

**KENDİ KENDİNE İYİLEŞEBİLEN SANDVIÇ
YAPILARIN DARBE YÜKLERİ ALTINDA HASAR
DAVRANIŞI VE İYİLEŞME PERFORMANSI**

Hakkı ÖZER



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KENDİ KENDİNE İYİLEŞEBİLEN SANDVIÇ YAPILARIN BALİSTİK HASAR
DAVRANIŞI VE İYİLEŞME PERFORMANSI**

Hakkı ÖZER
ORCID ID: 0000-0003-0951-8490

Prof. Dr. Murat YAZICI
(Danışman)
ORCID ID: 0000-0002-8720-7594

DOKTORA TEZİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2021
Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Hakkı ÖZER tarafından hazırlanan "KENDİ KENDİNE İYİLEŞEBİLEN SANDVIÇ YAPILARIN BALİSTİK HASAR DAVRANIŞI VE İYİLEŞME PERFORMANSI" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Murat YAZICI

Başkan: Prof. Dr. Murat YAZICI
0000-0002-8720-7594
Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik
Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

Üye : Prof. Dr. Bülent EKER
0000-0002-3542-9531
Namık Kemal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi,
Biyosistem Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

Üye : Prof. Dr. Ayşegül Akdoğan EKER
0000-0003-0212-9230
Yıldız Teknik Üniversitesi, Mühendislik
Fakültesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

Üye : Doç.Dr. Zeliha Kaniş KOCABIÇAK
0000-0003-3292-8324
Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik
Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

Üye : Dr.Öğ.Üy.Behiye KORKMAZ
0000-0003-2497-8479
Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik
Fakültesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN

Enstitü Müdürü

..../..../..../

U.Ü. 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.

07/01/2022

Hakkı ÖZER

TEZ YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezin/raporun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kâğıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma izni Bursa Uludağ Üniversitesi'ne aittir. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları ile tezin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları tarafımıza ait olacaktır. Tezde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederiz.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**” kapsamında, yönerge tarafından belirtilen kısıtlamalar olmadığı takdirde tezin YÖK Ulusal Tez Merkezi / B.U.Ü. Kütüphanesi Açık Erişim Sistemi ve üye olunan diğer veri tabanlarının (Proquest veri tabanı gibi) erişimine açılması uygundur.

Danışman Adı-Soyadı

Öğrencinin Adı-Soyadı

Tarih

Tarih

Prof. Dr. Murat Yazıcı

Hakkı Özer

10/01/2022

10/01/2022

İmza

İmza

Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

ÖZET

Doktora

KENDİ KENDİNE İYİLEŞEBİLEN SANDVIÇ YAPILARIN DARBE YÜKLERİ ALTINDA HASAR DAVRANIŞI VE İYİLEŞME PERFORMANSI

Hakkı ÖZER

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Murat YAZICI

Kendi kendini iyileştiren yapılarda meydana gelen mikro ve makro hasarlar iyileştirici sistemler ile onarılabilmektedir. Böylelikle, malzemelerin yapısal bütünlükleri korunabilme ve tekrarlı kullanım olanakları sağlanabilmektedir. Bu çalışmada yapısal hasarların onarılmasını sağlayan makro kapsüller geliştirilmiştir. Yaklaşık 3 mm çapındaki makro kapsüllerin içerisi 3 farklı iyileşme yeteneğine sahip ajanlar ile doldurulmuştur. İlk olarak epoksi reçine ve kürleştirici ajanlar ile doldurularak hasar sonrası kusurlu bölgelerde iyileşme sağlanmıştır. Sonrasında hasarın geometrik olarak iyileşmesi amacıyla hacimce 17 kat köpürme yeteneğine sahip poliüretan ajanlar ve kürleştiriciler kapsüller içerisine ilave edilmiştir. Geliştirilen bu kendi kendine iyileşebilen kapsüller alüminyum bal peteği sandviç yapı içerisine ilave edilmiştir. Son olarak anlık iyileşme vasfına sahip ultra hızlı kendi kendine iyileşen yapı geliştirilmiştir. Siyanokrilat ajanı ilavesiyle geliştirilen kendi kendine iyileşebilen kapsüllerde hasar sonrası toz aktivatör dolgusuyla otonom iyileşme görülmüştür. Farklı niteliklere sahip yapılardaki kendi kendine iyileşmeler farklı yöntemler ile karakterize edilmiştir. Bu karakterizasyonlar arasında statik bası deneyleri, high strain rate impact deneyleri, penetrasyon deneyleri, spresifik hava ve sıvı deneyleri ve termal kamera analizleri yer almaktadır. Ayrıca dijital mikroskop, optik mikroskop ve SEM görüntüleri ile iyileşmeler görsellenmiştir. Böylelikle meydana gelen iyileşmeler birkaç farklı yöntem ile ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Kendi kendine iyileşme, Sandviç yapılar, Kendi kendine geometrik iyileşme, Bal peteği yapılar, Penetrasyon Testi, İmpakt, Epoksi Reçine, Poliüretan, Makroküre

2022, xiii + 222 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

DAMAGE BEHAVIOUR OF SELF HEALABLE SANDWICH STRUCTURES AND HEALING PERFORMANCE

Hakkı ÖZER

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Automotive Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Murat YAZICI

Micro and macro damages in self-healing structures can be repaired with healing systems. Thus, the structural integrity of the materials can be preserved and the possibilities of repeated use can be provided. In this study, macrocapsules were developed to repair structural damage. The macrocapsules, approximately 3 mm in diameter, are filled with agents with three different healing abilities. Firstly, the macrocapsules are filled with epoxy resin and curing agents. Damaged capsules were broken and healing was achieved with dispersed agents. Afterwards, polyurethane agents and curing agents with a foaming ability of 17 times by volume were added into the capsules in order to heal the damage geometrically. The developed self-healing capsules are added into the aluminum honeycomb sandwich structure. Finally, an ultra-fast self-healing structure with the instant-healing property was developed. In self-healing capsules developed with the addition of cyanoacrylate agent, autonomous healing was observed with powder activator filling after damage. Self-healing in structures with different qualities has been characterized by different methods. These characterizations include static compression tests, high strain rate impact tests, penetration tests, specific air, liquid tests, and thermal camera analysis. In addition, improvements were visualized with a digital microscope, optical microscope and SEM images. Thus, self-healing has been demonstrated by several different methods.

Keywords: Self-healing, Self-healing Geometric, Sandwich structures, Honeycomb structures, Penetration Test, Impact, Epoxy Resin, Polyurethane, Macrocapsule

2022, xiii + 222 pages.

TEŞEKKÜR

Evliliđimiz boyunca benden desteđini esirgemeyen ve her turlü zorluđu paylařmada yanımda olan eřime, tez yazım sürecinde dűnyaya gelerek neřemizi artıran ođlumuz, kuvvetlerini arkamda daima hissettiđim anneme ve babama, tez çalıřmam kapsamında űretim ve testleri birlikte yaptığımız proje ekip arkadařlarım Eslem KUZU, Çađatay ÖZADA ve Merve ŪNAL' a, gereksinim duyduđumuz zamanlarda yardımlarını esirgemeyen Uygulamalı Mekanik ve İleri Malzemeler Arařtırma Grubu űyesi hocalarım ve arkadařlarıma, yűksek lisans ve doktora eđitimim sűresince bilgi, birikim ve tecrűbelerini bizlere aktararak her alanda geliřmemizi sađlayan danıřman hocam Prof. Dr. Murat YAZICI' ya teőekkűrlerimi sunarım.

