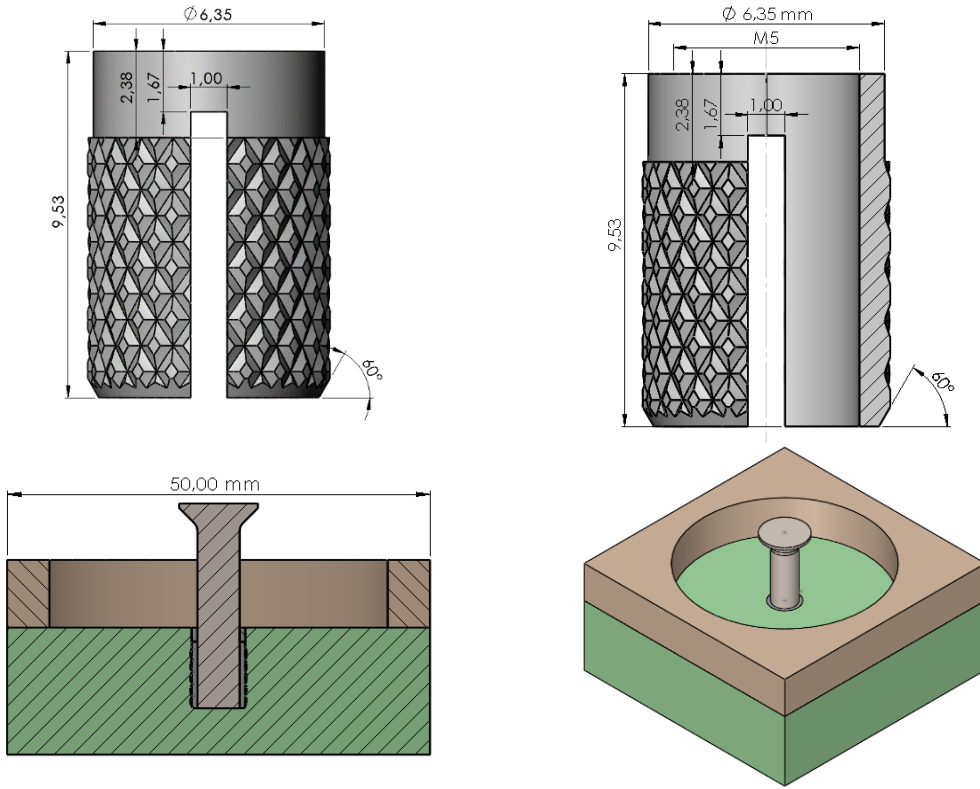
Altıköşe Başlı Pres İsert aparatı (Resim 3.7), montaj için ısı veya ultrason gerektirmez ve güçlü, tekrar kullanılabilir bir bağlantı sağlar. Altıgen gövdeli yapı, yuvarlak deliklerde dönmeye karşı daha etkili bir şekilde direnç gösterir. Genleşen insert aparatların aksine, bu insertler bir bağlantı elemanı vidalanmadan önce bile yerinde kalmaktadır. Ancak vidalar tekrar tekrar sökülüp takılırsa dayanımlarını kaybedebilir (İnt. Kyn. 9).



Resim 3.7 Altıgen pres geçmeli insert



Resim 3.8 Ahşap Dübeli



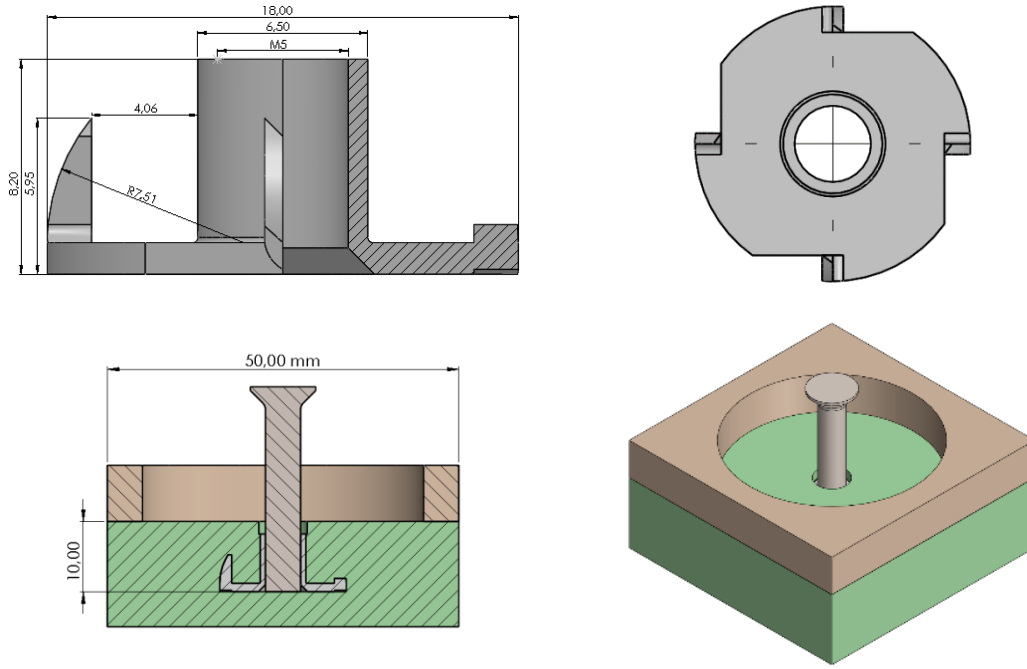
Resim 3.9 Genleşen İnsert

Ahşap İnsert (Resim 3.8), normalde yumuşak ahşap için kullanılan kendinden kılavuzlu bir inserttir (İnt. Kyn. 10). Montaj sırasında ahşaptaki lifleri yerinden oynatan, kesen ve sıkıştıran büyük dış dişlere sahiptirler. Bu deformasyon, sürtünme ve liflerin birbirine kenetlenmesi yoluyla çekilmeye ve dönmeye karşı direnç oluşturur. Plastikte kullanıldığında ise insert, tork altında malzemeyi keserek ve yerinden oynatarak tutunma sağlar (Kim vd. 2026). Bununla birlikte, plastikte kullanıldığında bu dişler yüksek gerilim yaratabilir ve özellikle gevrek veya cam elyaf takviyeli plastiklerde çatlama riskini artırabilir. Kendinden kılavuzlu insertler, önceden açılmış bir delik dışında, ısı veya ultrasonik montaj gerektirmeyen güçlü, tekrar kullanılabilir dişlerdir. Yine de vidalar tekrar tekrar sökülüp takılırsa dayanımlarını kaybedebilir.

Genleşen İnsert aparatında, bir vida insert içerisine yerleştirildiğinde (Resim 3.9), yapısında bulunan çentik veya tırtıllar sayesinde çevredeki malzeme ile mekanik kenetlenme oluşmakta ve mekanik bir dayanım elde edilmektedir. İnsert içerisine yerleştirilen vida yardımıyla insert genişler ve sahip olduğu çentik veya tırtıllar sayesinde çevredeki plastiğe doğru itilirler (İnt. Kyn. 11). Bu insert aparatları, genişlemenin düşük

malzeme dayanımını telafi etmeye yardımcı olduğu plastik ve ahşap gibi daha yumuşak malzemelerde etkilidir.

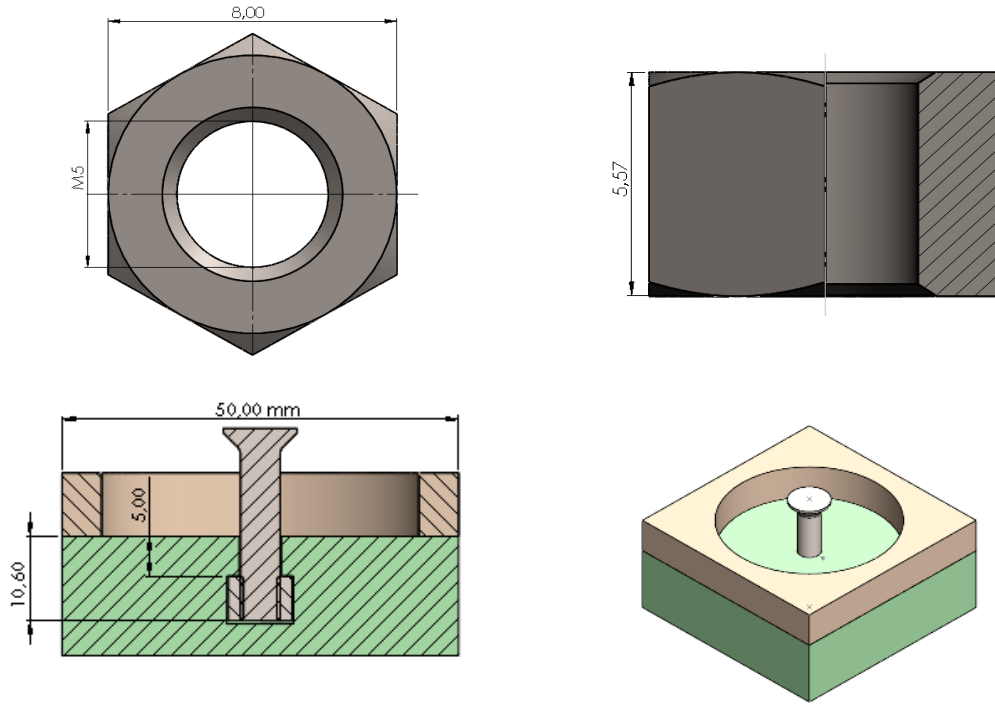
Cıvatarla birlikte kullanılan Ağaç Somun (Resim 3.10), tipik olarak mobilya bileşenleri arasında sökülebilir cıvatalı bağlantılar oluşturmak için kullanılır ve mobilya bağlantı elemanları olarak yaygındır. Güçlü bağlantılar sağlarlar ve mobilyaya zarar vermeden sökülebilirler. Ağaç Somun genellikle çelikten imal edilir. Üretim sırasında, Ağaç Somun mobilya/plastik bileşenlerde açılmış deliklere yerleştirilir. İçinde diş bulunan bir gövdeye ve sivri uçlu bir flanşa sahiptirler. Bu sivri uçlar radyal olarak dışarı doğru uzanır ve vida sıkılırken somunun dönmelerini engeller (Skorupińska vd. 2022).



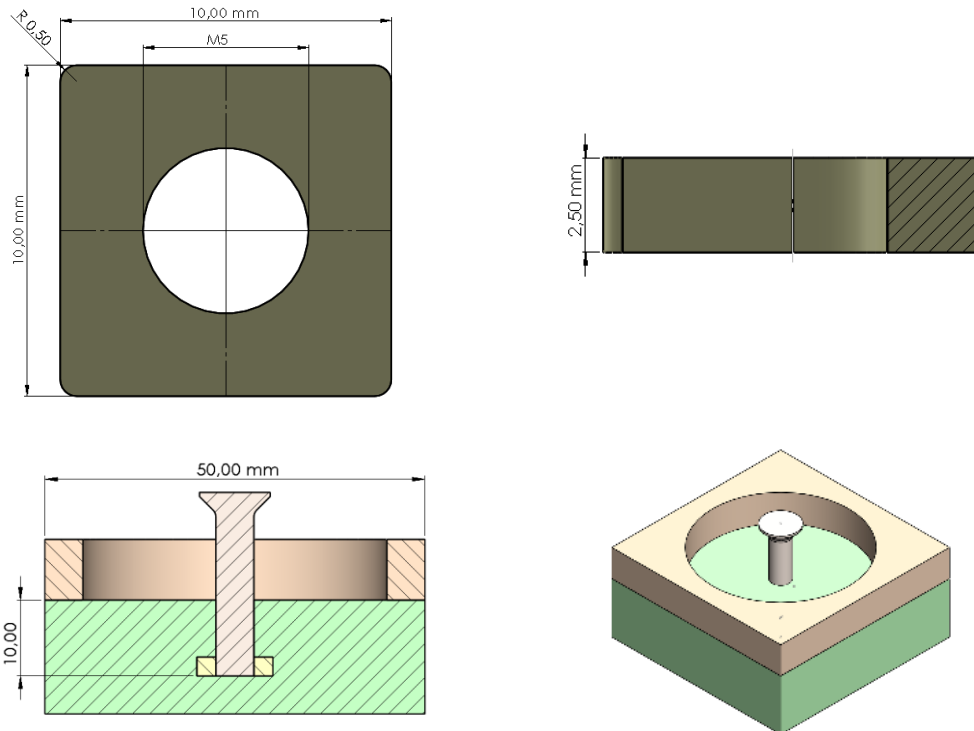
Resim 3.10 Ağaç Somun

Altıköşe Başlı ve Kare Somun (Resim 3.11 ve Resim 3.12), mekanik bileşenleri birbirine bağlamak için kullanılan birincil bir alettir. Somunlar genellikle kare veya altıgen şeklinde, merkezinde bir delik bulunan bir metal blok olarak tanımlanabilir. Delik, standart bir vidanın dış dişleriyle uyum sağlaması için içten dışlıdır. Kilitli somunlar, kanallı veya taçlı somunlar ve kanatlı somunlar gibi varyasyonlar, öncelikle somunun titreşim sırasında gevşemesini önlemek için tasarlanmıştır. Bir kilitli somun, dönmeye karşı sürtünme direncini artırmak için naylon veya başka bir plastik malzemeden yapılmış

bir parça içerir (Chand vd. 2022, Graves 1984).

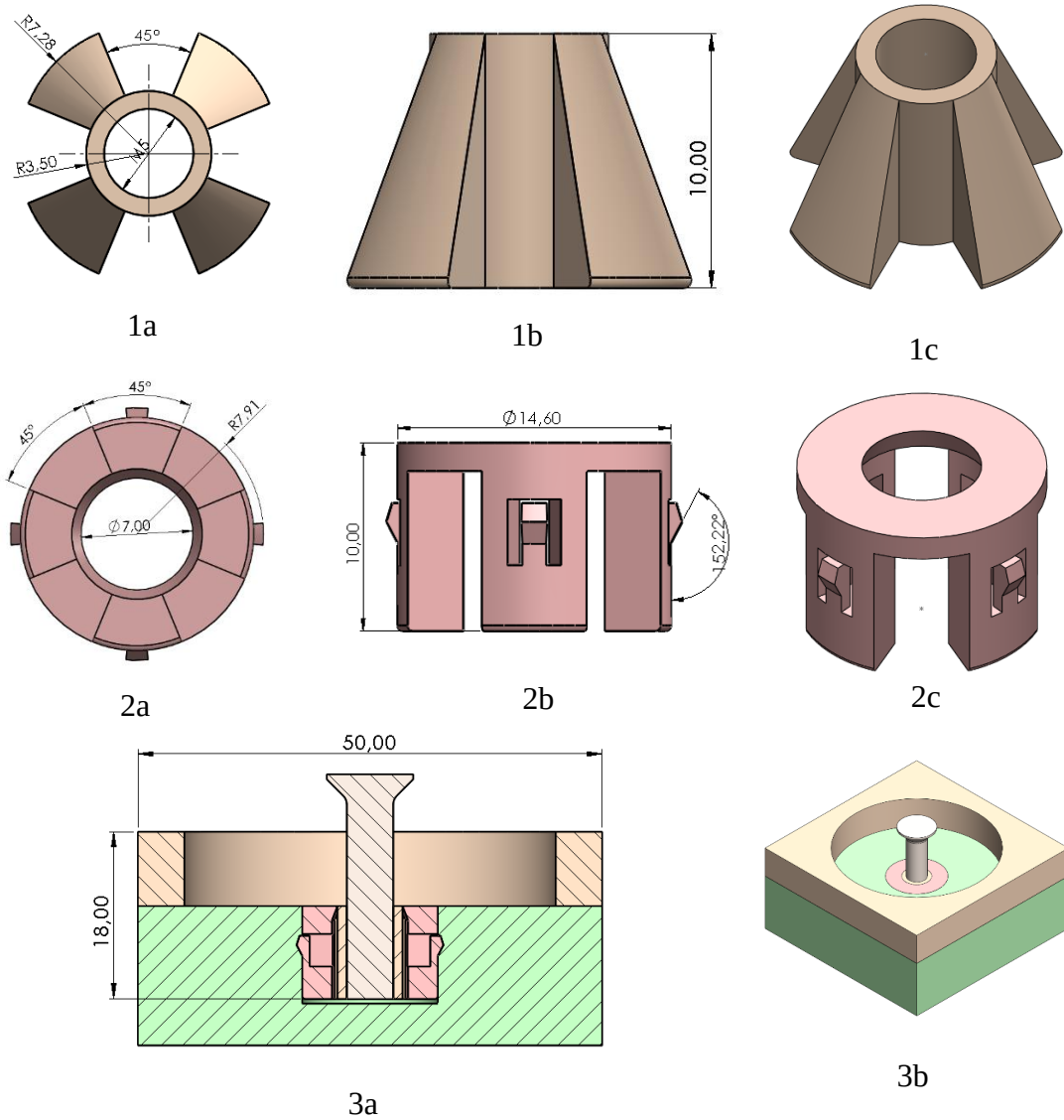


Resim 3.11 Altıgen Somunlar



Resim 3.12 Kare Somunlar

Özel İnsert Dübel, diğer bağlantı aparatlarının yerine Eİ alanında kullanılmak üzere geliştirilmiş bir tasarımıdır. Tasarım yaklaşım sürecinde, (Omidvarkarjan vd. 2021a) tarafından önerilen “AM Dowel” konseptinden esinlenilmiştir. Ancak mevcut çalışmada kullanılan geometri, TPMS tabanlı yapılarda çekme yükü altında mekanik davranışın değerlendirilmesine yönelik olarak yeniden tasarlanmıştır.



Resim 3.13 Özel İnsert Dübel: 1a insert, 2a klip ve 3a Özel Dübel

Tasarlanan sistem iki ana bileşenden oluşmaktadır. Birinci bileşen, vida bağlantısını taşıyan ve numune içerisine döndürülerek yerleştirilen kenetlenmeli insert gövdesidir. Bu insert (Resim 3.13 1a, 3.13 1b ve 3.13 1c), çevresindeki polimer yapı ile mekanik

kilitlenme oluşturacak şekilde tasarlanmıştır. İkinci bileşen ise, insertin dönmesini engellemek amacıyla geliştirilen kitleme klipsidir (Resim 3.13 2a, 3.13 2b ve 3.13 2c). Klips, numune gövdesi içerisine esneyerek kilitlenme (snap-fit) mekanizması ile yerleşmekte ve insert yapısının dönme hareketini sınırlandırarak bağlantı stabilitesini artırmaktadır (Resim 3.13 3a ve Resim 3.13 3b).

Bu insert aparatı, standart bağlantı elemanlarının yerine geçecek nihai bir çözüm olarak değil, TPMS yapılarında alternatif yük aktarım ve kenetlenme mekanizmalarının araştırılmasına yönelik ön değerlendirme niteliğinde sınırlı bir karşılaştırma vaka çalışması olarak incelenmiştir.

3.3. Malzeme Özellikleri

İncelenen montaj, üç ana malzemeden oluşmaktadır: eklemeli imalatla üretilen test numuneleri için Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS), bağlantı vidaları için yapısal çelik ve dişli insertler için pirinç malzemeleri kullanılmıştır. Bu malzemeler, eklemeli imalatla üretilen bağlantı sistemlerinde ve mekanik birleştirme ara yüzeylerinde yaygın olarak kullanılmaları nedeniyle sečilmiřtir. Özel insert tasarımında; dübel parçası için pirinç, klips parçası için ise ABS kullanılmıştır. Sayısal modelde uygulanan mekanik özellikler, simülasyon boyunca homojen, izotropik ve doğrusal elastik olarak varsayılmıştır. Sonlu eleman analizinde kullanılan malzeme parametreleri Çizelge 3.3'te gösterilmiştir.

Pratik mühendislik uygulamalarında kullanılan bağlantı bileşenleri, türlerine ve amaçlanan uygulamalarına bağlı olarak farklı malzemelerden üretilse de bu çalışmada tutarlı bir karşılaştırma değerlendirme sağlamak amacıyla malzeme standardizasyonu yaklaşımı benimsenmiştir. Örneğin, Helicoil insert ve ahşap insert (Ağağ Somun) aparatları, üstün korozyon direnci ve mekanik dayanımları nedeniyle yaygın olarak paslanmaz çelikten üretilmektedir. Bununla birlikte, bu çalışma amacıyla, tüm bağlantı insert aparatları pirinç malzeme özellikleri kullanılarak modellenmiştir. Bu varsayım, malzeme etkisini ortadan kaldırmak için benimsenmiştir. İncelenen tüm konfigürasyonlarda tutarlı bir insert malzemesi korunarak, sayısal karşılaştırmanın malzeme rijitliği veya dayanımından kaynaklanan farklılıklardan ziyade öncelikli olarak

yapısal ve geometrik etkilere odaklanması sağlanmıştır.

Çizelge 3.3 Sayısal Simülasyonlarda Kullanılan Malzemelerin Mekanik Özellikleri

Malzeme	Yoğunluk (kg/m ³)	Elastisite Modülü (MPa)	Poisson Oranı	Kayma Modülü (Pa)
ABS	1050	2408	0.4078	8.5524×10^8
Yapısal Çelik	7850	200000	0.300	7.6923×10^{10}
Pirinç	8267	99950	0.345	3.7156×10^{10}

3.4. Sonlu Elemanlar Analizi

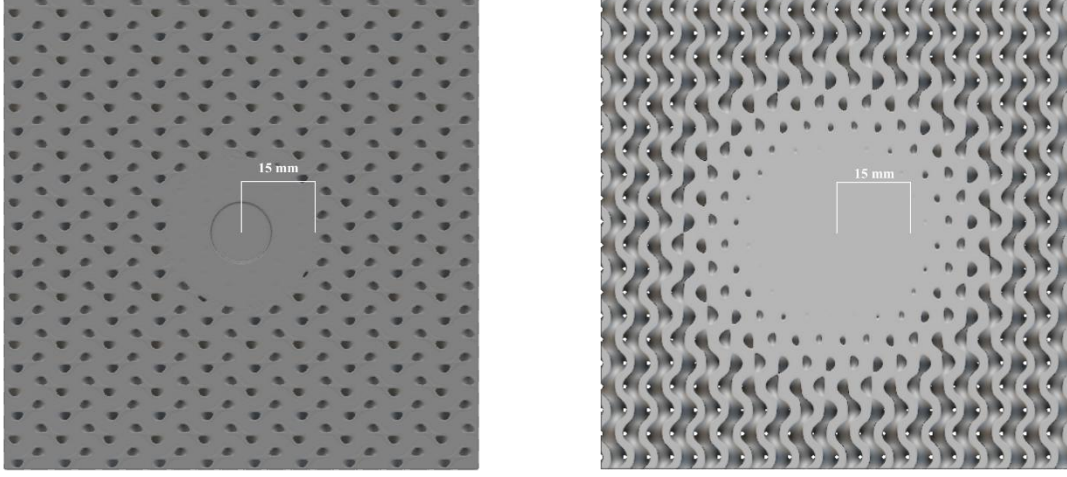
Çalışma iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, insert kullanılmayan düzenli ve fonksiyonel olarak derecelendirilmiş TPMS yapıları karşılaştırılmıştır. Numuneler, %65, %75 ve %85 bağıl yoğunluklarda Gyroid, Diamond ve Schwarz-P TPMS kafes yapıları nTop programında tasarlanmıştır. Tüm modeller yaklaşık 0,75 mm ağ boyutunda optimize edilmiş ve ardından çekme testi analizi için ANSYS Workbench 2025 R2'ye aktarılmıştır (Resim 3.14 ve Resim 3.15).

İkinci aşamada, yalnızca fonksiyonel olarak derecelendirilmiş TPMS yapıları entegre insertlerle birlikte incelenmiştir. Her insert tipi (ısıyla çakılan olarak monte edilen ve doğrudan basılmış dişli) ve her TPMS kafes yapısı (Gyroid, Diamond, Schwarz-P) için %65, %75, %85 ve %100 bağıl yoğunluklarda modeller oluşturulmuştur.

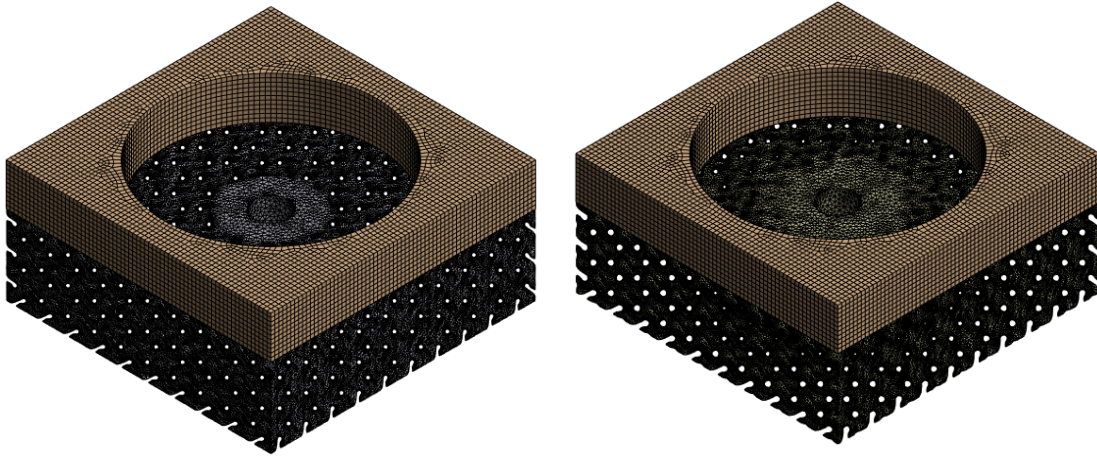
3.4.1. Birinci Aşama: İntert Somun ve Benzeri Bağlantı Aparatlarının Olmaması Durumunda TPMS Kafes Yapılı Numunelerin Analizi

İlk analiz aşamasında, Düzenli ve FD TPMS kafes yapılı numuneler nTop programında modellenmiştir. Numune geometrisi, 50 × 50 × 15 mm boyutlarında bir ABS blok olarak tasarlanmış ve merkezine 8 mm çapında bir delik açılmıştır. TPMS kafes yapılarının oluşturulmasında Periodic Lattice Block komutu kullanılmış ve tüm modeller için birim hücre boyutu 5 × 5 × 5 mm olarak sabit tutulmuştur. Çalışma kapsamında incelenen

TPMS topolojileri sırasıyla Gyroid, Diamond ve Schwarz-P olarak seçilmiş ve birim hücre tipi buna göre değiştirilmiştir.



Resim 3.14 Düzenli ve FD TPMS kafes yapısı



Resim 3.15 Düzenli ve Fonksiyonel Ağ Yapısı

Düzenli numunelerde, merkezi deliğin etrafına 15 mm çapında silindirik bir bölge eklenmiş ve bu bölgenin duvar kalınlığı değiştirilerek hedeflenen bağıl yoğunluk seviyeleri (%65, %75 ve %85) elde edilmiştir. FD TPMS kafes yapılı numunelerde ise Ramp komutu, Periodic Lattice Block üzerine uygulanmıştır. Derecelendirme işlemi için merkezde bulunan 8 mm çapındaki delik bir skaler alan olarak tanımlanmıştır. Bu yaklaşımda maksimum duvar kalınlığı 2,5 mm olarak belirlenmiş, minimum duvar

kalınlığı ise hedeflenen bağıl yoğunluk değerlerine ulaşmak amacıyla kademeli olarak değiştirilmiştir. Böylece, yük aktarımının gerçekleştiği merkezi bölgede daha yoğun bir yapı elde edilirken, dış bölgelere doğru malzeme miktarı kontrollü biçimde azaltılmıştır.

Oluşturulan modeller öncelikle CAD geometrisinden örtük geometriye (implicit body) dönüştürülmüş, ardından sonlu elemanlar analizine uygun ağ yapısı oluşturulmuştur. Ağ oluşturma işleminde, TPMS geometrilerindeki karmaşık yüzey geçişlerini ve olası geometrik kusurları başarılı şekilde işleyebilmesi nedeniyle FE Robust Tetrahedral Mesh bloğu kullanılmıştır. Bu yöntem, özellikle TPMS kafes yapılarda oluşabilecek yüzey bozulmaları ve karmaşık geometrilerin yüksek doğrulukla ağlaştırılmasını sağlamaktadır. Bununla birlikte, bu yaklaşımın yüksek geometrik dayanıklılık sağlamasına karşın hesaplama süresini artırdığı bilinmektedir. Numunenin her yerinde mesh boyutu 0,5 mm olarak belirtilmiştir (Resim 3.15).

Ağ yapısı oluşturma işleminin ardından numuneler, sonlu eleman modeli (FE Model) olarak ANSYS Workbench 2025 R2 ortamına aktarılmıştır. Analiz kurulumunda, numunenin üst kısmına çekme testini temsil eden örnek tutucu yerleştirilmiş ve doğrudan temas eden tüm yüzeyler bonded kontak koşulu ile tanımlanmıştır. Çekme testi davranışını temsil etmek amacıyla, merkezi deliğin çevresel yüzeyine yukarı yönlü 500 N büyüklüğünde kuvvet uygulanmıştır. Numune tutucusunun üst yüzeyi sabitlenmiş ve böylece çekme testine benzer sınır şartları oluşturulmuştur. Analiz sonucunda toplam deformasyon, eşdeğer von Mises gerilimi ve eşdeğer gerinim değerleri değerlendirilmiştir.

3.4.2. İkinci Aşama: İncert Somun ve Benzeri Bağlantı Aparatlarının Olma Durumunda FD TPMS Kafes Yapılı Numunelerin Analizi

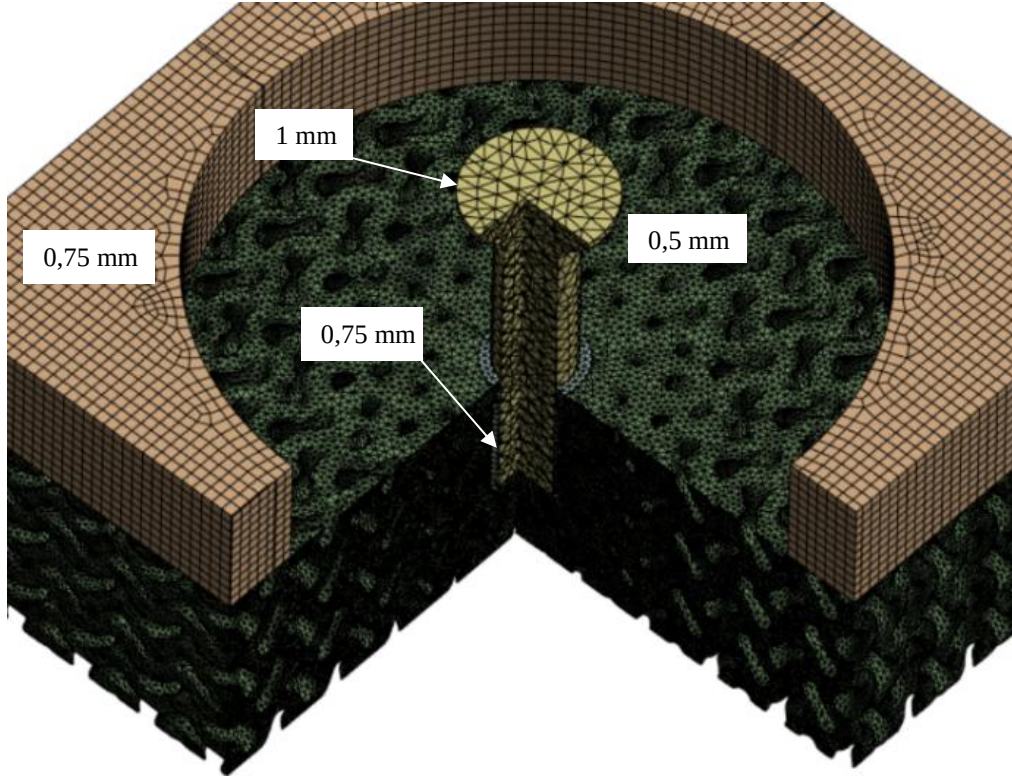
İkinci analiz aşamasında, yalnızca FD TPMS kafes yapılar değerlendirilmiş ve farklı insert tiplerinin mekanik performans üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu aşamada, temel numune geometrisi yine $50 \times 50 \times 15$ mm boyutlarında ABS blok olarak modellenmiştir. Ancak merkezde oluşturulan boşluk geometrisi, kullanılan insert tipine bağlı olarak yeniden tasarlanmıştır. İlgili insert CAD modelleri nTop programından modellenmiş ve Boolean Subtract işlemi kullanılarak insert geometrisine uygun boşluklar numune

içerisinde oluşturulmuştur.

TPMS yapıları yine Periodic Lattice Block komutu kullanılarak modellenmiş, birim hücre boyutu tüm numunelerde $5 \times 5 \times 5$ mm olarak sabit tutulmuştur. TPMS topolojisi, Gyroid, Diamond ve Schwarz-P olacak şekilde değiştirilmiştir. FD işlemi için Ramp komutu uygulanmış ve bu kez insert geometrisi bir skaler alan olarak kullanılmıştır. Maksimum duvar kalınlığı 2,5 mm olarak sabit tutulurken, minimum duvar kalınlığı hedeflenen bağıl yoğunluk seviyelerine (%65, %75 ve %85) ulaşacak şekilde değiştirilmiştir. Böylece insert çevresinde daha yoğun ve rijit bir bölge oluşturularak yük aktarımının iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

Oluşturulan modeller CAD geometrisinden örtük geometriye (implicit body) dönüştürülmüş ve ardından ağ yapısı oluşturulmuştur. Geometrik karmaşıklığın insert tipine bağlı olarak değişmesi nedeniyle ağ boyutu yaklaşık 0,25 mm ile 0,75 mm arasında değiştirilmiştir (Resim 3.16). Özellikle karmaşık insert geometrilerinin ve TPMS geçiş bölgelerinin doğru şekilde temsil edilmesi amacıyla FE Robust Tetrahedral Mesh yöntemi tercih edilmiştir. Ağlaştırılan numuneler daha sonra ANSYS Workbench 2025 R2 ortamına FE Model olarak aktarılmıştır.

ANSYS ortamında, numune ile insert, vida ve örnek tutucu geometrileri montaj halinde yerleştirilmiştir. Temas eden tüm yüzeyler bonded kontak koşulu ile tanımlanmıştır. Bu yaklaşım, sayısal modeli basitleştirmek ve çekme testi yüklemesi altında TPMS topolojisi ile insert geometrisinin yapısal tepki üzerindeki etkisini izole etmek amacıyla tercih edilmiştir. Çekme yükünü temsil etmek amacıyla, vida başı çevresine yukarı yönlü 500 N kuvvet uygulanmış, örnek tutucunun üst yüzeyi ise sabitlenmiştir. Böylece çekme testi koşulları sayısal ortamda temsil edilmiştir. Analiz sonuçları kapsamında toplam deformasyon, eşdeğer von Mises gerilimi ve eşdeğer gerinim davranışları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.