TŪBİTAK-ARDEB 1001 programı destekli 218M468 numaralı ve “Kendi Kendine Makro Seviyede İyileřebilir Őzellikli Yeni Hibrit Sandviç Panel Geliřtirilmesi ve Statik, Anlık Dinamik ve Őok Yűkleri Altında İyileřme Performansının İncelenmesi” bařlıklı proje kapsamında tez konumu oluřturan kompozit sandviç yapı űretimi ve testleri için sađlanan desteklerden dolayı TŪBİTAK-ARDEB'e teőekkűrlerimi sunarım.

Hakkı ÖZER

10/01/2022

İÇİNDEKİLER

Sayfa

| | |
|--|----------------------------------|
| TEZ ONAYI..... | Hata! Yer işareti tanımlanmamış. |
| ÖZET..... | i |
| ABSTRACT..... | ii |
| TEŞEKKÜR..... | iii |
| İÇİNDEKİLER..... | iv |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ..... | vi |
| ŞEKİLLER DİZİNİ..... | ix |
| ÇİZELGELER DİZİNİ..... | xiii |
| 1. GİRİŞ..... | 1 |
| 2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI..... | 4 |
| 2.1. Kendi Kendine İyileşen Malzemeler..... | 4 |
| 2.1.1. Kendi kendine iyileşen polimerler ve elastomerler..... | 5 |
| 2.1.2. İçsel kendi kendine iyileşen malzemeler..... | 6 |
| 2.1.3. Kapsül Bazlı Kendi Kendine İyileşen Malzemeler..... | 14 |
| 2.1.4. Vasküler kendi kendine iyileşen malzemeler..... | 18 |
| 2.1.5. Kendi kendine iyileşen kaplamalar..... | 20 |
| 2.1.6. Kendi kendine iyileşen seramikler ve metaller..... | 21 |
| 2.2. Kompozit Malzemeler..... | 24 |
| 2.2.1. Kompozit malzemelerin temel bileşenleri..... | 26 |
| 2.2.2. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması..... | 28 |
| 2.2.3. Termoplastik kompozit malzemeler..... | 31 |
| 2.2.4. Sürekli elyaf takviyeli kompozit malzemeler..... | 34 |
| 2.3. Kompozit Malzemelerin Fiziksel Özellikleri..... | 36 |
| 2.3.1. Eşgerinim karışım kuralı..... | 36 |
| 2.3.2. Eşgerilme Karışım Kuralı..... | 38 |
| 2.4. Kompozit Malzemelerin Mekanik Özellikleri..... | 42 |
| 2.4.1. Dolgu takviyesi..... | 42 |
| 2.4.2. Sürekli Elyaf Takviyesi..... | 43 |
| 2.5. Sandviç Malzemeler..... | 46 |
| 2.5.1. Sandviç Malzemelerin Sınıflandırılması..... | 47 |
| 2.5.2. Bal peteği çekirdek malzemelerin üretim yöntemleri..... | 51 |
| 2.6. Sandviç Teorisi..... | 54 |
| 2.6.1. Sandviç Eğilme Rijitliği..... | 55 |
| 2.6.2. Sandviç Yapının Burkulması..... | 57 |
| 2.6.3. Sandviç yüzey plakaları ve çekirdekteki gerilmeler..... | 62 |
| 2.6.4. Sandviç Malzemelerde Buruşma..... | 65 |
| 2.6.5. Sandviç malzemelerde kıvrılma..... | 86 |
| 2.7. Deneysel Tasarım Yöntemi..... | 88 |
| 2.7.1. Deneysel tasarımın amacı..... | 89 |
| 2.7.2. Deneysel tasarımının uygulama alanları..... | 90 |
| 2.7.3. Deneysel tasarımının uygulanması süreci..... | 91 |
| 2.8. Kaynak Araştırması..... | 93 |
| 3. MATERYAL VE YÖNTEM..... | 111 |
| 3.1. Epoksi Bazlı Kendi Kendine İyileşebilen Makro Küre Üretimi, Sandviç Yapı Geliştirilmesi ve Karakterizasyon..... | 111 |

| | |
|--|-----|
| 3.1.1. Üretim süreci..... | 111 |
| 3.1.2. Bası deneyleri..... | 117 |
| 3.1.3. Darbe deneyleri | 119 |
| 3.2. Geometrik Olarak Kendi Kendine İyileşebilen Sandviç Yapı Geliştirilmesi ve Karakterizasyon..... | 122 |
| 3.2.1. Köpük oluşum süreci..... | 125 |
| 3.2.2. Bası deneyleri..... | 130 |
| 3.2.3. Penetrasyon deneyleri | 132 |
| 3.3.4. Sıvı geçirgenlik testi (Falling-head permeameter)..... | 136 |
| 3.3.5. Hava geçirgenlik testi..... | 139 |
| 3.3. Ultra hızlı şekilde kendi kendine iyileşebilen kompozit malzemeler | 141 |
| 3.3.1. Ultra hızlı kendi kendine iyileşen malzemelerin üretim süreci..... | 141 |
| 3.3.2. Deneysel tasarım analizi | 153 |
| 3.3.3. Bası deneyleri..... | 155 |
| 3.3.4. Darbe deneyleri | 158 |
| 3.3.5. Tek nokta bindirme testi (SLJ testi)..... | 160 |
| 4. BULGULAR..... | 167 |
| 4.1. Epoksi Bazlı Kendi Kendine İyileşebilen Sandviç Yapı Karakterizasyon Sonuçları | 167 |
| 4.1.1. Bası Deney Sonuçları..... | 167 |
| 4.1.2. Darbe deneyi sonuçları..... | 172 |
| 4.2. Geometrik Olarak Kendi Kendine İyileşebilen Sandviç Yapı Karakterizasyon Sonuçları..... | 178 |
| 4.2.1. Bası deney sonuçları | 178 |
| 4.2.2. Penetrasyon deney sonuçları | 180 |
| 4.2.3. Sıvı geçirgenlik testi deney sonuçları | 183 |
| 4.2.4. Hava geçirgenlik testi deney sonuçları | 184 |
| 4.3. Ultra Hızlı Şekilde Kendi Kendine İyileşebilen Kompozit Malzeme Mekanik Değerler Ve Karakterizasyon | 186 |
| 4.3.1. Deneysel tasarım ve optimizasyon sonuçları | 186 |
| 4.3.2. Bası deney sonuçları | 194 |
| 4.3.3. Darbe deney sonuçları..... | 196 |
| 4.3.4. Tek nokta bindirme (SLJ) deney sonuçları | 200 |
| 5. TARTIŞMA VE SONUÇ | 202 |
| KAYNAKLAR | 207 |
| ÖZGEÇMİŞ | 220 |