Resim 3.16 İnsert somun ve benzeri bağlantı aparatlarından oluşan montaj ve TPMS kafes yapısının FE modeli

4. BULGULAR

4.1. Düzenli ve FD Kafes Yapılarının Karşılaştırılması

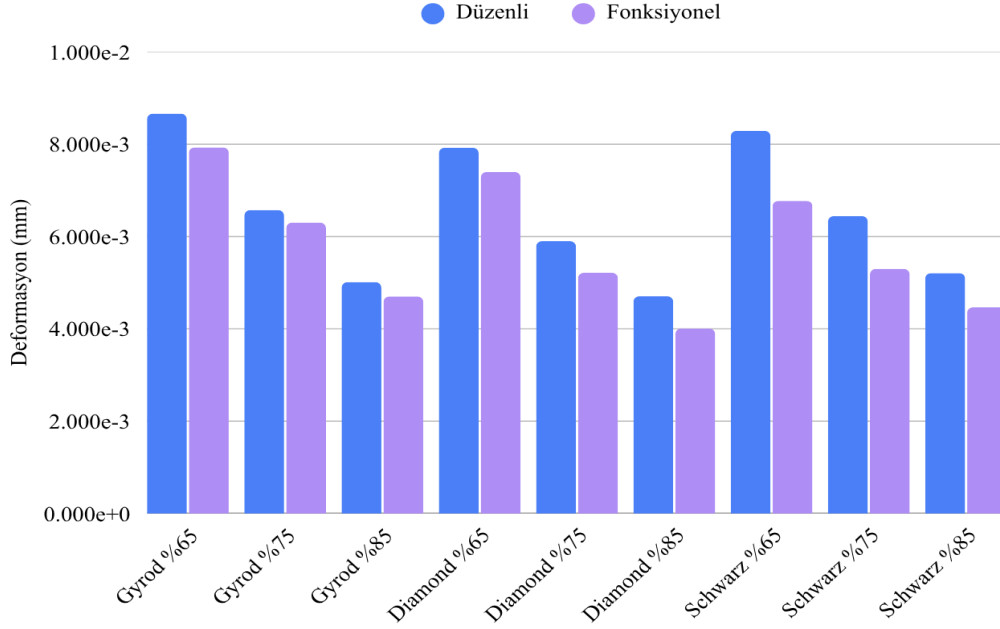
Düzenli ve FD kafes yapıları arasındaki karşılaştırmalı analiz, çekme testi altında belirgin farklılıklar ortaya koymaktadır. Gyroid, Diamond ve Schwarz-P olmak üzere tüm topolojiler ve %65, %75 ve %85 doluluk oranları boyunca, FD kafes yapılarının konfigürasyonları, düzenli kafes yapılara kıyasla tutarlı bir şekilde daha düşük deformasyon büyüklükleri ve azaltılmış tepe gerilim değerleri sergilemiştir (Çizelge 4.1).

Çizelge 4.1 Düzenli ve Fonksiyonel Olarak Derecelendirilmiş Kafeslerin Karşılaştırmalı Performansı

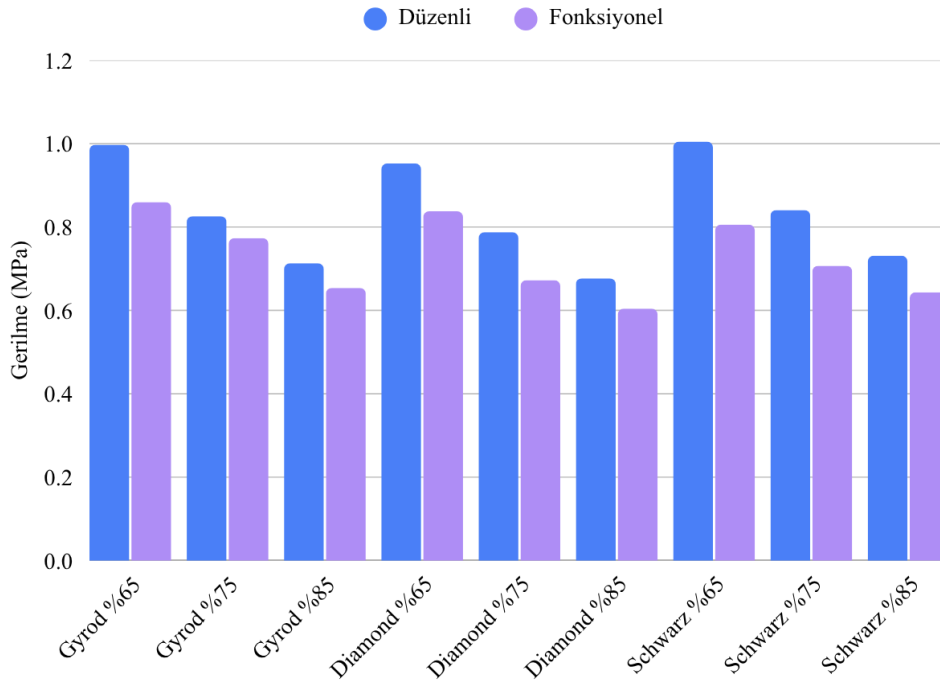
Topoloji	Doluluk Oranı (%)	Düzenli Deformasyon (mm)	FD Deformasyon (mm)	Azalma (%)	Düzenli Gerilme (MPa)	FD Gerilme (MPa)	Azalma (%)
Gyroid	65	8.66E-03	7.93E-03	8.4	0.997	0.860	13.8
Gyroid	75	6.57E-03	6.30E-03	4.1	0.826	0.773	6.4
Gyroid	85	5.01E-03	4.70E-03	6.2	0.713	0.654	8.3
Diamond	65	7.92E-03	7.40E-03	6.6	0.952	0.838	12.0
Diamond	75	5.90E-03	5.21E-03	11.7	0.787	0.672	14.6
Diamond	85	4.70E-03	4.01E-03	14.7	0.677	0.604	10.8
Schwarz-P	65	8.29E-03	6.77E-03	18.3	1.005	0.806	19.8
Schwarz-P	75	6.44E-03	5.30E-03	17.7	0.841	0.707	15.9
Schwarz-P	85	5.21E-03	4.47E-03	14.2	0.731	0.643	12.0

FD kafes yapılarında deformasyon ve gerilimdeki azalma, kafes mimarisi içindeki malzeme yoğunluğunun yeniden dağıtılmasından kaynaklanmaktadır. FD kafes yapısındaki yoğunluk oranı bağlantı elemanından dışarı doğru gidildikçe düşmektedir. Bu nedenle, FD kafes yapılarında bağlantı elemanına yakın bölgeler düzenli kafes yapılarına göre çekme yükü altında daha az deforme olmaktadır. Örneğin, %85 yoğunluktaki Diamond topolojisinde, fonksiyonel derecelendirme, normal yapıya kıyasla deformasyonda %14,7'lik bir azalma sağlamıştır (Çizelge 4.1, Şekil 4.1). Ayrıca, düzenli

kafes yapıları, yük bölgelerinde daha yüksek gerilim değerleri gösterir. Bu durum, topoloji ve yoğunluğa bağlı olarak %6,4 ile %19,8 arasında değişen gerilim azalımı değerlerine yansımaktadır (Çizelge 4.1, Şekil 4.2).



Şekil 4.1 Düzenli ve Fonksiyonel Derecelendirilmiş Kafeslerde Deformasyonun Karşılaştırmalı Performansı

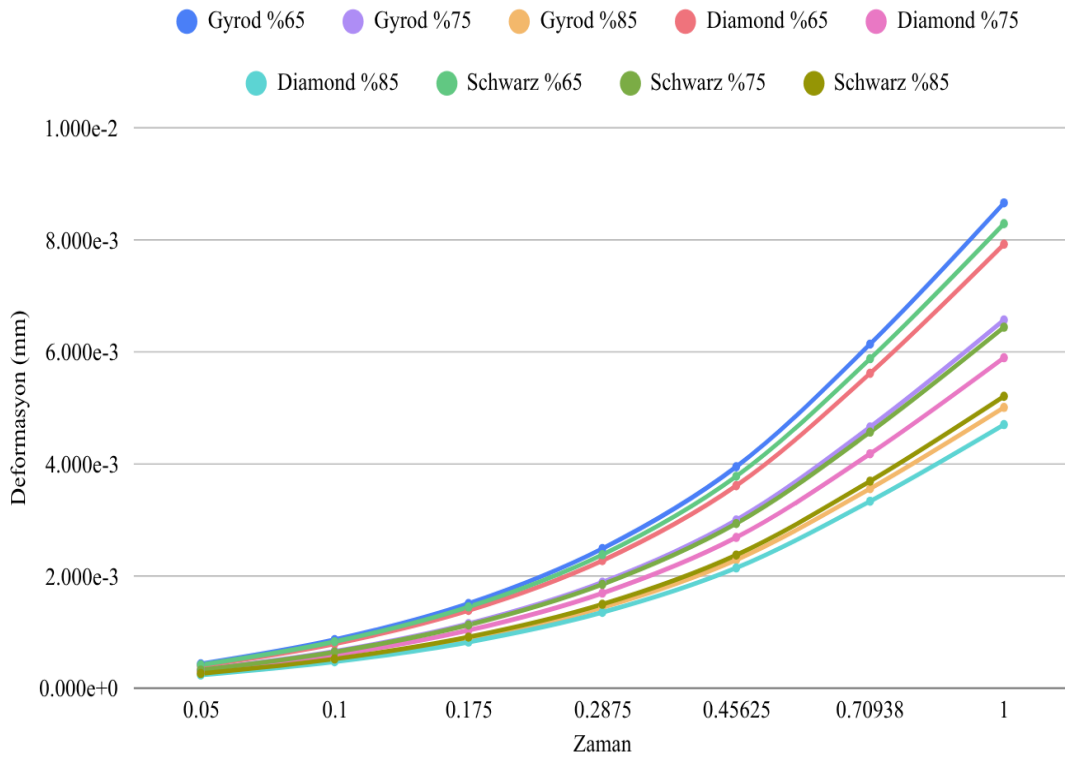


Şekil 4.2 Düzenli ve Fonksiyonel Derecelendirilmiş Kafeslerde Gerilmenin Karşılaştırmalı Performansı

4.2. Gyroid, Diamond ve Schwarz-P Kafes Yapılarının Karşılaştırılması

4.2.1. Düzenli Kafes Yapısının Karşılaştırmalı Analizi

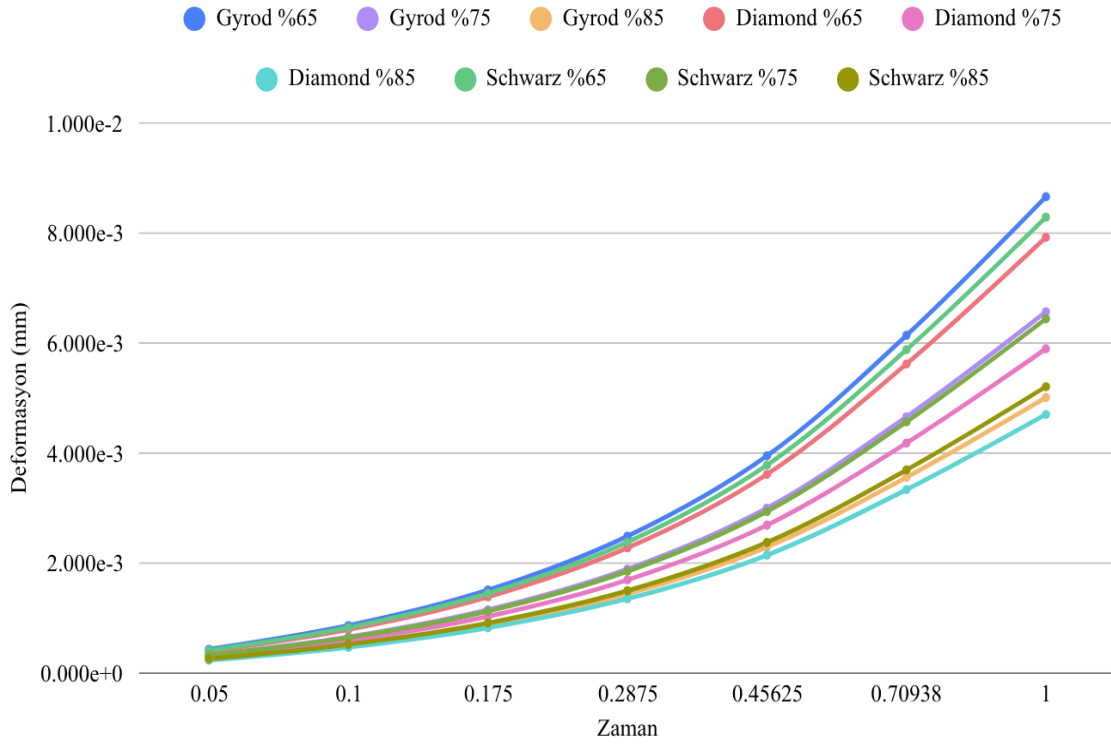
%65 ve %75 yoğunluklarda, Schwarz-P, hem Diamond hem de Gyroid %65 dolulukta, Schwarz-P yapısı Diamond ve Gyroid konfigürasyonlarına kıyasla daha yüksek bir gerilim azalımı ve düşük deformasyon sergilemektedir (Çizelge 4.1). Schwarz-P kafes yapısı, nispeten izotropik mekanik özelliklere sahip levha benzeri bir morfolojiye sahiptir ve bu sayede birden fazla yönelimde verimli yük transferi sağlar. Ancak %75 ve %85 doluluk oranlarına çıkıldığında, Diamond topolojisi hem Schwarz-P hem de Gyroid'den daha düşük deformasyon ve gerilim değerleri göstererek öne geçmektedir. Bu durum, doluluk katı hale yaklaştıkça Diamond yapısının kritik bir mekanik performans eşğine ulaştığını göstermektedir. Diamond kafesin düğüm noktaları daha rijit bir ağ oluşturur. Gyroid ise belirli yükleme koşulları altında gerilim dağılımı için mükemmel olsa da %65, %75 ve %85 doluluk oranlarında çekme testi sırasında oluşan lokal çekme gerilimlerine direnmede diğer yapılara kıyasla daha az etkili görünmektedir.



Şekil 4.3 Düzenli Kafes Yapısının Karşılaştırılması

4.2.2. FD Kafes Yapısının Karşılaştırmalı Analizi

FD kafes yapılarına ait %65 ve %75 yoğunluklarda sıralama, düzenli kafes yapısına benzer şekildedir: Schwarz-P > Diamond > Gyroid. Ancak FD kafes yapıları arasındaki performans farkı, düzenli kafes yapılara kıyasla daralmıştır; bu da FD kafes yapısının, daha düşük performans gösteren yapılara nispeten daha fazla fayda sağladığını göstermektedir. %85 yoğunlukta ise, düzenli kafes yapısında olduğu gibi Diamond daha etkin performans göstermiştir.



Şekil 4.4 FD Kafes Yapılarının Karşılaştırması

4.3. Kafes Yapılarında Doluluk Oranının Etkisi

Doluluk oranının %65'ten %85'e çıkarılması, tüm kafes yapılarında deformasyonda önemli azalmalar sağlamıştır. Çizelge 4.2, ardışık yoğunluk artışlarında elde edilen deformasyon azalmalarını göstermektedir. Diamond en yüksek azalmayı (toplamda %45,9) gösterirken, Schwarz-P en düşük azalmayı (toplamda %34,0) sergilemiştir. Diamond kafes yapısında %65'ten %75'e çıkış %29,6 oranında azalma sağlarken, %75'ten

%85'e çıkış yalnızca %23,2 oranında ek azalma sağlamıştır. Schwarz-P'da %65'ten %75'e çıkış %21,8 oranında azalma sağlarken, %75'ten %85'e çıkış yalnızca %15,7 oranında ek azalma sağlamıştır. Optimuma yakın performansa nispeten düşük doluluk oranlarında ulaşılmaktadır. Gyroid kafes yapısında deformasyon azalması daha dengeli dağılmıştır (%20,5 ve %25,4).

Çizelge 4.2 Artan Doluluk Oranı ile Deformasyon Azalması (Fonksiyonel Olarak Derecelendirilmiş Yapılar)

Kafes Yapısı	%65 → %75 Azalma (%)	%75 → %85 Azalma (%)	%65 → %85 Azalma (%)
Gyroid	20.5	25.4	40.7
Diamond	29.6	23.2	45.9
Schwarz-P	21.8	15.7	34.0

Gerilim azalma eğilimleri benzer trendler izlemiş ancak Çizelge 4.3'te gösterildiği gibi daha düşük büyüklüklerde gerçekleşmiştir. Diamond kafes yapısında gerilim, %65–85 Doluluk aralığında toplamda %27,9 oranında azalmış; bu gerilme azalmasının büyük kısmı (%19,7'si) %65–75 aralığında elde edilmiştir. Schwarz-P en düşük toplam azalmaya (%20,2) sahip olup, %75'in ötesinde minimum gerilme azalması (%9,0) göstermiştir. Gyroid ise %65–85 aralığında orta düzeyde bir gerilme azalması (%23,9) sergilemiştir.

Çizelge 4.3 Artan Doluluk Oranı ile Eşdeğer von Mises Gerilim Değişimi

Kafes Yapısı	%65 to %75 Azalma (%)	%75 → %85 Azalma (%)	%65 → %85 Azalma (%)
Gyroid	10.1	15.4	23.9
Diamond	19.7	10.2	27.9
Schwarz-P	12.2	9.0	20.2

4.4. FD TPMS Kafes Yapılarında İncert Somun ve Benzeri Bağlantı Aparatlarının Karşılaştırmalı Analizi

Çizelge 3.2’de gösterilen Eİ alanında kullanılan insert somun ve benzeri bağlantı aparatları, yerleştirme yöntemleri ve yük aktarım mekanizmalarına göre üç gruba ayrılmış ve her grup kendi içerisinde mekanik karakteristik olarak incelenmiştir.