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

| Simgeler | Açıklama |
|---------------|-------------------------------|
| η | Verimlilik |
| f_{healed} | Hasar görmemiş numune |
| f_{virgin} | Hasar görmüş numune |
| E | Elastisite modülü |
| V | Hacim |
| ε | Birim şekil değiştirme |
| σ | Normal gerilme |
| X | Spesifik malzeme özelliği |
| θ | Açı (radyan) |
| K | Ampirik malzeme sabiti |
| N | Eksenel yük |
| t | Kalınlık |
| M | Moment |
| A_{ij} | Uzama-Kayma rijitlik matrisi |
| B_{ij} | Uzama-Eğilme rijitlik matrisi |
| D_{ij} | Eğilme rijitlik matrisi |
| G | Kayma Modülü |
| h | Plaka kalınlığı |
| k | Kayma düzeltme faktörü |
| y | Enine kayma gerinimi |
| V | Kesme kuvveti |
| b | Genişlik |
| U | Enerji |
| I | Atalet momenti |
| δ | Şekil Değiştirme |
| ρ | Yoğunluk |
| τ | Kayma Gerilmesi |
| ν | Poisson Oranı |

| | |
|-------|-----------------------------------|
| z | Sandviç numune çekirdek kalınlığı |
| w | İş |
| l | Mesafe |
| K | Sıvı geçirgenlik katsayısı |
| h | Yükseklik |
| g | Yer çekimi |
| μ | Dinamik viskozite |
| Q | Hava akış hacmi |
| q | Hava akış hızı |
| A | Kesit alanı |

| Kısaltmalar | Açıklama |
|--------------------|--|
| DA | Diels-Alder |
| rDA | Retro-Diels-Alder |
| 3M | Tris-maleimid |
| SS | Disülfid |
| UV | Ultraviyole |
| PEG | Polietilen glikol |
| DCPD | Disiklopentadien |
| ROMP | Halkalı metatez polimerizasyonu |
| PDMS | Polidimetilsiloksandan |
| ASTM | American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzeme Derneği) |
| PA | Poliamid |
| PC | Polikarbonat |
| PP | Polipropilen |
| ABS | Akrilonitril Bütadien Stiren |
| PVC | Polivinil Klorür |
| PU | Poliüretan |
| DoE | DeneySEL Tasarım |

C_3H_6O

$NaHCO_3$

CA

Aseton

Sodyum bikarbonat

Siyanoakrilat

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

| | |
|---|----|
| Şekil 2. 1. Kendi Kendine İyileşme Mekanizmaları | 6 |
| Şekil 2. 2. Furan ve maleimid arasındaki Diels-Alder siklo katılma reaksiyonu yoluyla tersinir polimer çapraz bağlanması..... | 7 |
| Şekil 2. 3. Tersinir yüksek çapraz bağlı furan-maleimid bazlı polimer ağı..... | 9 |
| Şekil 2. 4. Disülfid köprüleri ile tersinir polimer çapraz bağlanması. | 10 |
| Şekil 2. 5. Üretan gruplarının moleküler birimlere bağlı olduğu poliüretan sentezi..... | 11 |
| Şekil 2. 6. İyonomerik polimerler ile kendi kendine iyileşme | 12 |
| Şekil 2. 7. Oxetane-Chitosan-Poliüretan ağlarının UV altında A1, 0 dak; A2, 15 dakika; A3, 30 dk. süresince kaydedilen IR (üst) ve optik (alt) görüntüleri | 13 |
| Şekil 2. 8. Oksetan-Kitosan oluşumunda yer alan adımlar, (1) Oksetanın Kitosan ile Oxetan-Kitosan öncüsünün oluşumuna yol açan reaksiyonlar. (2) Oksetan-Kitosan'ın HDI ve PEG ile reaksiyonları, yenilenebilen Oksetan-Kitosan-Poliüretan ağının oluşumu. | 14 |
| Şekil 2. 9. Kapsül Bazlı Kendi Kendine İyileşme Teknikleri. | 16 |
| Şekil 2. 10. Kapsüller ile kendi kendine iyileşen malzemede hasar onarımı..... | 17 |
| Şekil 2. 11. Vasküler ağ yapısı ve iyileşme mekanizması. | 18 |
| Şekil 2. 12. Vasküler kendi kendine iyileşen malzemeler | 19 |
| Şekil 2. 13. Kendi kendine iyileşen kaplamalar; a) Hasar öncesi, b) Kapsüllerin hasara uğraması, c) İyileşme evresi, d) İyileşmenin tamamlanması. | 21 |
| Şekil 2. 14. Kendi kendine iyileşen seramikler..... | 22 |
| Şekil 2. 15. Katmanlı Kompozit Yapı. | 25 |
| Şekil 2. 16. Kompozit malzeme arayüzü. | 27 |
| Şekil 2. 17. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması..... | 28 |
| Şekil 2. 18. Kompozit yükleme koşulları..... | 36 |
| Şekil 2. 19. Kompozit malzeme hacim oranları ve matris ile lif elastisite modülü ilişkisi | 37 |
| Şekil 2. 20. Liflerin açısına bağlı olarak meydana gelen kırılma modları. | 41 |
| Şekil 2. 21. Tipik bir sandviç yapı gösterimi. | 47 |
| Şekil 2. 22. Çekirdek yapıların sınıflandırılması | 48 |
| Şekil 2. 23. Sandviç yapılar ile I kirişlerin gerilme davranışları..... | 49 |
| Şekil 2. 24. Karbon fiber yüzey malzemeli bal peteği sandviç yapı | 51 |
| Şekil 2. 25. Bal peteği kompozitler..... | 52 |
| Şekil 2. 26. Uzatarak şekil verme yöntemi ile petek hücre üretimi. | 53 |
| Şekil 2. 27. Kıvrılarak şekil verme yöntemi ile petek hücre üretimi | 53 |
| Şekil 2. 28. Sandviç konfigürasyonu..... | 55 |
| Şekil 2. 29. Kat numaralandırma sistemi | 56 |
| Şekil 2. 30. Çekirdek kalınlığının bir fonksiyonu olarak sandviç eğilme rijitliğindeki değişim | 57 |
| Şekil 2. 31. Basınç altında bir sandviç panelin eğilmesi..... | 58 |
| Şekil 2. 32. Çekirdek kalınlığının enine kesme etkisi olan ve olmayan bir sandviçin burkulma yükü etkisindeki davranışı. | 60 |
| Şekil 2. 33. Kesme yükü altında sandviç panel..... | 61 |
| Şekil 2. 34. Yüzey plakalarındaki iç kuvvetleri gösteren serbest cisim diyagramı | 62 |
| Şekil 2. 35. Bir sandviç yapının kesit görünümü | 63 |
| Şekil 2. 36. Eğilme momenti altında bir sandviç giriş elemanı | 63 |

| | |
|--|-----|
| Şekil 2. 37. Çekirdek kayma gerilmesi hesaplarında dikkate alınan ifadeler. | 64 |
| Şekil 2. 38. Sandviç buruşma modları | 66 |
| Şekil 2. 39. Bası testi sonrası buruşma meydana gelen sandviç numune | 67 |
| Şekil 2. 40. Simetrik buruşmaya maruz kalan sandviçin konfigürasyonu | 68 |
| Şekil 2. 41. Yerel bölgede deforme olmuş yüzey plakası..... | 71 |
| Şekil 2. 42. Yüzey plakasını ve çekirdeğin bir kısmını gösteren sandviç enine kesiti. .. | 79 |
| Şekil 2. 43. Yüzey plakasının dış yüzeyindeki dalgalanma | 80 |
| Şekil 2. 44. Sandviç dalgalanması..... | 81 |
| Şekil 2. 45. Kayma yükü altındaki sandviç numunenin bası ve çekme yükleri dâhilinde analizi | 83 |
| Şekil 2. 46. Plaka boyutu ve çift eksenli yükleme oranı N_y/N_x' in bir fonksiyonu olarak kare yarı izotropik bir plakanın burkulma yükü | 84 |
| Şekil 2. 47. Sandviç kıvrılması | 87 |
| Şekil 2. 48. Bir sürecin genel modeli | 89 |
| Şekil 2. 49. Deney tasarımının uygulama süreci..... | 92 |
| | |
| Şekil 3. 1. Polistren köpük. | 111 |
| Şekil 3. 2. Polistren tanesinin epoksi ve NaHCO_3 ile kaplanması. | 112 |
| Şekil 3. 3. Gözenekli kapsül yapısı. | 113 |
| Şekil 3. 4. Kapsül duvar kalınlığı..... | 114 |
| Şekil 3. 5. Epoksi reçine ve aktivatör enjekte edilmiş makro kapsüller. | 114 |
| Şekil 3. 6. Enjektör deliklerinin kapatılması. | 115 |
| Şekil 3. 7. Makro kapsüllerin Al bal peteği hücrelerine yerleştirilmesi..... | 115 |
| Şekil 3. 8. Teste hazır Al bal peteği sandviç yapı. | 116 |
| Şekil 3. 9. Geliştirilen kendi kendine iyileşebilen sandviç yapı ve kesit görünümü. | 117 |
| Şekil 3. 10. Tekrarlı yüklemelere maruz kalan bası deney numunesi..... | 118 |
| Şekil 3. 11. İlk yüklemenin ardından kısmi hasara uğramış numunenin kesit görünümü. | 119 |
| Şekil 3. 12. Darbe test düzeneği..... | 120 |
| Şekil 3. 13. Darbe testine maruz kalan numunenin kesit görünümleri. | 121 |
| Şekil 3. 14. 3 katmanlı kapsül yapısının elde edilmesi. | 123 |
| Şekil 3. 15. Geometrik olarak iyileşme kabiliyetine sahip ajanların kapsül içerisinde görünümü. | 124 |
| Şekil 3. 16. Kapsüllerin bal peteği hücrelerine yerleştirilmesi. | 124 |
| Şekil 3. 17. Boş bal peteği hacimlerinin epoksi ile doldurulması..... | 125 |
| Şekil 3. 18. Dış etken olmadan poliüretan köpürmesi. | 126 |
| Şekil 3. 19. Dış etken sonrası poliüretan köpürmesi..... | 127 |
| Şekil 3. 20. Poliüretan köpük dijital mikroskop görüntüsü..... | 128 |
| Şekil 3. 21. Poliüretan köpük SEM görüntüsü..... | 129 |
| Şekil 3. 22. Bası deney aşamaları ve geometrik iyileşme. | 131 |
| Şekil 3. 23. 1. Deney sonrası bası numunesinde meydana gelen iyileşme görüntüsü. . | 132 |
| Şekil 3. 24. Penetrasyon test düzenek şeması. | 133 |
| Şekil 3. 25. Penetrasyon test düzenek şeması. | 134 |
| Şekil 3. 26. Penetrasyon testi sonrası hasarlı bölgede zamana bağlı geometrik iyileşme. | 135 |
| Şekil 3. 27. Sıvı geçirgenlik deneyinde numune hücresi geliştirilmesi. | 137 |
| Şekil 3. 28. Sıvı geçirgenlik testi (Falling Head Permeameter Test) a) şematik diyagram | 138 |

| | |
|---|-----|
| Şekil 3. 29. Hava geçirgenlik testi a) Hava akış test cihazı. b) Cihaz çalışma prensibi. c) Hava probu altında deney numunesi. | 140 |
| Şekil 3. 30. Ultra hızlı iyileşen kapsül geliştirilmesinde kullanılan polisitren köpük. . | 142 |
| Şekil 3. 31. Epoksi kaplı polisitren köpüğün yapı içerisinden uzaklaştırılması..... | 143 |
| Şekil 3. 32. Üç katmanlı epoksi makro kapsül..... | 144 |
| Şekil 3. 33. Siyanoakrilat ile Sodyum bi karbonat kimyasal reaksiyonu..... | 145 |
| Şekil 3. 34. Tepkime esnasında meydana gelen ısı değerlerin termal kamera ile ölçümü. | 146 |
| Şekil 3. 35. Toz aktivatör ile siyanoakrilat tepkimesi esnasında açığa çıkan anlık ısı. | 147 |
| Şekil 3. 36. İyileşme ajanlarının kapsül içerisine doldurulması..... | 147 |
| Şekil 3. 37. Siyanoakrilat dolgulu iyileşme kapsüllerinden numune üretilmesi. a) Kalıp içerisine kapsüllerin ilavesi. b) boş hacmin NaHCO ₃ dolgulu epoksi ile doldurulması..... | 148 |
| Şekil 3. 38. Silindirik kendi kendine iyileşen numune yüzeyinin NaHCO ₃ dolgulu silikon ile kaplanması..... | 149 |
| Şekil 3. 39. Silindirik kendi kendine iyileşen numune yüzeyinin saf silikon ile (ikinci kez) kaplanması..... | 150 |
| Şekil 3. 40. Kesiti alınmış numune. | 151 |
| Şekil 3. 41. İyileşme bölgelerinin mikroskop görüntüleri. | 152 |
| Şekil 3. 42. Silindirik bası ve darbe deney numunesi. | 155 |
| Şekil 3. 43. Bası deneyleri esnasında kendi kendine iyileşmenin ısı değişim miktarı. | 157 |
| Şekil 3. 44. Darbe test cihazı..... | 158 |
| Şekil 3. 45. Darbe deneyleri esnasında kendi kendine iyileşmenin ısı değişim miktarı. | 159 |
| Şekil 3. 46. Farklı aktivatörler ile yapışma sağlayan siyanoakrilat ile epoksi ara yüzeyleri. | 161 |
| Şekil 3. 47. Siyanoakrilatın farklı aktivatörler ile yapışma yüzeylerinde zamana bağlı açığa çıkan ısı değerler. | 163 |
| Şekil 3. 48. ASTM D1002 standardına göre hazırlanmış SLJ numuneleri | 164 |
| Şekil 3. 49. Çekme çenelerine bağlanmış SLJ test numunesi..... | 165 |
| Şekil 3. 50. Yapıştırıcı hasar incelenmesi | 166 |
| Şekil 4. 1. Üç adımda incelenen kendi kendine iyileşen sandviç numune bası deneyleri. | 168 |
| Şekil 4. 2. Saf epoksi 1. ve 2. bası deney sonuçları. | 169 |
| Şekil 4. 3. Kendi kendine iyileşen, saf epoksi dolgulu ve dolgusuz sandviç numunenin bası deney sonuçları..... | 170 |
| Şekil 4. 4. Kendi kendine iyileşen, saf epoksi dolgulu ve dolgusuz sandviç numunenin bası deneyi altındaki enerji absorpsiyon verileri. | 171 |
| Şekil 4. 5. Kendi kendine iyileşen sandviç numunelerin darbe deney sonuçları. | 173 |
| Şekil 4. 6. Saf epoksi 1. ve 2. darbe deney sonuçları. | 174 |
| Şekil 4. 7. Kendi kendine iyileşen, saf epoksi dolgulu ve dolgusuz sandviç numunenin darbe deney sonuçları. | 175 |
| Şekil 4. 8. Kendi kendine iyileşen, saf epoksi dolgulu ve dolgusuz sandviç numunenin darbe deneyi altındaki enerji absorpsiyon verileri..... | 176 |
| Şekil 4. 9. Geometrik olarak kendi kendine iyileşen sandviç yapının bası deney sonuçları. | 179 |