Birinci grupta, ısı uygulanarak yerleştirilen ve TPMS kafes yapısıyla doğrudan etkileşime giren Helisel İntert (Helisat) ve Düz İntert sistemleri ele alınmıştır.

İkinci grupta, ısı işlem gerektirmeksizin presle, genişterek veya kendi dişini açarak doğrudan kafes yapısına tutunan Altıköşe Başlı Pres İntert, Ahşap İntert, Helicoil İntert, Genleşen İntert ve Kendinden Kılavuzlu İntert aparatları mekanik tutunma özellikleri doğrultusunda incelenmiştir.

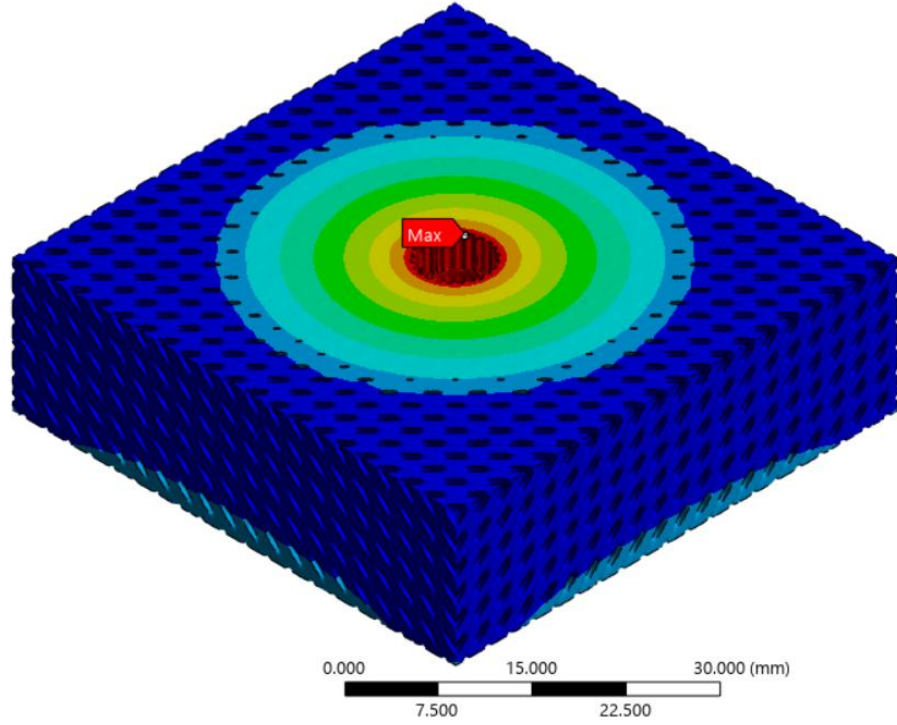
Üçüncü grupta ise Ağaç Somun, Kare Somun ve Altıköşe Başlı Somun benzer gömülü bağlantı şekillerinden dolayı kendi içlerinde değerlendirilmiştir. Bu somun aparatları numune gövdesine gömülü bir şekilde monte edilmiş ve TPMS kafes yapılı arayüzey ile doğrudan etkileşime girmemiştir. Bunun yerine, yük aktarımı vida ile insert arasındaki bir ara polimer duvarı aracılığıyla gerçekleşmiş ve bu da geleneksel/doğrudan yerleştirilmiş bağlantı elemanlarına kıyasla farklı bir mekanik tepkiyle sonuçlanmıştır.

4.4.1. Isı ile Yerleştirilen Doğrudan Etkileşimli İntert Sistemleri (Birinci Grup)

Çizelge 3.2’de tanımlanan birinci grup kapsamında, ısıtılarak polimer matris içerisine yerleştirilen ve TPMS kafes yapılarıyla doğrudan temas eden Helisel İntert ve Düz İntert sistemlerinin mekanik davranışları incelenmiştir (Çizelge 4.4, Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6). Tüm kafes tiplerinde (Gyroid, Diamond, Schwarz-P) doluluk oranı %65’ten %85’e çıkarıldıkça deformasyon miktarlarının belirgin şekilde azaldığı görülmüştür (Çizelge 4.4). Örneğin, Helisel İntert kullanılan Gyroid yapıda deformasyon 9.17×10^{-3} mm’den 5.09×10^{-3} mm’ye düşerek yaklaşık %445 oranında gerilemiştir. Düz İntert (Resim 4.1/4.2) kullanılan Diamond yapıda ise deformasyon 7.00×10^{-3} mm’den 4.07×10^{-3} mm’ye inmiştir. Doluluk oranının artması, insert etrafındaki polimer et kalınlığını ve hücre çeperlerinin yük taşıma kapasitesini artırarak yapının daha rijit davranmasını sağlamıştır.

D: Static Structural
 Total Deformation Test
 Type: Total Deformation
 Unit: mm
 Time: 1 s
 6/16/2026 8:30:50 AM

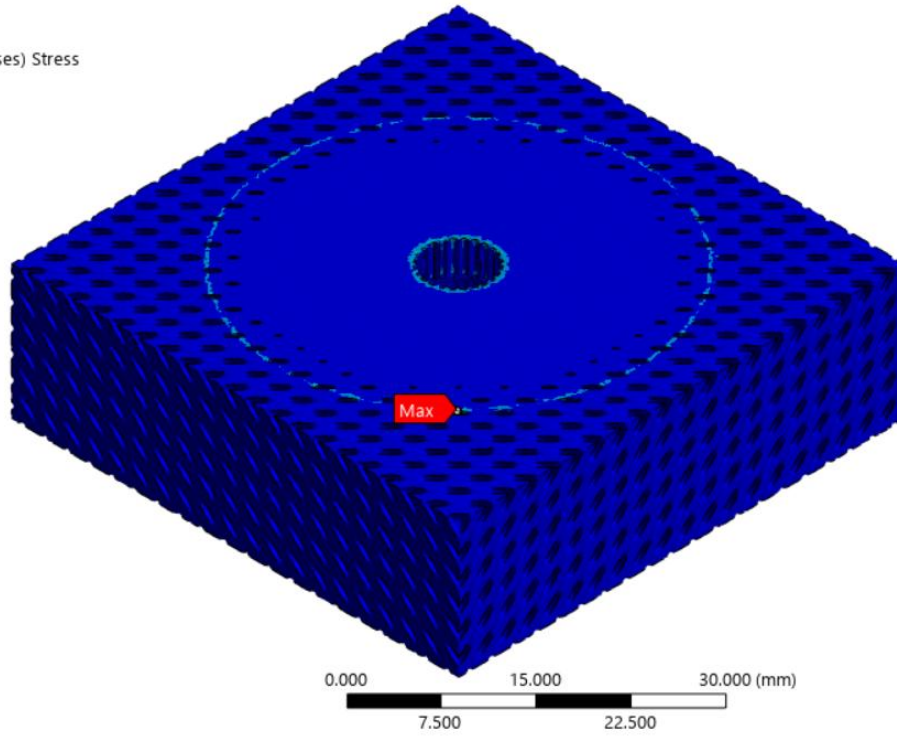
0.023687 Max
 0.021055
 0.018423
 0.015792
 0.01316
 0.010528
 0.0078968
 0.0052651
 0.0026335
1.8139e-6 Min



Resim 4.1 Düz İnsert – Diamond – %85 – Deformasyon

D: Static Structural
 Equivalent Stress Test
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress
 Unit: MPa
 Time: 1 s
 6/16/2026 8:32:14 AM

46.321 Max
 41.174
 36.027
 30.881
 25.734
 20.587
 15.44
 10.294
 5.1468
7.7418e-7 Min



Resim 4.2 Düz İnsert – Diamond – %85 – Gerilme

Kafes mimarileri ve insert türleri karşılaştırıldığında, tüm koşullarda en düşük deformasyon (en yüksek rijitlik) Diamond geometrisinde elde edilmiştir. Diamond yapısının geometrik formu, gelen yükü hücresel çeperlere daha eşit dağıtarak lokal gerilme birikimlerini önlemiştir. Ayrıca Düz Insert, tüm TPMS mimarilerinde ve tam dolu (Solid) numunelerde Helisel Insert'e göre daha düşük deformasyon sergilemiştir. En düşük deformasyon değeri %85 doluluklu Diamond yapıda Düz Insert ile 4.07×10^{-3} mm olarak ölçülmüştür (Çizelge 4.4). Düz insertlerin pürüzsüz dış yüzeyi, erime esnasında polimerle daha kesintisiz bir temas yüzeyi oluşturmuş ve helisel diş adımlarının neden olabileceği gerilme yığılmalarının önüne geçerek daha sağlam bir tutunma sağlamıştır.

Çizelge 4.4 FD TPMS Yapılarında Isıl Yerleştirilen Insert Aparatlarının Deformasyonlarının Karşılaştırmalı Performansı

Insert Aparatları	Doluluk Yapısı	Deformasyon (mm)		
		65%	75%	85%
Helisel Insert	Gyroid	9.17E-03	6.82E-03	5.09E-03
	Diamond	8.07E-03	6.15E-03	4.82E-03
	Schwarz-P	8.32E-03	6.34E-03	5.34E-03
	Solid		4.41E-03	
Düz Insert	Gyroid	8.22E-03	6.42E-03	4.92E-03
	Diamond	7.00E-03	5.43E-03	4.07E-03
	Schwarz-P	6.18E-03	5.76E-03	4.83E-03
	Solid		4.30E-03	

Çizelge 4.5 FD TPMS Yapılarında Isıl Yerleştirilen Insert Aparatlarının Eşdeğer von Mises Gerilmelerinin Karşılaştırmalı Performansı

Insert Aparatları	Doluluk Yapısı	Gerilme (MPa)		
		65%	75%	85%
Helisel Insert	Gyroid	9.26E-01	7.96E-01	6.66E-01
	Diamond	8.59E-01	7.46E-01	6.62E-01
	Schwarz-P	8.94E-01	7.65E-01	7.00E-01
	Solid		6.39E-01	
Düz Insert	Gyroid	8.93E-01	7.82E-01	6.81E-01
	Diamond	8.03E-01	7.07E-01	6.00E-01
	Schwarz-P	8.47E-01	7.42E-01	6.72E-01
	Solid		6.19E-01	

Çizelge 4.6 FD TPMS Yapılarında Isıl Yerleştirilen İnsert Aparatlarının Gerinimlerinin Karşılaştırmalı Performansı

İnsert Aparatları	Doluluk Yapısı	Gerinim		
		65%	75%	85%
Helisel İnsert	Gyroid	3.99E-04	3.42E-04	2.85E-04
	Diamond	3.72E-04	3.21E-04	2.83E-04
	Schwarz-P	3.79E-04	3.24E-04	2.95E-04
	Solid		2.71E-04	
Düz İnsert	Gyroid	3.83E-04	3.34E-04	2.91E-04
	Diamond	3.45E-04	3.03E-04	2.56E-04
	Schwarz-P	2.94E-04	3.14E-04	2.83E-04
	Solid		2.62E-04	

4.4.2. Mekanik, Pres ve Kendinden Dış Açan İnsert Sistemlerinin Karşılaştırmalı Performansı (İkinci Grup)

Çizelge 3.2’de tanımlanan ikinci grup kapsamında, ısıtıl işlem uygulanmaksızın mekanik basma, genişleme veya kendinden dış açma yöntemleriyle polimer matrise tutunan Altıköşe Başlı Pres, Ahşap, Helicoil, Genleşen ve Kendinden Kılavuzlu İnsert aparatlarının mekanik davranışları, Eşdeğer von Mises gerilmeleri ve gerinim dağılımları incelenmiştir (Çizelge 4.7, Çizelge 4.8 ve Çizelge 4.9). Bu gruptaki tüm konfigürasyonlarda, doluluk oranının %65’ten %85’e çıkarılması toplam deformasyon, gerilme ve gerinim değerlerini tutarlı bir şekilde azaltmış; bu durum insert arayüzü etrafındaki lokal polimer takviyesinin yük aktarım etkinliğini artırdığını doğrulamıştır.

Bu grupta yer alan bağlantı elemanları arasında Helicoil İnsert ve Ahşap İnsert, en yüksek mekanik rijitlik ve en düşük gerilme yığılmasını sergileyen sistemler olarak öne çıkmıştır. Helicoil İnsert, özellikle Diamond TPMS mimarisinde yüksek performans göstermiş; deformasyon değeri %65 dolulukta 6.96×10^{-3} mm iken %85 dolulukta 4.25×10^{-3} mm’ye 0.625 MPa gerilme ve 2.67×10^{-4} gerinim gerilemiştir. Benzer şekilde Ahşap İnsert, geniş ve derin dış diş geometrisinin derecelendirilmiş kafes yapısıyla sağladığı güçlü mekanik kenetlenme sayesinde çekme deformasyonuna karşı yüksek direnç göstermiştir. %85 doluluk oranında Ahşap İnsert’in deformasyon değerleri Diamond yapıda 4.46×10^{-3} mm 0.626 MPa gerilme, Schwarz-P yapıda ise 4.66×10^{-3} mm 0.643 MPa gerilme olarak kaydedilmiştir.

Çizelge 4.7 FD TPMS Yapılarında Mekanik, Pres ve Kendinden Diş Açan İnsertlerin Deformasyon Analizi

İnsert Aparatları	Doluluk Yapısı	Deformasyon (mm)		
		65%	75%	85%
Altıköşe Başlı Pres İnsert	Gyroid	9.76E-03	7.28E-03	5.37E-03
	Diamond	8.53E-03	6.57E-03	4.72E-03
	Schwarz-P	8.18E-03	6.15E-03	4.92E-03
	Solid		4.08E-03	
Ahşap İnsert	Gyroid	8.98E-03	6.97E-03	5.06E-03
	Diamond	8.07E-03	5.94E-03	4.46E-03
	Schwarz-P	7.76E-03	5.66E-03	4.66E-03
	Solid		3.91E-03	
Helicoil İnsert	Gyroid	8.52E-03	6.66E-03	5.14E-03
	Diamond	6.96E-03	5.59E-03	4.25E-03
	Schwarz-P	8.58E-03	6.11E-03	5.16E-03
	Solid		4.79E-03	
Genleşen İnsert	Gyroid	1.07E-02	7.71E-03	5.75E-03
	Diamond	9.46E-03	7.12E-03	5.03E-03
	Schwarz-P	9.35E-03	6.90E-03	5.61E-03
	Solid		4.11E-03	
Kendinden kılavuzlu İnsert	Gyroid	9.87E-03	7.71E-03	5.51E-03
	Diamond	8.54E-03	6.81E-03	4.82E-03
	Schwarz-P	8.31E-03	6.26E-03	5.05E-03
	Solid		4.06E-03	

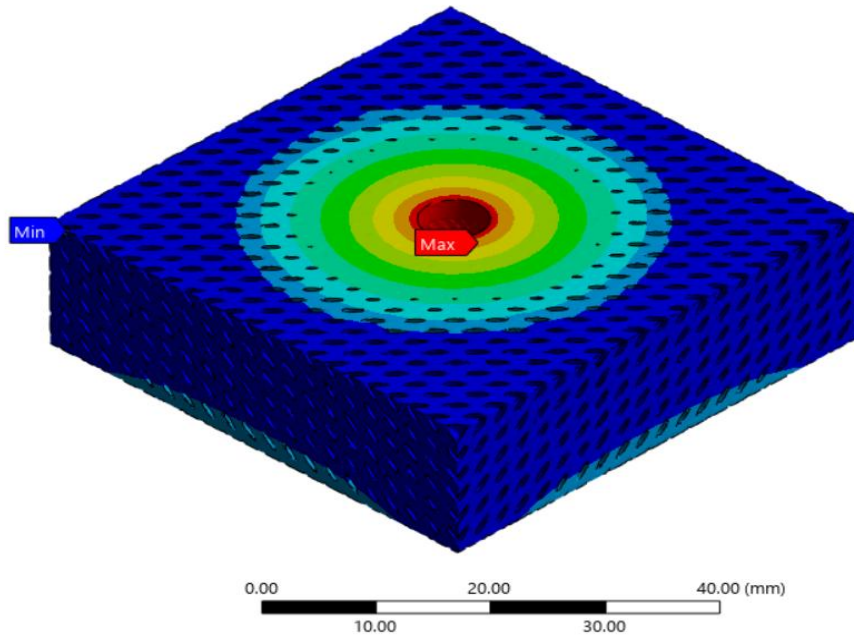
Buna karşılık, Genleşen İnsert ikinci gruptaki mekanik tutunmalı sistemler arasında en zayıf mekanik davranışı sergilemiştir (Resim 4.3/4.4). Tüm TPMS topolojilerinde Genleşen İnsert konfigürasyonları en yüksek deformasyon, gerilme ve gerinim değerlerini üretmiştir. Örneğin, %65 doluluk oranında Gyroid topolojisinde deformasyon 1.07×10^{-2} mm'ye ulaşırken eşdeğer gerilme 1.08 MPa'yı 1.08 MPa ve gerinim 4.67×10^{-4} değerini aşmıştır. Genleşen insertin yapısındaki kamanın matrise uyguladığı lokal radyal basınç, yetersiz mekanik kenetlenmeye ve kafes çeperlerinde erken gerilme yığılmalarına yol açmıştır.