| | |
|--|-----|
| Şekil 4. 10. Geometrik olarak kendi kendine iyileşen sandviç yapının bası deney sonuçları bası altındaki enerji absorpsiyon verileri. | 180 |
| Şekil 4. 11. Geometrik olarak kendi kendine iyileşen sandviç yapının penetrasyon deney sonuçları. | 181 |
| Şekil 4. 12. Geometrik olarak kendi kendine iyileşen sandviç yapının bası deney sonuçları bası altındaki enerji absorpsiyon verileri. | 182 |
| Şekil 4. 13. Boş Al bal peteği numunesinin penetrasyon deneyi altında fiziksel davranışı. | 183 |
| Şekil 4. 14. Hava geçirgenlik deney sonuçları..... | 185 |
| Şekil 4. 15. Hava geçirgenlik deneyi sonrası SEM görüntüsü..... | 186 |
| Şekil 4. 16. Artıkların normal eğrileri..... | 190 |
| Şekil 4. 17. Artıklar- tahmini eğrileri..... | 191 |
| Şekil 4. 18. Tahmin-gerçek eğrileri..... | 192 |
| Şekil 4. 19. Enerji absorpsiyon tahminleri..... | 193 |
| Şekil 4. 20. Ultra hızlı kendi kendine iyileşebilen kompozit malzemenin bası deney sonuçları..... | 195 |
| Şekil 4. 21. Ultra hızlı kendi kendine iyileşebilen kompozit malzemenin bası deneyi altında enerji absorpsiyon değerleri..... | 196 |
| Şekil 4. 22. Ultra hızlı kendi kendine iyileşebilen kompozit malzemenin darbe deney sonuçları..... | 197 |
| Şekil 4. 23. Ultra hızlı kendi kendine iyileşebilen kompozit malzemenin darbe deneyi altında enerji absorpsiyon değerleri..... | 199 |
| Şekil 4. 24. Tek nokta bindirme deney sonuçları..... | 201 |

ÇİZELGELER DİZİNİ

| | Sayfa |
|---|--------------|
| Çizelge 2. 1. Bazı elyaf malzemelerin mekanik özellikleri | 31 |
| Çizelge 2. 2. Genel amaçlı termoplastiklerin bazı özellikleri | 33 |
| Çizelge 2. 3. Mühendislik amaçlı termoplastiklerin bazı özellikleri | 34 |
| Çizelge 2. 4. Elyaf yönelimlerinin gösterilmesi | 35 |
| Çizelge 2. 5. Bal peteği sandviç yapı ve metal levha karşılaştırılması. | 50 |
| Çizelge 2. 6. Sandviç panel buruşmasında sonlu elemanlar analizlerine karşılık analitik tahminler. | 77 |
| Çizelge 2. 7. Elde edilen buruşma tahminleri ve test edilmiş dalgalı model sonuçlarının karşılaştırılması | 81 |
| Çizelge 2. 8. Kombine yükler altında sandviç buruşması için etkileşimler | 86 |
| | |
| Çizelge 3. 1. Ultra hızlı kendi kendine iyileşebilen kompozit malzeme için deneysel tasarım. | 154 |
| | |
| Çizelge 4. 1. Bası ve darbe deneylerinde emilen enerji miktarları. | 178 |
| Çizelge 4. 2. Deneysel tasarım sonuçları. | 187 |
| Çizelge 4. 3. Anova analizi. | 188 |
| Çizelge 4. 4. Statik analiz..... | 189 |
| Çizelge 4. 5. Ultra hızlı kendi kendine iyileşebilen kompozit malzeme dolgu oranı nümerik optimizasyonu. | 193 |
| Çizelge 4. 6. Bası ve darbe deneylerinde emilen enerji miktarları. | 200 |

1. GİRİŞ

Son yıllarda tekrarlı kullanıma sahip yapılar üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Geliştirilen en yaygın yapılar kendi kendine otonom olarak iyileşebilen yapılardır. Farklı tiplerde olan kendi kendine iyileşen yapılar genellikle hasar sonrası iyileşme gösterip, tekrarlı hasarlara karşılık gösterebilmektedir. Böylece fazlaca yedek parça ihtiyacı, işçilik, zaman, hammadde giderleri gibi farklı süreçlere cevap verebilmektedir. Literatürde en yaygın çalışmalar mikro kürelerin kendi kendine iyileşmeleri üzerine gerçekleştirilmiştir. Bir başka ifadeyle kılcal hasarların iyileşmesi yönünde fazlaca çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmada ise literatürde yer alan mikro ve nano çatlaklarda kendi kendine iyileşmeden farklı olarak makro boyutta meydana gelen hasarların onarılması amacıyla kendi kendine iyileşen yapılar geliştirilmiştir. Geliştirilen yapılar üç temel niteliğe sahiptir. Bunlar kendi kendine zamana bağlı olarak iyileşebilen epoksi bazlı sandviç panel geliştirilmesi, poliüretan bazlı kendi kendine geometrik olarak iyileşebilen sandviç panel geliştirilmesi ve kendi kendine ultra hızlı iyileşebilen yapılardır. İlk olarak makro küreler geliştirilmiştir. Makro kürelerin üretiminde polistiren köpük taneleri kullanılmıştır. Bu taneciklerin etrafı epoksi ile kaplanarak kabuk yapılar oluşturulmuştur. Oluşturulan kabuk yapı gözenekli halde üretilmiştir. Bu gözenekler yardımıyla kabuğun içerisinde var olan polistiren köpüklerin eritilmesi sağlanmıştır. Polistiren köpüğü eritmek için aseton kullanılmıştır. Köpüğün erimesiyle mevcut epoksi kabuk yapının rijitliği azalmıştır. Makro boyutlarda elde edilen kürenin yapısal rijitliğini artırmak amacıyla epoksi ile ikinci kaplama yapılmıştır. Böylece nihai makro küreler elde edilmiştir. Sonrasında ise makro kürelerin içleri istenilen vasıflar doğrultusunda farklı ajanlar ile doldurulmuştur. İlk olarak makro kürelerin içerisine enjektör yardımıyla epoksi ve kürleştirici ilave edilmiştir. İçleri iyileşme ajanları ile doldurulan makro küreler alüminyum bal peteği sandviç panel içerisine doldurulmuştur. Sandviç panel içerisinde mikro kürelerden arta kalan boş hacim epoksi reçine ile doldurulmuştur. Statik bası deneyleri ve yüksek birim şekil değiştirme hızında gerçekleştirilen impact deneyleri için numuneler hazırlanmıştır. Test verileri deneysel olarak ve kesit görselleri ile gözlemlenmiştir. Yapı içerisine ilave edilen makro kürelerin yapıda oluşturduğu iyileşme, yapının mekanik değerlerine ve enerji sönümlemesine katkısı incelenmiştir.

Geliştirilen bir diğer yapı ise geometrik olarak otonom iyileşebilen sandviç yapılardır. Geliştirilen makro kürelerin içleri poliüretan iyileşme ajanlarıyla 1:1 oranında doldurulmuş ve sandviç panellerin içerisine yerleştirilmiştir. Sandviç panel içerisinde makro küreler dışında kalan boş hacim epoksi reçine ile doldurulmuştur. Elde edilen sandviç yapılar, statik bası deneyi (50mm x 50mm) ve penetrasyon testi (150mm x 150mm) için hazırlanmıştır. Meydana gelen geometrik iyileşmenin mekanik etkisi statik bası deneyi ile tespit edilmiştir. Penetrasyon testinde oluşturulan hasar neticesinde makro kapsüller kırılmıştır. Kırılan makro kapsüller içerisindeki iyileşme ajanları hasar bölgesine dağılmıştır. Hasar, 120 saniye içinde tamamen giderilmiştir. Yapıda meydana gelen poliüretan köpük oluşumu ve bu oluşumun sıvı ve hava geçirgenliği, kullanım alanlarına doğrudan etki edecektir parametrelerdir. Bu nedenle hava ve sıvı geçirgenlik testlerine de tabii tutulmuştur. Sıvı geçirgenliğinde zamana bağlı olarak akışkanın basıncı artmıştır. Nihayetinde herhangi bir sıvı geçirgenliği gözlemlenmemiştir. Hava geçirgenliği testi ile basınç arttıkça hava geçirgenliğinin arttığı gözlemlenmiştir. Geliştirilen poliüretan dolgulu makro kapsüllerden oluşan sandviç yapıların yapının denizaltı boru hatlarında, deniz altlarında, gemilerde ve yakıt tanklarında kullanılması öngörülmektedir.

Literatürde yer alan çalışmalarda kendi kendine iyileşmeler zamana bağlı olarak meydana gelmektedir. Yakıt tankları gibi anlık iyileşmenin beklendiği yapılarda ise mevcut kendi kendine iyileşme yapıları beklenen görevi görmemektedir. Bu nedenle ultra hızlı yani anlık iyileşme vasfına sahip yapıların geliştirilmesi endüstriyel açıdan önem teşkil etmektedir. Bu nedenle çalışmaların devamı olarak geliştirilen makro kürelerin içleri siyanoakrilat ile doldurularak anlık iyileşmeler hedeflenmiştir. İyileşmede hızlandırıcı etkiye sahip aktivatör toz aktivatör (sodyum bi karbonat) kullanılmıştır. Toz aktivatör makro kürelerin ilave edildiği numunenin boş hacimlerini dolduran epoksi içerisine homojen oranda ilave edilmiştir. Bu oran deneysel tasarım yöntemi ile belirlenmiştir. Ayrıca yapısal bütünlüğün korunması ve yüzey pürüzlülüğünün sağlanması amacıyla hazırlanan numunenin dış yüzeyi iki katmanlı silikon ile kaplanmıştır. Hasar sonrası kırılan makro kürelerin içlerindeki iyileşme ajanlarından etrafa dağılması muhtemel

siyanoakrilatların önüne geçilmesi ve numunede iyileşmenin eksiksiz olarak tamamlanması için ilk kaplama içerisinde toz aktivatör ilave edilmiştir. Toz aktivatörün silikon kaplamada olası kayma mukavemeti düşüklüğünü giderebilmek amacıyla ikinci kaplama saf silikon ile tamamlanmıştır. Böylece numune hazırlığı tamamlanmıştır. Geliştirilen numune üzerinde statik bası deneyleri ve high strain rate impact deneyleri gerçekleştirilmiştir. Mekanik olarak iyileşme performansı gözlemlenmiştir. Ayrıca deneyde çatlaklara dağılan siyanoakrilatın toz aktivatör ile reaksiyonunda ortaya çıkan yüksek ısı termal kamera ile gözlemlenmiştir. Sonuç olarak 3 farklı amaçla geliştirilen kendi kendine iyileşme vasfına sahip yapıların birkaç farklı yöntem ile iyileşme vasıfları ortaya konulmuştur.

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Kendi Kendine İyileşen Malzemeler

Kendi kendini iyileştiren malzemeler, herhangi bir dış sorun etkisi veya insan müdahalesi olmaksızın kendi hasarlarını onarma yeteneğine sahip yapay veya sentetik olarak oluşturulmuş maddelerdir. Genel olarak malzemeler, yorgunluk, çevresel koşullar veya çalışma sırasında meydana gelen hasar nedeniyle zamanla özelliklerini kaybeder veya bozulurlar. Mikroskobik düzeydeki çatlaklar ve diğer hasar türlerinin malzemelerin mekanik, termal, elektriksel ve akustik özelliklerini değiştirdiği bilinmektedir. Çatlakların yayılmasıyla malzeme nihai olarak bozulabilmektedir. Genel olarak, çatlakları erken aşamada tespit etmek zordur ve periyodik kontroller ve onarımlar için manuel müdahale gerekir. Buna karşılık, kendi kendini iyileştiren malzemeler, mikro hasara tepki veren bir onarım mekanizmasının başlatılması yoluyla bozulmaya karşı koyar (Ghosh, 2008). Bazı kendi kendini iyileştiren malzemeler akıllı yapılar olarak sınıflandırılır ve algılama ve çalıştırma özelliklerine göre çeşitli çevresel koşullara uyum sağlayabilir (Yuan, 2008).

Kendi kendini iyileştiren malzemelerin en yaygın türleri polimerler veya elastomerler olsa da, kendi kendini iyileştiren metaller, seramikler ve çimentolu malzemeler dahil tüm malzeme sınıflarını kapsar. İyileştirme mekanizmaları, malzemenin içsel onarımından mikroskobik bir kapsül veya aktivatör haznesi bulunan bir onarım maddesinin eklenmesine kadar farklılık gösterir. Bir materyalin tamamıyla otonom olarak kendi kendini iyileştiren olarak tanımlanabilmesi için, iyileşme sürecinin insan müdahalesi olmadan gerçekleşmesi gerekir. Bununla birlikte, kendi kendini iyileştiren polimerler, iyileşme süreçlerini başlatmak için bir dış uyarana (sıcaklık, ışık değişimi, vb.) ihtiyaç duyabilirler.

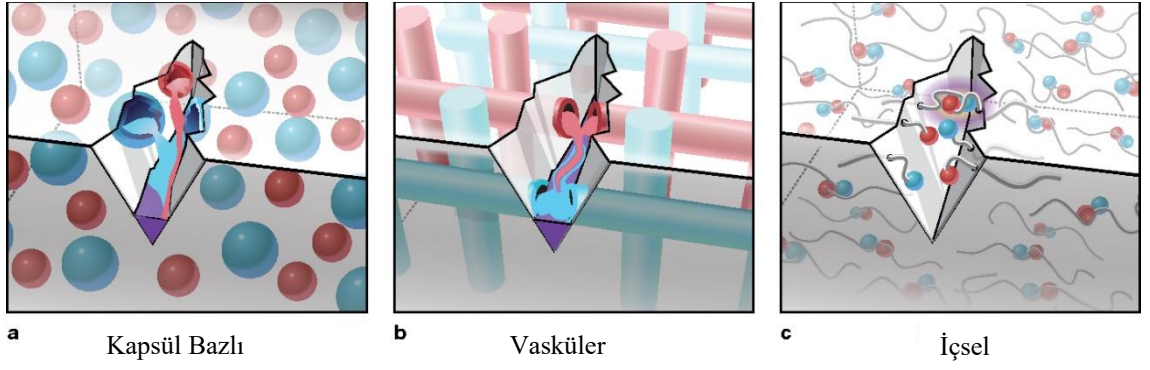
Kendi kendine iyileşen malzemeler, normal kullanımın neden olduğu hasarı özünde ortadan kaldıracaktır. Böylelikle, malzeme arızasından kaynaklanan maliyetler önenebilir

ve daha uzun parça ömrü sayesinde bir dizi farklı endüstriyel işlemler devre dışı bırakılabilir.

2.1.1. Kendi kendine iyileşen polimerler ve elastomerler

Geçen yüzyılda polimerler, kauçuklar, plastikler, filmler, elyaflar veya boyalar gibi ürünler günlük yaşamda temel bir malzeme haline geldi. Bu büyük talep, malzemelerin güvenilirliklerini ve maksimum ömürlerini uzatma doğrultusunda çalışmalarını peşi sıra getirdi. Yapısal hasar veya yorulmadan sonra işlevselliklerin geri kazanılması bu malzemeler için kendi kendine iyileşen malzemeler adında yeni bir tasarım sınıfı doğurmuştur. Bu polimer malzemeler, kendi kendini iyileştirme mekanizmasına yaklaşıma göre içsel veya dışsal olarak iki farklı gruba ayrılmıştır (Yang, 2013; Mahajan & Gite, 2019).