Çizelge 4.8 FD TPMS Yapılarında Mekanik, Pres ve Kendinden Diş Açan İnsertlerin Eşdeğer Gerilme Analizi

İnsert Aparatları	Doluluk Yapısı	Gerilme (MPa)		
		65%	75%	85%
Altıköşe Başlı Pres İnsert	Gyroid	1.02E+00	8.60E-01	7.17E-01
	Diamond	9.17E-01	7.91E-01	6.57E-01
	Schwarz-P	9.11E-01	7.77E-01	6.82E-01
	Solid		6.02E-01	
Ahşap İnsert	Gyroid	9.37E-01	8.14E-01	6.75E-01
	Diamond	8.66E-01	7.21E-01	6.26E-01
	Schwarz-P	8.53E-01	7.15E-01	6.43E-01
	Solid		5.71E-01	
Helicoil İnsert	Gyroid	9.24E-01	8.10E-01	7.12E-01
	Diamond	7.96E-01	7.29E-01	6.25E-01
	Schwarz-P	9.27E-01	7.89E-01	7.17E-01
	Solid		7.01E-01	
Genleşen İnsert	Gyroid	1.08E+00	8.87E-01	7.47E-01
	Diamond	9.84E-01	8.39E-01	6.86E-01
	Schwarz-P	9.85E-01	8.28E-01	7.35E-01
	Solid		6.09E-01	
Kendinden kılavuzlu İnsert	Gyroid	1.03E+00	8.84E-01	7.28E-01
	Diamond	9.19E-01	8.09E-01	6.65E-01
	Schwarz-P	9.22E-01	7.82E-01	6.88E-01
	Solid		5.92E-01	

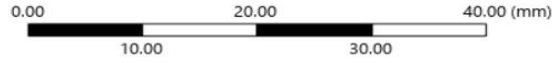
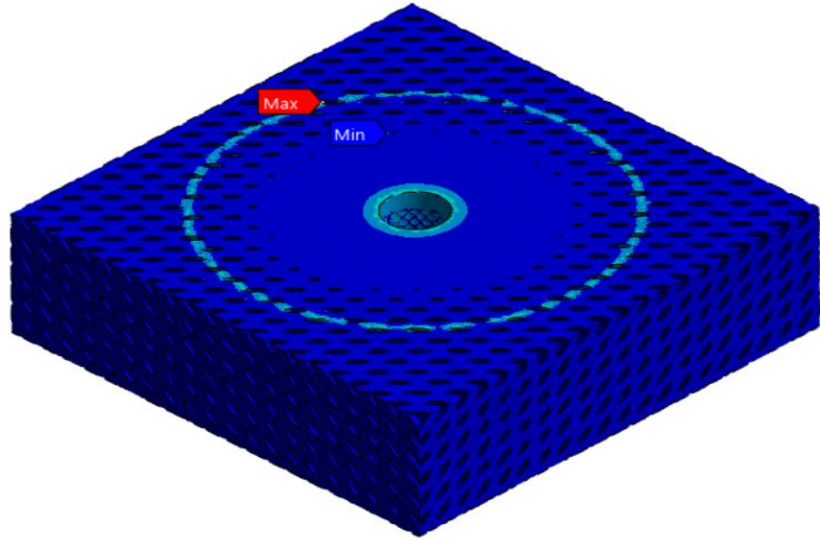
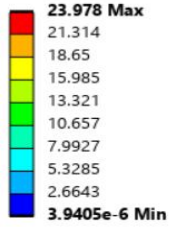
D: Static Structural
Total Deformation Test
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1 s
6/16/2026 8:38:49 AM

0.024732 Max
0.021984
0.019236
0.016488
0.01374
0.010993
0.0082446
0.0054966
0.0027486
6.5258e-7 Min



Resim 4.3 Genleşen İnsert – Diamond – %85 – Deformasyon

D: Static Structural
 Equivalent Stress Test
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress
 Unit: MPa
 Time: 1 s
 6/16/2026 8:39:36 AM

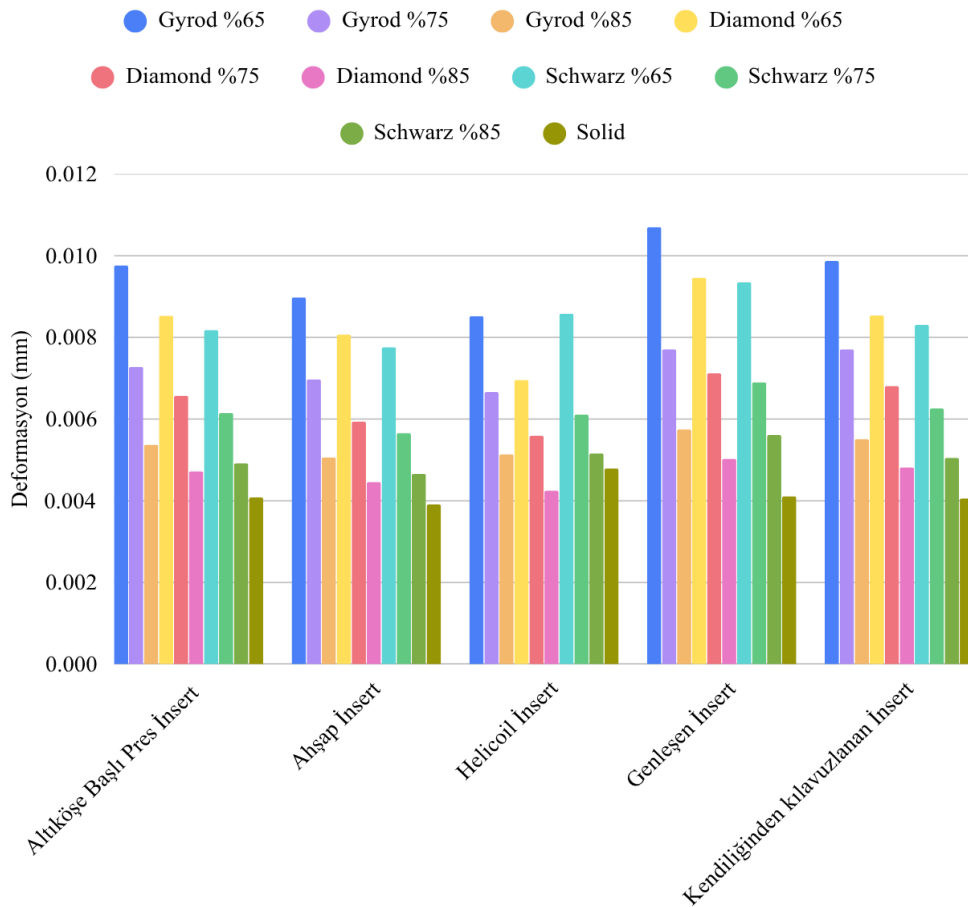


Resim 4.4 Genleşen İnsert – Diamond – %85 – Gerilme

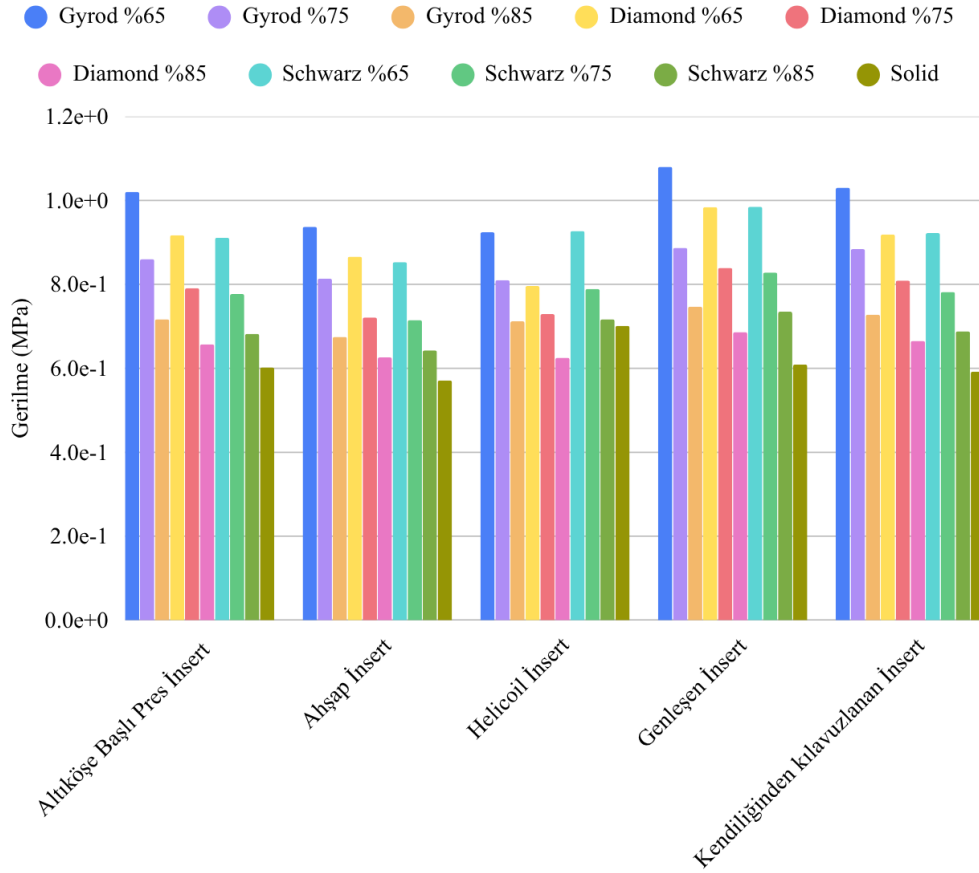
Çizelge 4.9 FD TPMS Yapılarında Mekanik, Pres ve Kendinden Diş Açan İnsertlerin Gerinim Analizi

İnsert Aparatları	Doluluk Yapısı	Gerinim		
		65%	75%	85%
Altıköşe Başlı Pres İnsert	Gyroid	4.45E-04	3.73E-04	3.10E-04
	Diamond	3.99E-04	3.43E-04	2.82E-04
	Schwarz-P	3.93E-04	3.33E-04	2.92E-04
	Solid		2.51E-04	
Ahşap İnsert	Gyroid	4.09E-04	3.53E-04	2.92E-04
	Diamond	3.77E-04	3.12E-04	2.69E-04
	Schwarz-P	3.66E-04	3.05E-04	2.74E-04
	Solid		2.39E-04	
Helicoil İnsert	Gyroid	3.97E-04	3.47E-04	3.05E-04
	Diamond	3.42E-04	3.13E-04	2.67E-04
	Schwarz-P	3.94E-04	3.35E-04	3.04E-04
	Solid		3.14E-04	
Genleşen İnsert	Gyroid	4.67E-04	3.81E-04	3.20E-04
	Diamond	4.26E-04	3.61E-04	2.93E-04
	Schwarz-P	4.20E-04	3.51E-04	3.11E-04
	Solid		2.54E-04	
Kendinden kılavuzlu İnsert	Gyroid	4.48E-04	3.83E-04	3.15E-04
	Diamond	4.00E-04	3.50E-04	2.86E-04
	Schwarz-P	3.95E-04	3.33E-04	2.92E-04
	Solid		2.47E-04	

Kendinden Kılavuzlu İnsert ve Altıköşe Başlı Pres İnsert sistemleri ise orta düzeyde bir performans sergilemiştir. Çevredeki polimer ile mekanik olarak tutunma yetenekleri, Genleşen İnsert sistemlerine kıyasla ankrajı iyileştirmiş ve deformasyonları düşürmüştür. Ancak bu aparatların keskin dış geçişleri ve geometrik süreksizliklerinin yol açtığı gerilme yoğunlaşmaları, Helicoil ve Ahşap İnsert seviyesine ulaşmalarını engellemiştir. İncelenen ikinci grup insert tiplerinin genelinde Diamond TPMS topolojisi, özellikle %85 gibi yüksek doluluk oranlarında tutarlı bir şekilde en düşük deformasyon ve gerilme değerlerini göstererek çekme testi altında daha yüksek rijitlik ve etkin yük aktarımı sağlamıştır. Schwarz-P kafes yapısı, özellikle %65 doluluk oranında bazı insert konfigürasyonlarında (örneğin Ahşap İnsert'te 7.76×10^{-3} mm deformasyon) Diamond yapısına yakın veya daha iyi değerler sergilemiştir. Buna karşılık Gyroid kafes yapısı, sürekli yüzey morfolojisine rağmen lokal mekanik yük aktarımı altında daha yüksek deformasyon ve gerilme birikimi gösterme eğiliminde olmuştur (Şekil 4.5 ve Şekil 4.6).



Şekil 4.5 TPMS Yapılarında Mekanik, Pres ve Kendinden Dış Açan İnsertlerin Deformasyon Analizi



Şekil 4.6 FD TPMS Yapılarında Mekanik, Pres ve Kendinden Dış Açan İnsertlerin Eşdeğer Gerilme Analizi

4.4.3. FD TPMS Yapılarında Gömülü/İç Bağlantı Elemanı Sistemlerinin Karşılaştırmalı Performansı (Üçüncü Grup)

İnsert aparatlarının aksine, gömülü/iç bağlantı elemanı konfigürasyonları; yani Ağaç Somun, kare somun ve Altıköşe Başlı somun çekme testi sırasında farklı bir yük aktarım mekanizması sergilemiştir. Bu sistemlerde bağlantı elemanı numune gövdesi içine gömülmüş olup, uygulanan çekme yükü, vidayı çevredeki TPMS yapısından ayıran bir ara polimer duvarı aracılığıyla dolaylı olarak iletilmiştir. Sonuç olarak, deformasyon ve gerilme tepkileri yalnızca insert geometrisinden değil, aynı zamanda çevredeki polimer malzemenin sınırlama etkisinden de etkilenmiştir. Bu temelde farklı mekanik etkileşim nedeniyle, bu gömülü sistemler geleneksel olarak yerleştirilmiş bağlantı elemanlarından ayrı olarak değerlendirilmiştir.

Çizelge 4.10 FD TPMS Kafes Yapılarında Gömülü/İç Bağlantı Elemanı Sistemlerinin Deformasyonunun Karşılaştırmalı Performansı

Somun Türleri	Doluluk Yapısı	Deformasyon (mm)		
		65%	75%	85%
Altıköşe Başlı Somun	Gyroid	9.90E-03	7.71E-03	5.52E-03
	Diamond	8.60E-03	6.74E-03	4.92E-03
	Schwarz-P	8.54E-03	6.31E-03	5.16E-03
	Solid		4.33E-03	
Kare Somun	Gyroid	9.46E-03	7.29E-03	5.33E-03
	Diamond	8.59E-03	6.31E-03	4.71E-03
	Schwarz-P	8.20E-03	5.84E-03	4.76E-03
	Solid		3.91E-03	
Ağaç Somun	Gyroid	7.76E-03	6.07E-03	4.47E-03
	Diamond	7.17E-03	4.90E-03	3.81E-03
	Schwarz-P	6.13E-03	4.85E-03	4.12E-03
	Solid		3.76E-03	

Çizelge 4.11 FD TPMS Kafes Yapılarında Gömülü/İç Bağlantı Elemanı Sistemlerinin Gerilmesinin Karşılaştırmalı Performansı

Somun Türleri	Doluluk Yapısı	Gerilme (MPa)		
		65%	75%	85%
Altıköşe Başlı Somun	Gyroid	1.06E+00	9.28E-01	7.62E-01
	Diamond	9.46E-01	8.28E-01	7.02E-01
	Schwarz-P	9.67E-01	8.20E-01	7.35E-01
	Solid		6.71E-01	
Kare Somun	Gyroid	9.78E-01	8.46E-01	7.08E-01
	Diamond	9.04E-01	7.55E-01	6.50E-01
	Schwarz-P	8.90E-01	7.39E-01	6.56E-01
	Solid		5.69E-01	
Ağaç Somun	Gyroid	8.65E-01	7.66E-01	6.44E-01
	Diamond	8.35E-01	6.60E-01	5.94E-01
	Schwarz-P	7.68E-01	6.74E-01	6.21E-01
	Solid		5.95E-01	

Tüm gömülü bağlantı elemanı konfigürasyonlarında, doluluk oranının %65'ten %85'e çıkarılması deformasyon, eşdeğer gerilme ve gerinim değerlerini tutarlı bir şekilde azaltmış; bu da FD TPMS kafes yapılarında yerel yapısal takviyenin faydalı rolünü göstermiştir. Doluluk oranı arttıkça, çevredeki malzeme daha fazla rijitlik sağlamış ve gömülü bağlantı bölgesi etrafında lokal deformasyona karşı direnci artırmıştır. Bununla birlikte, mekanik olarak iyileşmenin büyüklüğü hem TPMS kafes yapısına hem de gömülü bağlantı elemanı tasarımına bağlı olarak değişiklik göstermiştir.