Otonom kendi kendini iyileştiren polimerler, biyolojik tepkiye çok benzeyen üç aşamalı bir süreci takip eder. Hasar durumunda, ilk tepki, hasar oluştuktan hemen sonra gerçekleşen tetiklenme sürecidir. İkinci tepki, iyileşme ajanlarının etkilenen bölgeye oldukça hızlı şekilde taşınmasıdır. Üçüncü tepki kimyasal onarım sürecidir. Bu esnada yapısal kusurlar giderilerek eski özelliklerinin kazanılması beklenir. Bu süreç, iyileşme mekanizmasının tipine bağlı olarak farklılık gösterir. Polimerizasyon, dolaşıklık, tersinir çapraz bağlama iyileşme mekanizmalarına örnek olarak gösterilebilir. Bu materyaller, kronolojik olarak ilişkilendirilebilen üç mekanizmaya göre sınıflandırılabilir. Bu iyileşme mekanizmaları şekil 2.1' de gösterilen kapsül bazlı, vasküler bazlı ve içsel iyileşme olarak tanımlanmaktadır (Utrera-barrios, Verdejo, Lopez-Manchado & Hernandez, 2020).



Şekil 2. 1. Kendi Kendine İyileşme Mekanizmaları (Utrera-barrios ve ark, 2020)

Bazı yönlerden benzer olan bu mekanizmalar, fiili hasar devam edene kadar iyileşmenin gizlenmesi veya önlenmesi açısından farklılık gösterir.

2.1.2. İçsel kendi kendine iyileşen malzemeler

İçsel sistemlerde, malzeme tabii yollarla kendi kendini iyileştirebilir. Bu iyileşme için genellikle bir tetikleyiciye ihtiyaç duyulur. Termo-mekanik, elektrik, foto-uyaran gibi tetikleyiciler örnek olarak gösterilebilir. İçsel kendini iyileştirme stratejisi farklı çerçevelerde değerlendirilebilir. Birincisi tersinir reaksiyonlara dayalıdır ve en yaygın olarak kullanılan reaksiyon şeması Diels-Alder (DA) ve retro-Diels-Alder (rDA) reaksiyonlarına dayanmaktadır (Chen, Dam, Ono, Mal, Shen, Nutt, Sheran & Wudl, 2002). Başka bir iyileşme davranışı, eriyebilir termoplastik katkı maddelerin eklenmesiyle termoset matrislerde kendi kendini iyileşme görülmesidir.

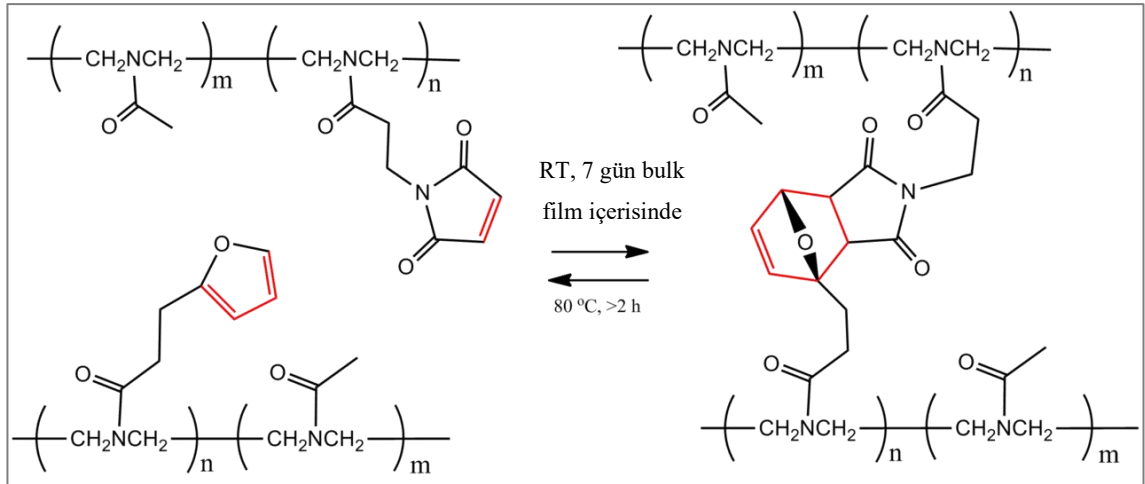
Bu yöntem bir sıcaklık tetikleyicisi ile gerçekleştirilir. Isınan ortam ile termoplastik katkı maddeleri çatlaklara nüfuz eder ve mekanik iyileşme tamamlanır (Luo, Ou, Eberly, Singhal, Viratyaporn & Mather, 2009). Dinamik supramoleküler bağlara veya iyonomerlere dayalı polimer kilitlenmeleri, başka bir iyileşme yöntemi olarak bilinmektedir. İlgili supramoleküler etkileşimler ve iyonomerik kümeler genellikle tersine çevrilebilir ve tersine çevrilebilir çapraz bağlar olarak hareket eder, bu nedenle polimerlere kendi kendini iyileştirme vasfı sağlamaktadır (Kalista, Ward & Oyetunji,

2007; Cordier, Tournilhac, Soulié-Ziakovic & Leibler, 2008). İçsel kendi kendini iyileştirme stratejisinde alternatif bir yöntem ise moleküler difüzyona dayalıdır (Yamaguchi, Ono & Okamoto, 2009).

➤ Çapraz bağlı polimerler

Bu tip polimerde, polimer, lineer termoplastiklerden asılı grupların çapraz bağlanması yoluyla oluşur. Örneğin, Saegusa ve ark. ya maleimid ya da furankarbonil asılı parçalar içeren modifiye poli (N-asetiletilenimin)lerin tersine çevrilebilir çapraz bağlanmasını göstermiştir. Reaksiyon Şekil 2.2’de gösterilmiştir.