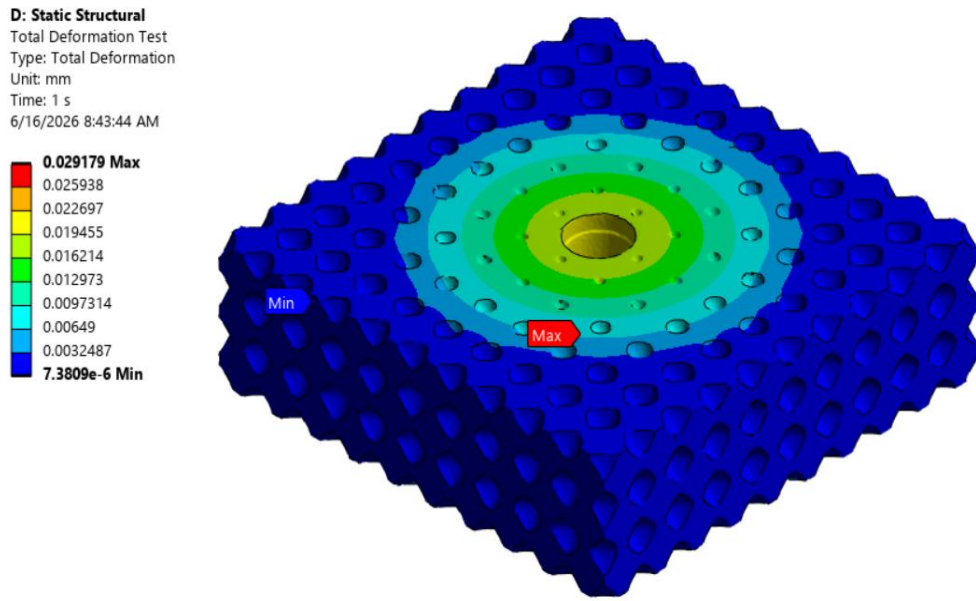
Çizelge 4.12 FD TPMS Yapılarında Gömülü/İç Bağlantı Elemanı Sistemlerinin Geriniminin Karşılaştırmalı Performansı

Somun Türleri	Doluluk Yapısı	Gerinim		
		65%	75%	85%
Altıköşe Başlı Somun	Gyroid	4.63E-04	4.02E-04	3.29E-04
	Diamond	4.11E-04	3.58E-04	3.02E-04
	Schwarz-P	4.15E-04	3.52E-04	3.15E-04
	Solid		2.81E-04	
Kare Somun	Gyroid	4.27E-04	3.68E-04	3.06E-04
	Diamond	3.93E-04	3.26E-04	2.79E-04
	Schwarz-P	3.83E-04	3.16E-04	2.80E-04
	Solid		2.38E-04	
Ağaç Somun	Gyroid	3.76E-04	3.32E-04	2.78E-04
	Diamond	3.63E-04	2.85E-04	2.55E-04
	Schwarz-P	3.29E-04	2.87E-04	2.64E-04
	Solid		2.49E-04	

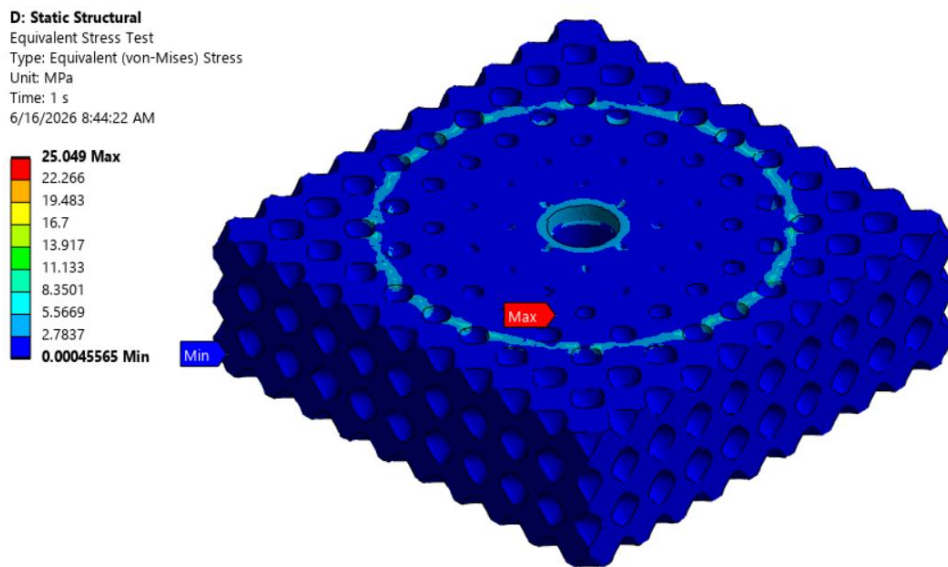
Gömülü/iç bağlantı elemanı sistemleri arasında, Ağaç Somun en iyi genel mekanik davranışı sergilemiştir. Hemen hemen tüm TPMS kafes yapıları ve doluluk oranı seviyelerinde, Ağaç Somun konfigürasyonları kare somun ve Altıköşe Başlı somuna kıyasla en düşük deformasyon ve gerilme değerlerini göstermiştir (Resim 4.5 ve Resim 4.6). Örneğin, Diamond kafes yapısında deformasyon %65 doluluk oranında $7,17 \times 10^{-3}$ mm'den %85 doluluk oranında $3,81 \times 10^{-3}$ mm'ye düşerken, eşdeğer gerilme 0,835 MPa'dan 0,594 MPa'ya azalmıştır. Benzer şekilde, Schwarz-P özellikle güçlü bir performans sergileyerek tüm gömülü sistemler arasında en düşük deformasyon değerlerine ulaşmış ve %85 doluluk oranında $4,12 \times 10^{-3}$ mm'ye düşmüştür. Bu davranış, Ağaç Somun geometrisinin çevredeki polimerle daha güçlü mekanik kenetlenmeyi teşvik etmesine ve çekme kuvvetlerini gömülü malzeme aracılığıyla daha verimli bir şekilde dağıtmasına atfedilebilir. Çevredeki polimer duvarın sağladığı sınırlama muhtemelen lokalize gerilme yoğunlaşmalarını azaltmış ve çekme yüklemesi altında yapısal deformasyonu geciktirmiştir.

Kare somun orta düzeyde mekanik performans sergilemiştir (Resim 4.7 ve Resim 4.8). Gömülü bağlantı elemanları, çevresindeki polimer bölge aracılığıyla etkili yük dağılımına izin vermesine rağmen, deformasyon ve gerilme değerleri Ağaç Somun sistemlerinde gözlemlenenlerden tutarlı bir şekilde daha yüksek olmuştur. Örneğin, %85 doluluk oranında Diamond kafes yapısı içinde deformasyon $4,71 \times 10^{-3}$ mm'ye ve eşdeğer gerilme

0,650 MPa'ya ulaşmış olup, her ikisi de karşılık gelen Ağaç Somun konfigürasyonundan biraz daha yüksektir. Somunun kare geometrisi, köşeleri yakınında lokalize gerilme birikimine katkıda bulunarak bitişik TPMS kafes yapısı içinde artan gerilme yoğunlaşmasına yol açabilir. Bununla birlikte, polimer duvarın sınırlama etkisi yine de bazı durumlarda tamamen açıkta kalan doğrudan dişli sistemlerden daha iyi performans sağlamıştır.



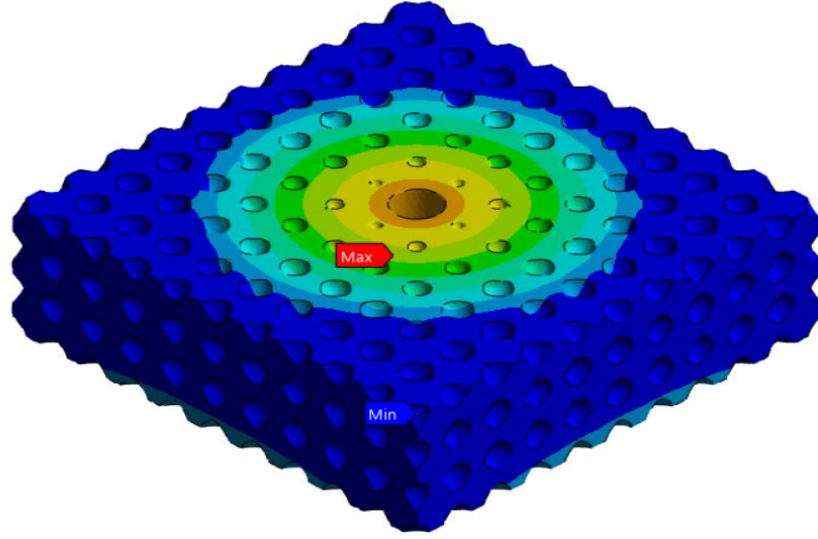
Resim 4.5 Ağaç Somun, Schwarz-P, %85, Toplam Deformasyon



Resim 4.6 Ağaç Somun, Schwarz-P, %85, Eşdeğer von Mises Gerilmesi

D: Static Structural
Total Deformation Test
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1 s
6/16/2026 8:52:01 AM

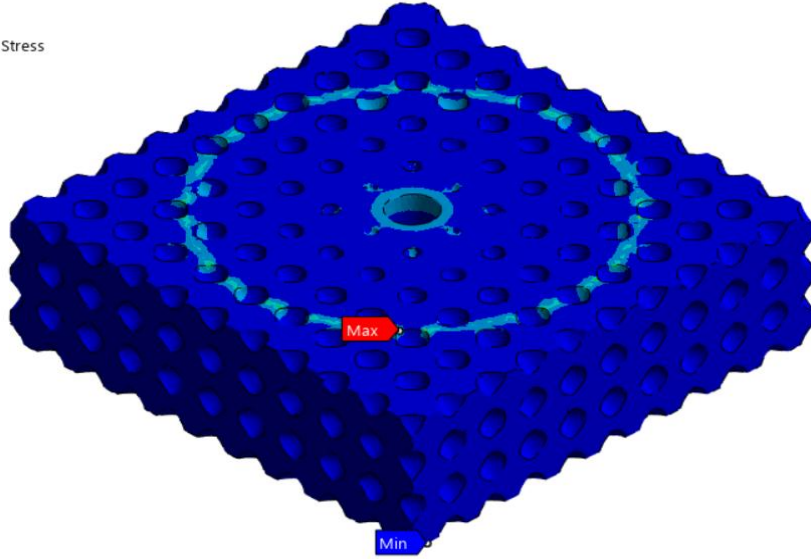
0.023346 Max
0.020753
0.01816
0.015567
0.012974
0.01038
0.0077872
0.0051941
0.0026009
7.7688e-6 Min



Resim 4.7 Kare Somun, Schwarz-P, %85, Toplam Deformasyon

D: Static Structural
Equivalent Stress Test
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1 s
6/16/2026 8:52:38 AM

21.936 Max
19.499
17.062
14.624
12.187
9.7498
7.3125
4.8752
2.4379
0.00065891 Min

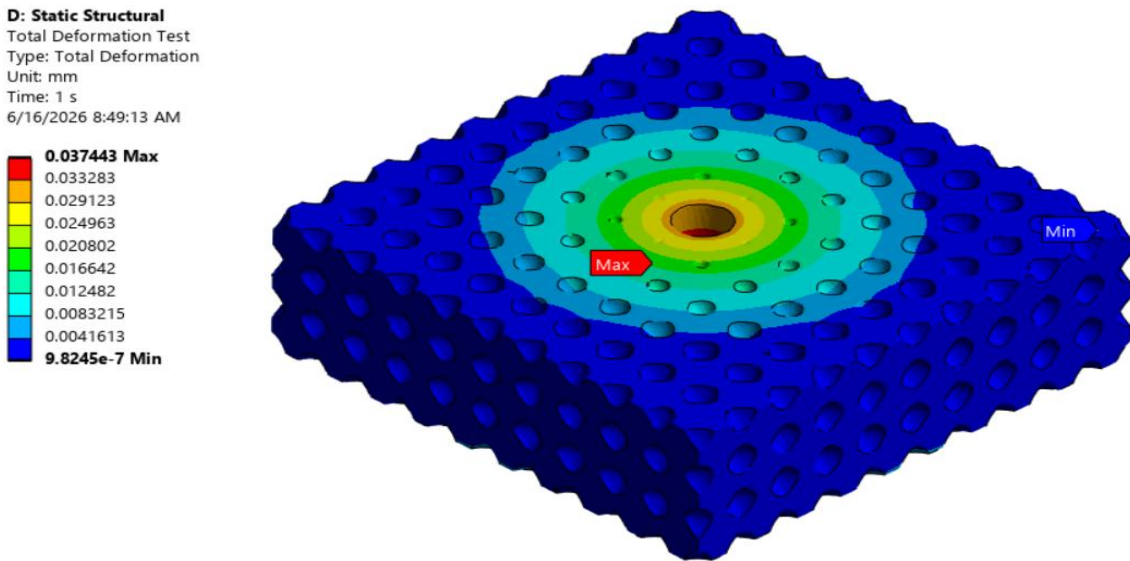


Resim 4.8 Kare Somun, Schwarz-P, %85, Eşdeğer von Mises Gerilmesi

Altıköşe Başlı somun, gömülü/iç bağlantı elemanı sistemleri arasında en zayıf performansı göstermiştir (Resim 4.9 ve Resim 4.10). Tüm topolojiler ve doluluk oranı seviyelerinde, Altıköşe Başlı somun genellikle en yüksek deformasyon ve eşdeğer gerilme değerlerini üretmiştir. Örneğin, %65 doluluk oranında Gyroid kafes yapısında deformasyon $9,90 \times 10^{-3}$ mm'ye ulaşmış ve buna 1,06 MPa'lık maksimum eşdeğer gerilme eşlik etmiş olup, bu gömülü bağlantı elemanı grubundaki en yüksek gerilme

değerlerinden birini temsil etmektedir. %85 doluluk oranında bile deformasyon ve gerilme, Ağaç Somun ve kare somun sistemlerine kıyasla nispeten yüksek kalmıştır. Bu nispeten daha zayıf davranış, civata ara yüzeyi etrafında daha az etkili gerilme yeniden dağıtımına ve gömülü bölge yakınında artan lokal gerilme yoğunlaşmasına atfedilebilir. Altıköşe Başlı somun öncelikle sıkıştırılmalı kenetleme ve çevredeki polimer sınırlaması yoluyla yük aktarımına dayandığından, lokalize malzeme deformasyonu çekme testi koşulları altında daha belirgin hale gelmektedir.

TPMS kafes yapısı açısından, Diamond daha yüksek doluluk oranlarında, özellikle çoğu gömülü bağlantı elemanı konfigürasyonunda en düşük deformasyon ve gerilme değerlerine ulaştığı %85'te tutarlı bir şekilde üstün mekanik performans sergilemiştir. Bu, Diamond kafes yapısının birbirine bağlı düğüm mimarisinin çekme testi altında artırılmış rijitlik ve daha verimli kuvvet iletimi sağladığını göstermektedir. Daha düşük yoğunluklarda, Schwarz-P genellikle rekabetçi performans göstermiş ve özellikle deformasyon direnci açısından, nispeten izotropik levha tabanlı geometrisi sayesinde zaman zaman Diamond kafes yapısından daha iyi performans sergilemiştir. Tersine, Gyroid kafes yapıları genellikle daha yüksek deformasyon tepkileri sergilemiştir; bunun nedeni muhtemelen daha pürüzsüz sürekli morfolojileri ve lokalize çekme kuvvetlerine karşı daha düşük dirençleridir.



Resim 4.9 Altıköşe Başlı Somun, Schwarz-P, %85, Toplam Deformasyon

D: Static Structural

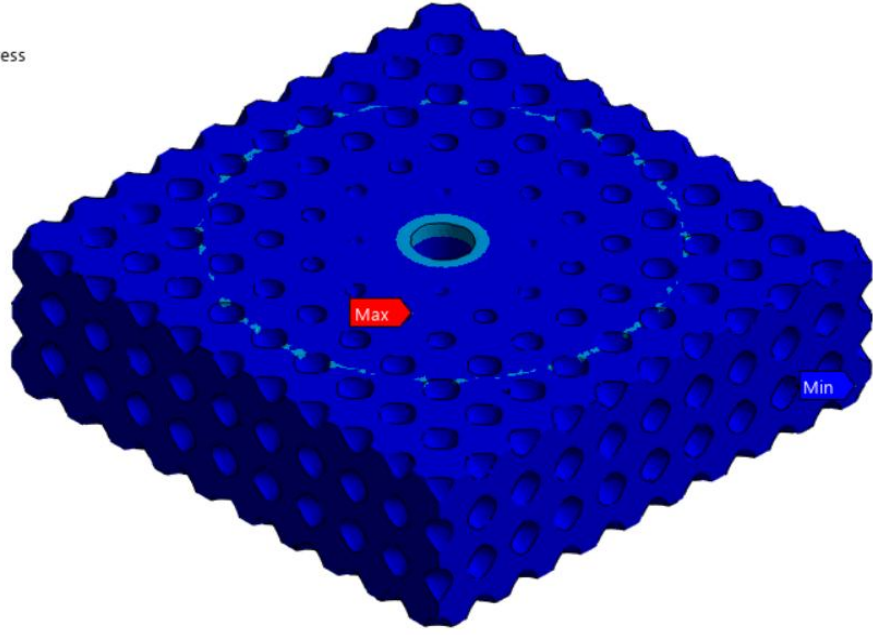
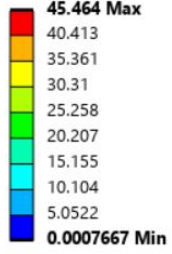
Equivalent Stress Test

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

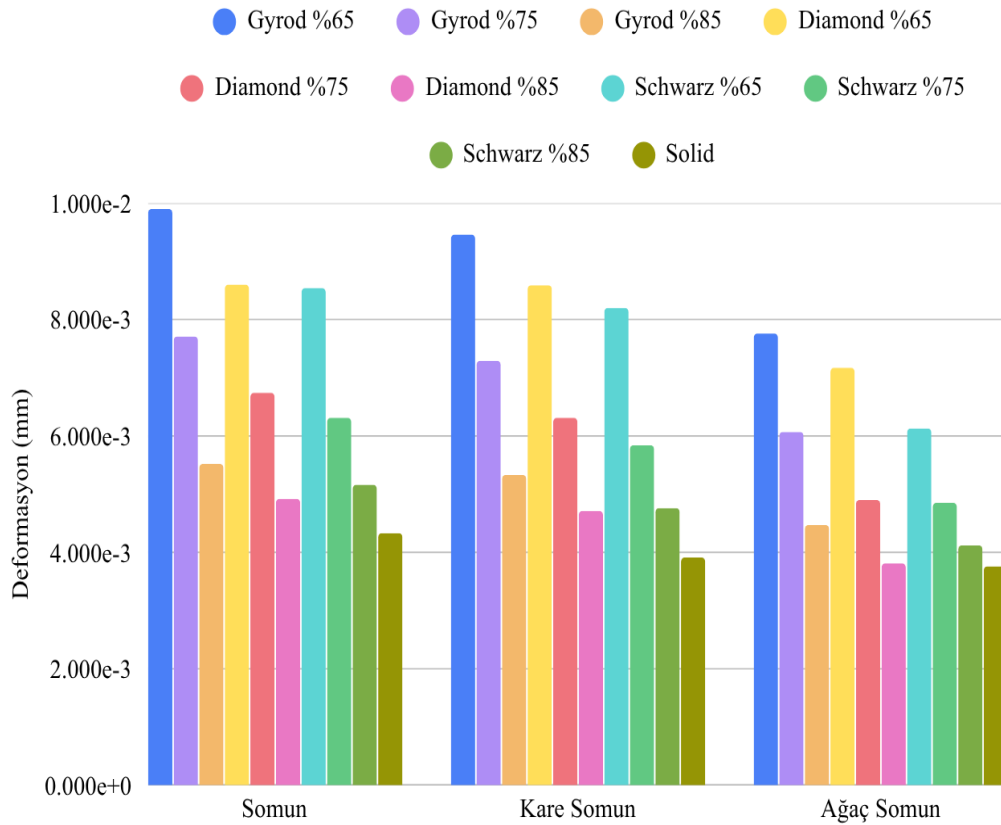
Unit: MPa

Time: 1 s

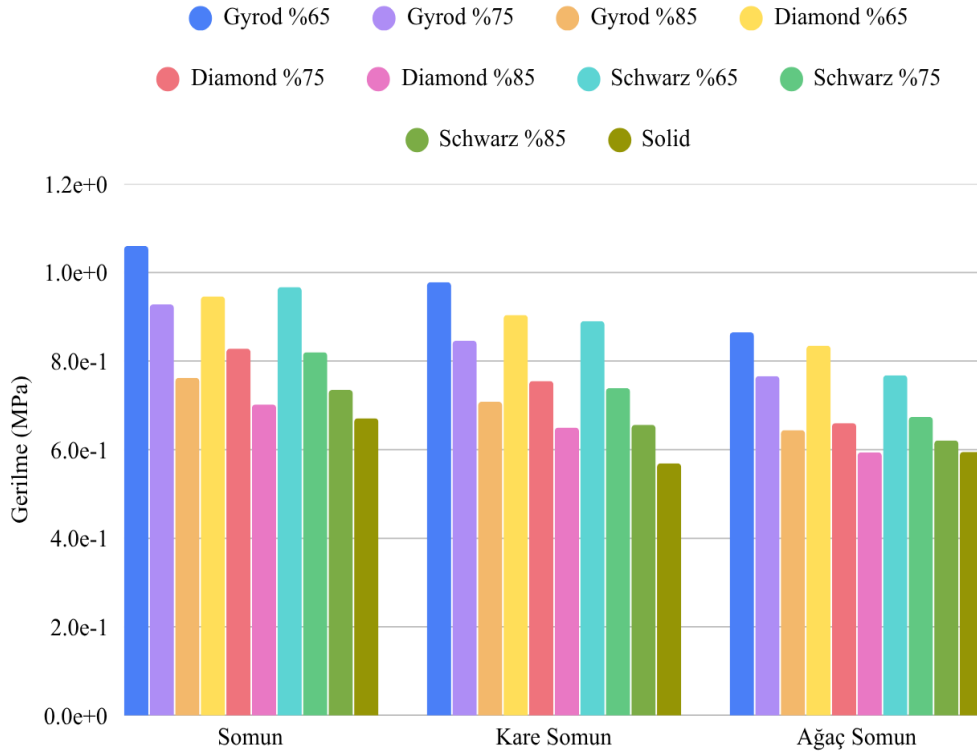
6/16/2026 8:49:42 AM



Resim 4.10 Altıköşe Başlı Somun, Schwarz-P, %85, Eşdeğer von Mises Gerilmesi



Şekil 4.7 FD TPMS Kafes Yapılarında Gömülü/İç Bağlantı Elemanı Sistemlerinin Deformasyonunun Karşılaştırmalı Performansı



Şekil 4.8 FD TPMS Yapılarında Gömülü/İç Bağlantı Elemanı Sistemlerinin Gerilmesinin Karşılaştırmalı Performansı

4.5.Özel Durum Çalışması: Kenetlenmeli Eklemeli İmalat İnsert Sisteminin Karşılaştırmalı Performansı

Özel durum çalışması kapsamında değerlendirilen kenetlenmeli eklemeli imalat insert sistemi, doğrudan etkileşimli standart insert konfigürasyonları ile karşılaştırıldığında rekabetçi bir mekanik performans sergilemiştir. Özellikle yüksek doluluk oranlarında (%85), tasarlanan insert sistemi birçok standart insert tipine kıyasla daha düşük deformasyon ve gerilme değerleri göstermiştir (Çizelge 4.10, Çizelge 4.11, Çizelge 4.12, Resim 4.11 ve Resim 4.12).

Diamond topolojisinde %85 doluluk oranında deformasyon değeri $3,98 \times 10^{-3}$ mm ve eşdeğer gerilme değeri 0.571 MPa olarak belirlenmiş olup, bu değerler Düz İnsert (4.07×10^{-3} mm, 0.600 MPa), Helicoil İnsert (4.25×10^{-3} mm, 0.625 MPa) ve Ahşap İnsert (4.46×10^{-3} mm, 0.626 MPa) konfigürasyonlarından daha düşük bulunmuştur (Şekil 4.9, Şekil 4.10).

Çizelge 4.13 TPMS Kafes Yapıları ve Katı Modelin (%100) Deformasyon Sonuçları

Tasarım	Doluluk Yapısı	Deformasyon (mm)		
		65%	75%	85%
Özel İnsert Dübel	Gyroid	8.20E-03	5.91E-03	4.19E-03
	Diamond	6.92E-03	5.35E-03	3.98E-03
	Schwarz-P	7.44E-03	5.59E-03	4.59E-03
	Solid		3.43E-03	

Çizelge 4.14 TPMS Kafes Yapıları ve Katı Modelin (%100) Eşdeğer von Mises Gerilme Sonuçları

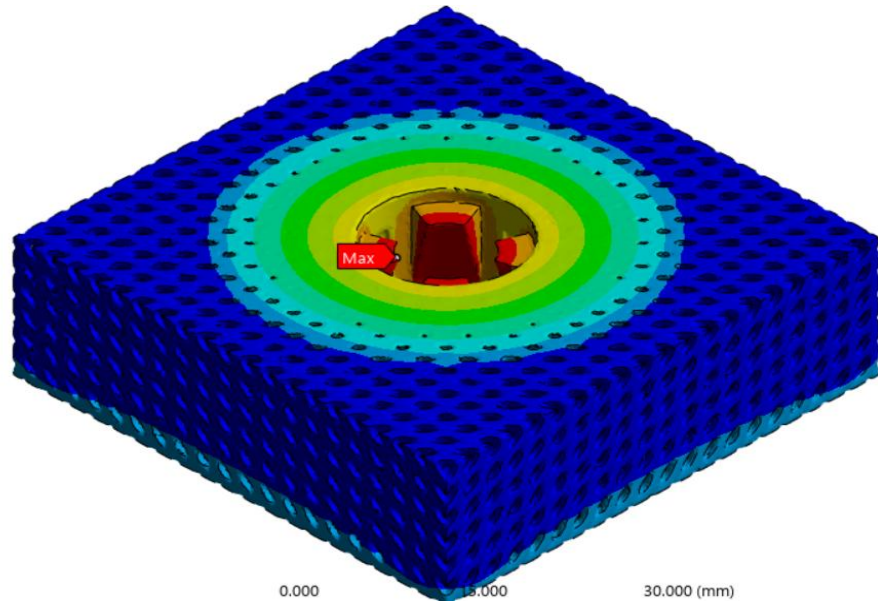
Tasarım	Doluluk Yapısı	Gerilme (MPa)		
		65%	75%	85%
Özel İnsert Dübel	Gyroid	8.53E-01	7.10E-01	5.83E-01
	Diamond	7.54E-01	6.65E-01	5.71E-01
	Schwarz-P	8.00E-01	6.85E-01	6.15E-01
	Solid		5.25E-01	

Çizelge 4.15 TPMS Kafes Yapıları ve Katı Modelin (%100) Gerinim Sonuçları

Tasarım	Doluluk Yapısı	Gerinim		
		65%	75%	85%
Özel İnsert Dübel	Gyroid	3.69E-04	3.06E-04	2.52E-04
	Diamond	3.27E-04	2.87E-04	2.44E-04
	Schwarz-P	3.40E-04	2.90E-04	2.59E-04
	Solid		2.19E-04	

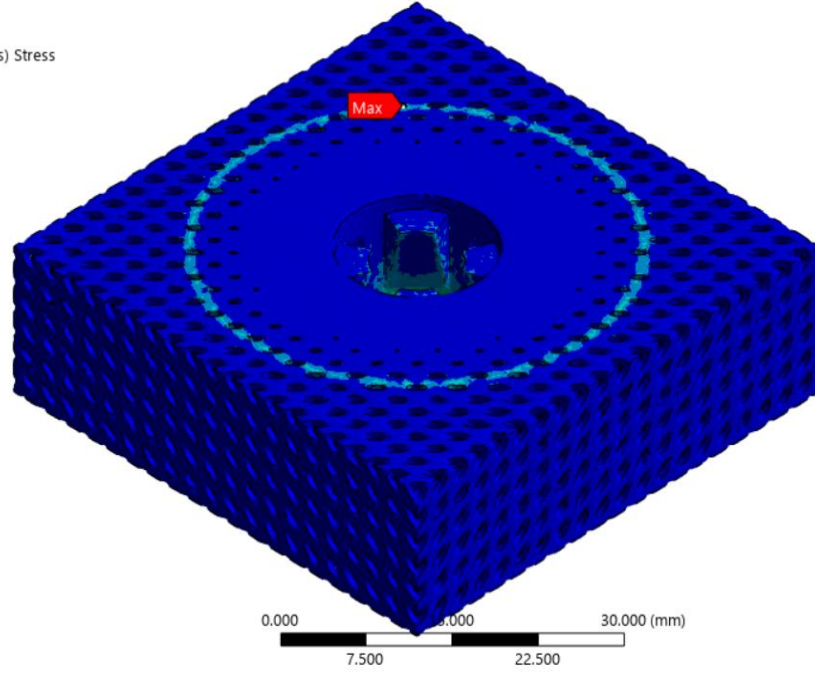
D: Static Structural
Total Deformation Test
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1 s
6/16/2026 3:42:38 PM

0.018246 Max
0.016219
0.014192
0.012165
0.010138
0.008111
0.0060839
0.0040568
0.0020298
2.6911e-6 Min

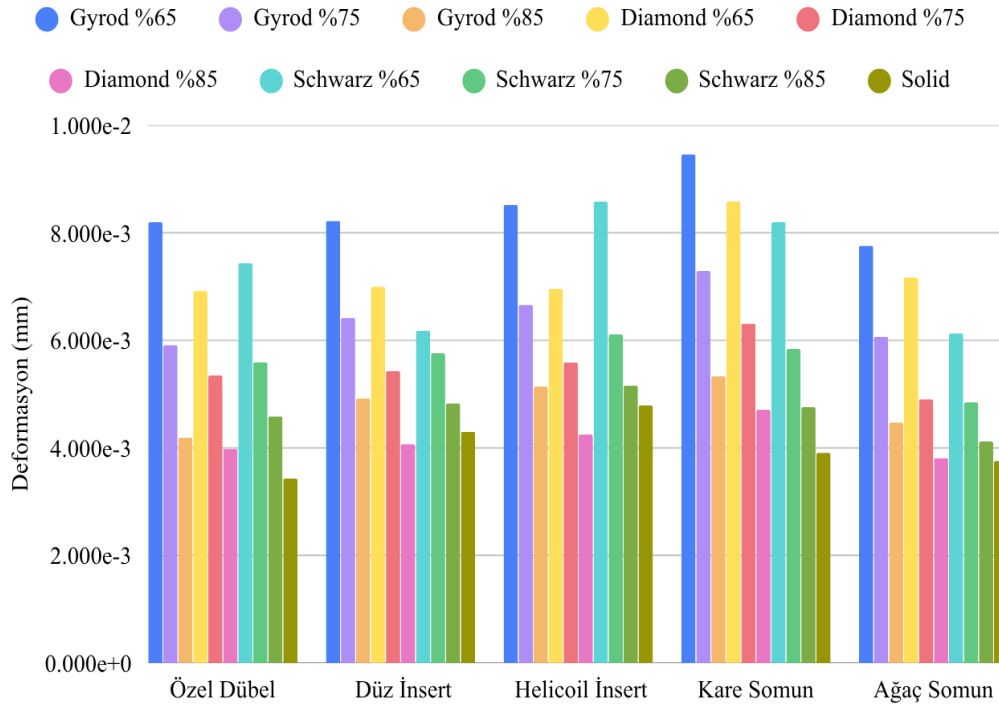
**Resim 4.11** Özel İnsert Dübel, Diamond, %85, Toplam Deformasyon

D: Static Structural
 Equivalent Stress Test
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress
 Unit: MPa
 Time: 1 s
 6/16/2026 3:43:10 PM

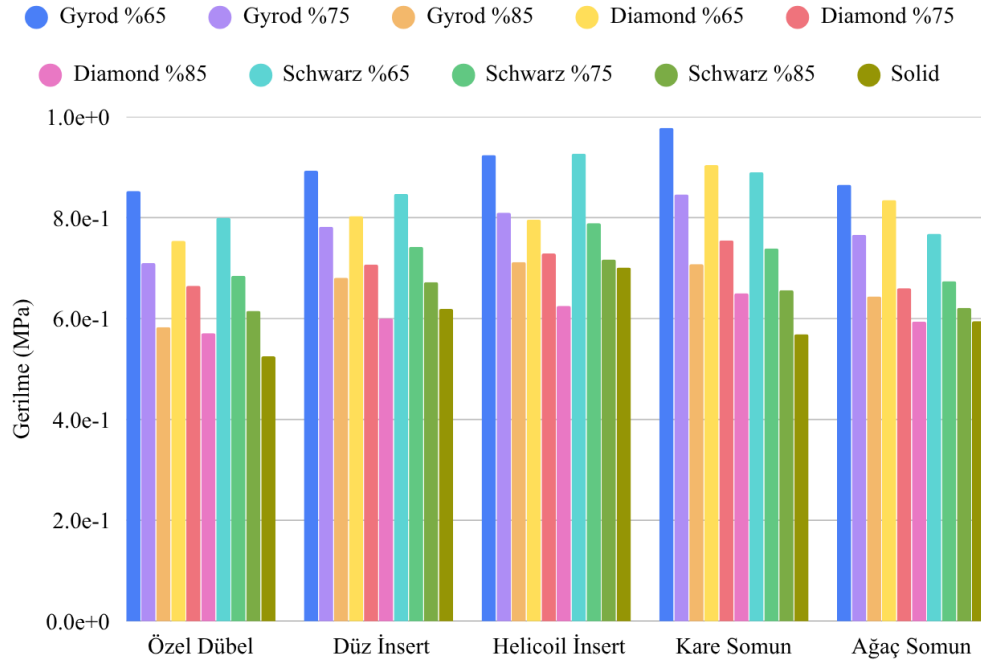
22.867 Max
 20.326
 17.785
 15.244
 12.704
 10.163
 7.6223
 5.0815
 2.5408
6.403e-5 Min



Resim 4.12 Özel İnsert Dübel, Diamond, %85, Eşdeğer von Mises Gerilmesi



Şekil 4.9 Tasarlanan Özel İnsert Dübel yapısı ile standart insert ve diğer bağlantı aparatlarının TPMS kafes yapısındaki deformasyon karşılaştırması



Şekil 4.10 Tasarlanan Özel İnsert Dübel yapısı ile standart insert ve diğer bağlantı aparatlarının TPMS kafes yapısındaki eşdeğer von Mises gerilme karşılaştırması

5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, Eİ ile üretilen FD TPMS kafes yapılarında farklı insert tiplerinin ve yüzey tasarımlarının çekme testi performansına etkileri sistematik olarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular literatürdeki mevcut çalışmalarla karşılaştırılarak aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

5.1. FD Kafes Yapısının Mekanik Performansa Katkısı

Çalışmada, FD TPMS kafes yapılarının, düzenli TPMS kafes yapılarına kıyasla aynı doluluk oranında daha düşük deformasyon ve gerilme değerleri sergilediği gösterilmiştir. Özellikle Diamond topolojisinde %85 doluluk oranında deformasyon %14,7 azalmıştır.

Bu bulgu, Schaedler ve Carter (2016) tarafından doğal kemik yapısındaki FD kafes yapısının mekanik verimliliği artırdığı yönündeki teorisiyle uyumludur. Ayrıca, Tao ve Leu'nun (2016) tarafından kafes yapılarında yerel doluluk oranı kontrolünün gerilme dağılımını iyileştirdiğini belirten çalışmasını desteklemektedir.

5.2. TPMS Kafes Yapısının Mekanik Performans Karşılaştırması

Düşük doluluk oranında (%65) Schwarz-P kafes yapısı en düşük deformasyon ve gerilmeyi sağlarken, orta ve yüksek doluluk oranlarında (%75 ve %85) Diamond kafes yapısı daha üstün performans göstermiştir. Gyroid ise tüm doluluk oranlarında nispeten daha yüksek deformasyon sergilemiştir.

Bu sonuçlar, literatürdeki farklı çalışmalarla kısmen örtüşmektedir. Gibson (2003) tarafından belirtildiği gibi, kafes topolojisinin mekanik davranışı doğrudan etkilediği bilinmektedir. Ancak bu çalışma, düşük doluluk oranında Schwarz-P kafes yapısının, artan ve yüksek doluluk oranlarında ise Diamond kafes yapısının çekme testi için daha uygun olduğunu ilk kez sistematik olarak ortaya koymaktadır.

5.3. Isıl/Isıtarak Yerleştirilen İnsert Sistemlerinin Mekanik Performansı (Birinci Grup)

Isı uygulanarak polimer matris içerisine yerleştirilen ve kafes yapısıyla doğrudan etkileşime giren birinci grup insertler (Helisel ve Düz İnsert) arasında en iyi mekanik performans Düz İnsert tarafından sergilenmiştir. %85 doluluk oranında Diamond kafes yapısında Düz İnsert ile deformasyon $4,07 \times 10^{-3}$ mm, eşdeğer gerilme ise 0,600 MPa olarak ölçülmüştür. Helisel İnsert de benzer şekilde yüksek performans göstermiş ancak pürüzsüz dış yüzeye sahip Düz İnsert, erime esnasında daha homojen bir arayüz teması oluşturarak gerilme yığılmalarını önlemede bir adım öne geçmiştir.

5.4. Mekanik, Pres ve Kendinden Dış Açan İnsert Sistemlerinin Mekanik Performansı (İkinci Grup)

Isıl işlem gerektirmeksizin presle, genişerek veya kendi dışını açarak matrise tutunan ikinci grup insertler arasında en güçlü mekanik kenetlenmeyi Helicoil İnsert ve Ahşap İnsert sergilemiştir. Ahşap İnsert'in geniş dış diş geometrisi, %85 dolulukta Diamond yapıda $4,46 \times 10^{-3}$ mm ve Schwarz-P yapıda $4,66 \times 10^{-3}$ mm gibi düşük deformasyon değerleri sağlayarak çekme direncini artırmıştır. Helicoil İnsert ise %85 doluluklu Diamond yapıda $4,25 \times 10^{-3}$ mm deformasyona ulaşmıştır.

Buna karşılık, doğrudan etkileşimli mekanik sistemler arasında en zayıf performans Genleşen İnsert tiplerinde gözlenmiştir. %65 dolulukta Gyroid topolojisinde deformasyon $1,07 \times 10^{-2}$ mm'ye ulaşırken eşdeğer gerilme 1,08 MPa'yı aşmıştır. Kamanın uyguladığı lokal radyal basınç ve yetersiz temas alanı yüksek gerilme birikimlerine yol açmıştır. Altıköşe Başlı Pres ve Kendinden Kılavuzlu İnsertler ise orta düzeyde performans göstermiştir.

Literatürde Kastner vd. (2023) ve Omidvarkarjan vd. (2021a) insert bağlantılarının mekanik performansını incelemiş ancak TPMS gibi gözenekli yapılarda farklı yerleştirme mekanizmalarını (ısıl, pres, genleşen) kapsayan bu kadar geniş bir karşılaştırma yapılmamıştır.

5.5. FD TPMS Yapılarında Gömülü/İç Bağlantı Elemanı Sistemlerinin Mekanik Performanslarının Karşılaştırılması (Üçüncü Grup)

Gömülü sistemler arasında en iyi performansı Ağaç Somun göstermiştir. Diamond kafes yapısında %85 doluluk oranında deformasyon $3,81 \times 10^{-3}$ mm'ye düşmüştür.

Kare Somun ve Altıköşe Başlı Somun yapıları, Ağaç Somun yapısına kıyasla daha yüksek deformasyon ve gerilme değerleri sergilemiştir. Bu fark, Ağaç Somun geometrisinin çevredeki polimerle daha etkin mekanik kenetlenme sağlamasından kaynaklanmaktadır. Bu bulgu, Zheng vd. (2021) tarafından mekanik kilitleme sağlayan arayüz geometrilerinin modifikasyonunun mukavemeti artırdığı yönündeki çalışmasını desteklemektedir.

5.6. Doluluk Oranı Artışının Etkisi ve Optimum Aralığın Belirlenmesi

Doluluk oranının %65'ten %85'e çıkarılması tüm yapılarda deformasyonu ve gerilmeyi azaltmıştır. Ancak mekanik iyileştirme oranı, %75'ten sonra azalmaktadır. En yüksek kütle verimliliği %65 -75 aralığında elde edilmiştir.

Bu durum, malzeme eklemenin getirdiği ağırlık maliyetine karşı mekanik kazancın azaldığı bir “doyum noktası” olduğunu göstermektedir. Uygulamalarda, gereksiz malzeme kullanımını önlemek için optimum yoğunluk aralığının tercih edilmesi önerilir.

6. KAYNAKLAR

- Abdulhameed O, Al-Ahmari A, Ameen W, Mian S H, 2019, Additive manufacturing: Challenges, trends, and applications, *Advances in Mechanical Engineering* 11.
- Acierno D, Patti A, 2023, Fused Deposition Modelling (FDM) of Thermoplastic-Based Filaments: Process and Rheological Properties—An Overview, *Materials* 2023, Vol. 16, Page 7664 16, 7664.
- Ahlers D, Wasserfall F, Hendrich N, Bungener A N, Butt J T, Zhang J, 2021, Automated in situ placing of metal components into 3-D Printed FFF Objects, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 26, 1886–1894.
- Ahmed W, Ahmed S, Alnajjar F, Zanelidin E, 2021, Mechanical performance of three-dimensional printed sandwich composite with a high-flexible core, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications* 235, 1382–1400.
- Benatar A, 2015, Ultrasonic welding of plastics and polymeric composites, *Power Ultrasonics: Applications of High-Intensity Ultrasound* 295–312.
- Bhudolia S K, Gohel G, Leong K F, Islam A, 2020, Advances in Ultrasonic Welding of Thermoplastic Composites: A Review, *Materials* 2020, Vol. 13, Page 1284 13, 1284.
- Bonenberger P R, 2016, Applying the Snap-Fit Development Process, *The First Snap-Fit Handbook* 203–232.
- Campbell F C, 2004, Adhesive Bonding and Integrally Cocured Structure: A Way to Reduce Assembly Costs through Parts Integration, *Manufacturing Processes for Advanced Composites* 241–301.
- Chand R, Sharma V S, Trehan R, Gupta M K, 2022, A physical investigation of dimensional and mechanical characteristics of 3D printed nut and bolt for industrial applications, *Rapid Prototyp. J.* 28, 953–966.
- Chua C K, Leong K F, Lim C S, 2010, Rapid prototyping: Principles and applications, third edition, *Rapid Prototyping: Principles and Applications, Third Edition* 1–512.
- Costa A P, Botelho E C, Costa M L, Narita N E, Tarpani J R, 2012, A review of welding technologies for thermoplastic composites in aerospace applications, *Journal of Aerospace Technology and Management* 4, 255–265.

- Dairabayeva D, Perveen A, Talamona D, 2022, Investigation on the mechanical performance of mono-material vs multi-material interface geometries using fused filament fabrication, *Rapid Prototyp. J.* 29, 40–52.
- Dezaki M L, Mohd Ariffin M K A, 2020, The effects of combined infill patterns on mechanical properties in fdm process, *Polymers (Basel)*. 12, 1–20.
- Fleck N A, Deshpande V S, Ashby M F, 2010, Micro-architected materials: Past, present and future, *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 466, 2495–2516.
- Frascio M, Zafferani A, Monti M, Avalle M, 2024, Investigating enhanced interfacial adhesion in multi-material filament 3D printing: a comparative study of t and Mickey Mouse geometries, *Progress in Additive Manufacturing* 9, 2113–2122.
- Fürst T, Göhlich D, 2024, Innovative high-strength screw connections for additive manufactured thermoplastic components, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2024 135:9 135, 4669–4682.
- Gandy P J F, Bardhan S, Mackay A L, Klinowski J, 2001, Nodal surface approximations to the P,G,D and I-WP triply periodic minimal surfaces, *Chem. Phys. Lett.* 336, 187–195.
- Gibson L J, 2003, Cellular solids, *MRS Bull.* 28, 270–274.
- Graves F E, 1984, Nuts and Bolts on JSTOR, *JSTOR* 250, 136–145.
- Kajzer W, Gieracka K, Pawlik M, Basiaga M, Kajzer A, Szewczenko J, 2019, Tests of threaded connections made by additive manufacturing technologies, *Advances in Intelligent Systems and Computing* 925, 329–337.
- Karayil Thekkoot R P, Mesnil R, Caron J-F, Baverel O, 2020, Assembly aware design and construction of interlocking masonry structures.
- Kastner T, Troschitz J, Vogel C, Behnisch T, Gude M, Modler N, 2023, Investigation of the Pull-Out Behaviour of Metal Threaded Inserts in Thermoplastic Fused-Layer Modelling (FLM) Components, *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 2023, Vol. 7, Page 42 7, 42.
- Kim G, Lee H, Pammi R, Kulkarni S, Denos B, Jung A, 2026, Comparative Performance of Threaded Inserts in Fiber-Reinforced Composite Laminates under Static and Fatigue Pull-Out Loading, *Applied Composite Materials* 2026 33:3 33, 88-.

- Klahn C, Singer D, Meboldt M, 2016, Design Guidelines for Additive Manufactured Snap-Fit Joints, *Procedia CIRP* 50, 264–269.
- Kumar S, Wardle B L, Arif M F, 2017, Strength and performance enhancement of bonded joints by spatial tailoring of adhesive compliance via 3D printing, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 9, 884–891.
- Lee M G, Kim H J, 2023, Development of 3D printed snap-fit connection for a magnetic anal sphincter, *Journal of Innovative Medical Technology* 1, 38–43.
- Lohuis D, Traub H, Hühne C, 2024, Mechanical testing of threaded inserts for additively manufactured sandwich panels with Gyroid core structures, *Results in Materials* 21, 100543.
- Malik I A, Mirkhalaf M, Barthelat F, 2017, Bio-inspired “jigsaw”-like interlocking sutures: Modeling, optimization, 3D printing and testing, *J. Mech. Phys. Solids* 102, 224–238.
- Malviya M, Sinha S, Berdanier C, Meisel N A, 2020, Digital Design Automation to Support in Situ Embedding of Functional Objects in Additive Manufacturing, *Journal of Mechanical Design* 142.
- Nicolau A, Baba M N, Cerbu C, Cioacă C, Brenci L M, Cosoreanu C, 2025, Evaluation of 3D-Printed Connectors in Chair Construction: A Comparative Study with Traditional Mortise-and-Tenon Joints, *Materials* 2025, Vol. 18, Page 201 18, 201.
- Omidvarkarjan D, Balicki P, Baumgartner H, Rosenbauer R, Fontana F, Meboldt M, 2021, The AM Dowel – A Novel Insert for the Integration of Threads into Additive Manufactured Polymer Components, *Industrializing Additive Manufacturing* 391–398.
- Paska Z, Rojicek J, Fojtik F, Kryš V, Fusek M, Lickova D, 2021, Load capacity of HELICOIL® inserts in ABS-M30 material used for additive manufacturing, *MM Science Journal* 2021-December, 5414–5420.
- Ramírez E A, Caicedo F, Hurel J, Helguero C G, Amaya J L, 2019, Methodology for design process of a snap-fit joint made by additive manufacturing, *Procedia CIRP* 79, 113–118.
- Rehman M, Yanen W, Mushtaq R T, Ishfaq K, Zahoor S, Ahmed A, Kumar M S, Gueyee T, Rahman M M, Sultana J, 2023, Additive manufacturing for

- biomedical applications: a review on classification, energy consumption, and its appreciable role since COVID-19 pandemic, *Progress in Additive Manufacturing* 8, 1007–1041.
- Sapkota A, Ghimire S K, Adanur S, 2024, A review on fused deposition modeling (FDM)-based additive manufacturing (AM) methods, materials and applications for flexible fabric structures, *Journal of Industrial Textiles* 54.
- Schaedler T A, Carter W B, 2016, Architected Cellular Materials, *Annu. Rev. Mater. Res.* 46, 187–210.
- Schoen A H, 1970, Infinite periodic minimal surfaces without self-intersections. National Aeronautics and Space Administration, Washington, D.C.
- Schwarz H A, 1972, *Gesammelte mathematische abhandlungen*. American Mathematical Soc.
- Severson P, Lutz A, Elhajjar R, 2024, Pull-Through Behavior of Novel Additively Manufactured Sandwich Composite Inserts, *Materials* 17, 1884.
- Skorupińska E, Wiaderek K, Sydor M, 2022, Withdrawal Resistance of T-Nuts in Various Furniture Materials, *Drvna industrija* 73, 271–277.
- Song P, 2022, Interlocking assemblies: Applications and methods, *Mater. Today Proc.* 70, 78–82.
- Song P, Fu Z, Liu L, Fu C W, 2015, Printing 3D objects with interlocking parts, *Comput. Aided Geom. Des.* 35–36, 137–148.
- Spaggiari A, Denti F, 2021, Mechanical strength of adhesively bonded joints using polymeric additive manufacturing, *Proc. Inst. Mech. Eng. C J. Mech. Eng. Sci.* 235, 1851–1859.
- Takasu N, 2003, Friction welding of plastics, *Welding International* 17, 856–859.
- Tao W, Leu M C, 2016, Design of lattice structure for additive manufacturing, *International Symposium on Flexible Automation, ISFA 2016* 325–332.
- Tiwary V K, P A, Malik V R, 2021, An overview on joining/welding as post-processing technique to circumvent the build volume limitation of an FDM-3D printer, *Rapid Prototyp. J.* 27, 808–821.
- Troughton M John, 2008, *Handbook of plastics joining : a practical guide*. William Andrew ; TWI/The Welding Institute.
- Ufodike C O, Ahmed M F, Dolzyk G, 2021, Additively manufactured biomorphic

cellular structures inspired by wood microstructure, J. Mech. Behav. Biomed. Mater. 123, 104729.

Wohlgemuth M, Yufa N, Hoffman J, Thomas E L, 2001, Triply periodic bicontinuous cubic microdomain morphologies by symmetries, Macromolecules 34, 6083–6089.

Zheng Y, Zhang W, Lopez D M B, Ahmad R, 2021, Scientometric Analysis and Systematic Review of Multi-Material Additive Manufacturing of Polymers, Polymers 2021, Vol. 13, Page 1957 13, 1957.

İnternet Kaynakları

1- https://mitsloan.mit.edu/ideas-made-to-matter/additive-manufacturing-explained?utm_source, 07.03.2025

2- <https://xometry.pro/en-tr/articles/threaded-inserts-for-plastics/>, 05.10.2025

3- <https://all3dp.com/1/how-to-thread-your-3d-printed-parts/> , 12.01.2026

4- <https://www.mlc-cad.com/3d-printing-help-center/how-to-pause-printing-to-embed-hardware/>, 12.01.2026

5- <https://support.ntop.com/hc/en-us/articles/360053267814-What-equations-are-used-to-create-the-TPMS-types>, 15.12.2025

6- <https://www.mcmaster.com/products/threaded-inserts/threaded-insert-type~tapping/threaded-inserts-3~/threaded-insert-type~heat-set/threaded-inserts-3~threaded-insert-type~heat-set/>, 20.04.2026

7- <https://www.pemnet.com/products/engineering-guides/four-ways-to-tackle-threaded-inserts-for-plastics/>, 20.04.2026

8- <https://markets.financialcontent.com/wral/article/abnewswire-2025-9-1-what-are-self-tapping-threaded-inserts-types-installation-and-applications>, 20.04.2026

9- <https://www.mcmaster.com/products/self-tapping-inserts/threaded-insert-type~tapping/twist-resistant-press-in-threaded-inserts-for-plastic~/>, 20.04.2026

10-<https://www.accu.co.uk/p/366-how-to-install-self-tapping-inserts>, 20.04.2026

11- <https://www.mcmaster.com/products/expansion-inserts/>, 20.04.2

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Shadi Essam Saeed SAIF
Doğum Yeri ve Tarihi : 06.01.1998 Yemen/Hodaidah
Yabancı Dili : Arapca
İletişim (Telefon / e-posta) : +905525354485/ saif.shadi5@gmail.com

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Abobakr Alsadiq Lisesi (2013 – 2016)
Lisans : Uşak Üniversitesi, Makine Bölümü, (2019– 2023)
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
ABD, (2024 – Devam ediyor)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

:Türkay Mekanik Mühendislik (Stajyer) (08.2023 - 08.2023)
: Baymet Makina San. ve Tic. A.Ş. (07.2021 - 08.2021)

Yayınları (SCI ve diğer) :

Sonlu Elemanlar Analizi ile Isıl Yerleştirmeli Insert İçeren, Eklemeli İmalatla Üretilmiş
Fonksiyonel Derecelendirilmiş TPMS Kafes Yapılarının Eksenel Çekip Çıkarma
Performansının İncelenmesi (Yazarlar: Shadi Essam Saeed SAIF, Özgür VERİM |
Dergi adı: 16. Uluslararası Mühendislik, Mimarlık Ve Tasarım
Kongresi)

Eklemeli İmalat Alanında Kullanılan 3B Yazıcıların Kavramsal Tasarımı (Yazarlar:
Halil İbrahim BAĞLAN, Ufuk KIZILKAYA, Oktay Gökhan ÇELİK, Ercüment Çağlar
BİLGEHAN, Shadi E. S. SAIF, Özgür VERİM, Mehmet Ali ALKAN | Dergi adı:
3.Uluslararası Karadeniz Bilimsel Araştırmalar ve İnovasyon Kongresi
| Cilt, Sayı ve Sayfalar: Cilt 3, S192-212)