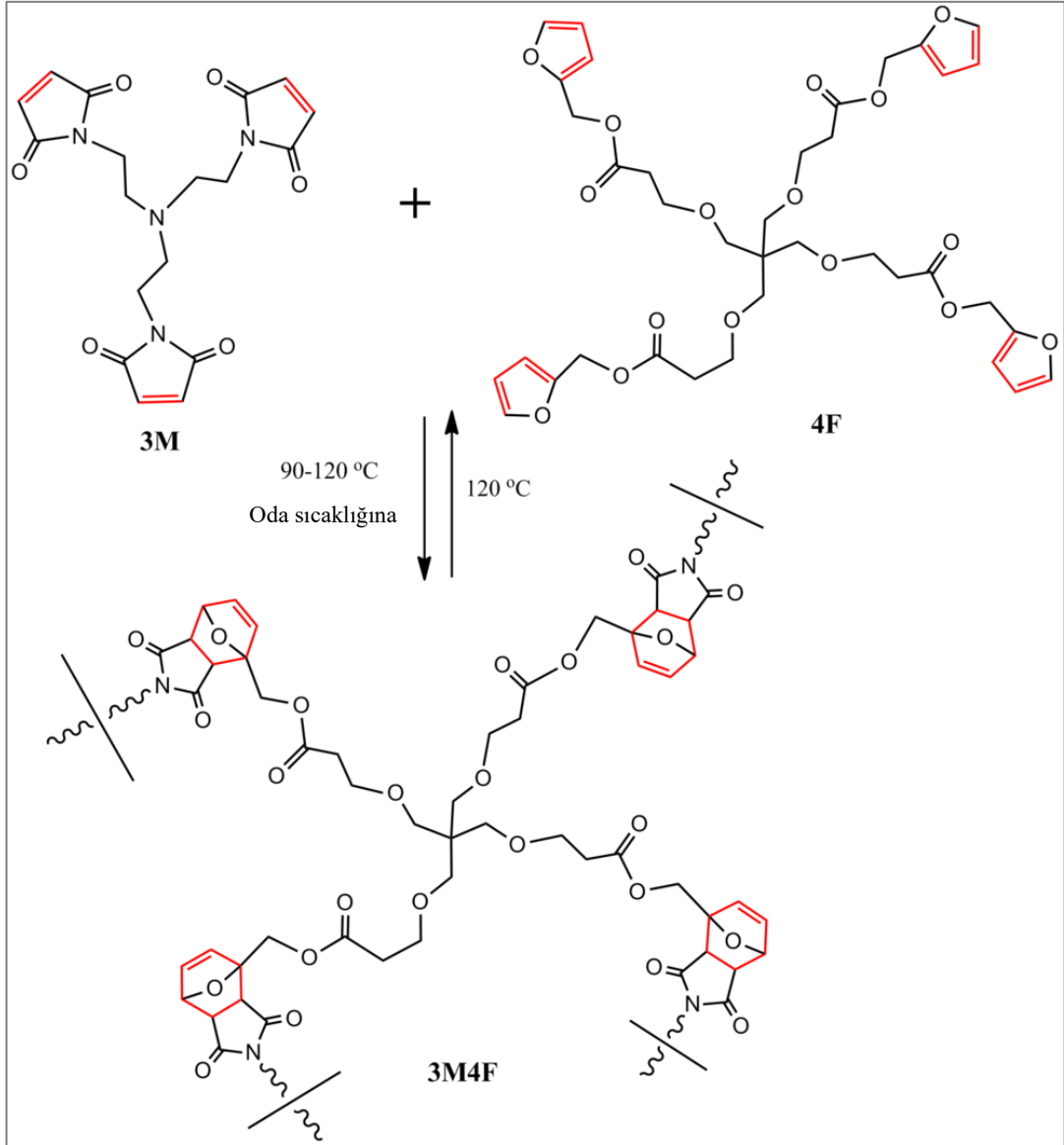
Furan ve maleimid birimlerinin oda sıcaklığındaki reaksiyonu ile yüksek düzeyde çapraz bağlı bir malzeme yapmak için iki tamamlayıcı polimeri karıştırdılar (Chujo ve ark., 1990). Çapraz bağlı polimerler ayrı ayrı başlangıç malzemelerinden termodinamik olarak daha kararlıdır. Bununla birlikte, polimerin polar bir çözücü içinde iki saat boyunca 80 °C’ye ısıtılması üzerine, polimerlerin parçalanması yoluyla monomerler yeniden üretildi.



Şekil 2. 2. Furan ve maleimid arasındaki Diels-Alder siklo katılma reaksiyonu yoluyla tersinir polimer çapraz bağlanması (Chujo, Sada & Saegusa, 1990).

- Çok İşlevli Monomerlerin Polimerizasyonu

Bu sistemlerde reaksiyon, bir bağlantı olarak değil, polimeri oluşturmak için omurganın kendisinde gerçekleşir. Furan-maleimid bazlı bir polimerin (3M4F) polimerizasyonu ve iyileştirme süreçleri, ısıtma/soğutma döngülerine tabi tutularak gösterilir. Gerçekleştirilen bir çalışmada Tris-maleimid (3M) ve tetra-furan (4F), reaksiyon yoluyla bir polimer oluşturdu ve 120 °C'ye ısıtıldığında, depolimerize edilerek başlangıç materyalleri elde edildi. Daha sonra 90–120 °C'ye ısıtma ve oda sıcaklığına soğutma, polimeri iyileştirdi ve müdahale yoluyla mekanik özelliklerini kısmen geri kazandı. Reaksiyon Şekil 2.3'te gösterilmiştir.

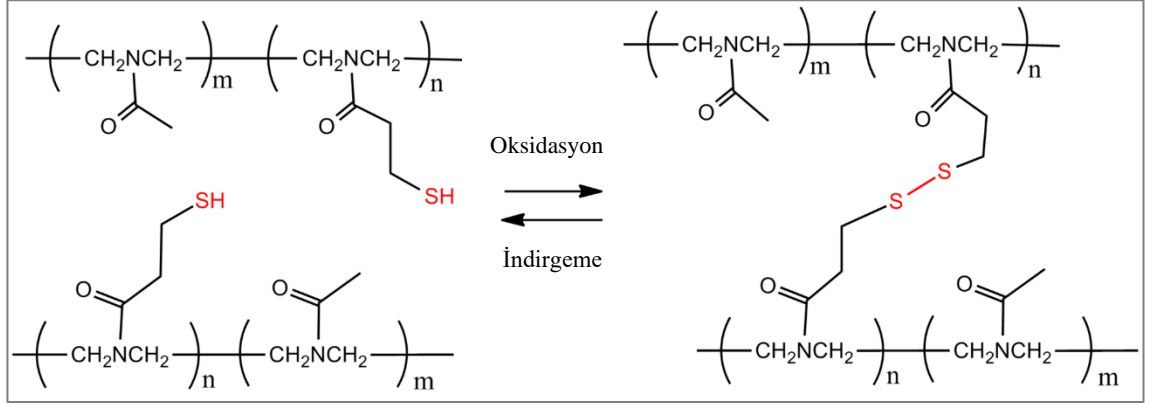


Şekil 2. 3. Tersinir yüksek çapraz bağlı furan-maleimid bazlı polimer ağı (Chujo ve ark., 1990).

- Tiyol Bazlı Polimerler

Tiyol bazlı polimerler, oksidasyon ve indirgeme yoluyla tersine çevrilebilir şekilde çapraz bağlanabilen disülfid bağlarına sahiptir. İndirgeme koşulu altında, polimerdeki disülfid (SS) köprüleri kırılır ve monomerler meydana gelir. Oksitleyici koşul altında, her monomerin tiyolleri (SH), polimeri oluşturmak için başlangıç malzemelerini çapraz

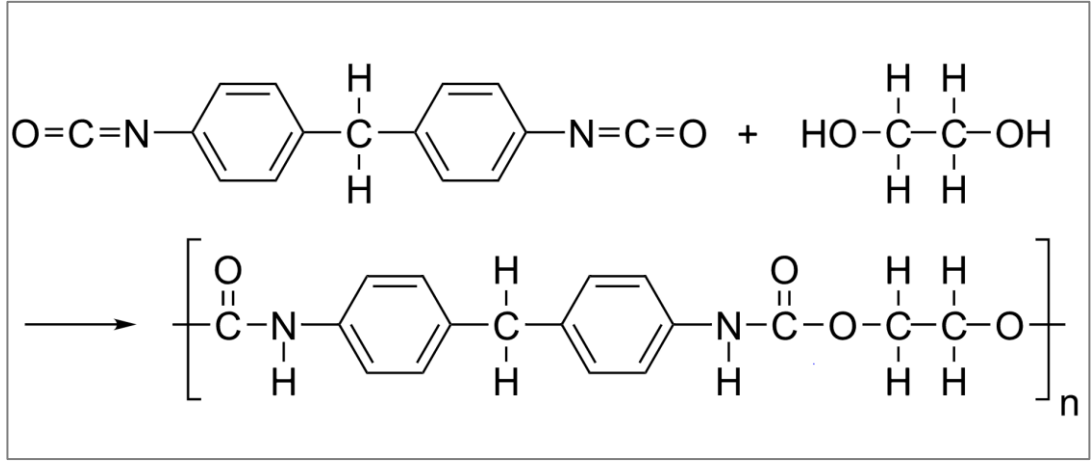
bağlayarak disülfid bağı oluşturur. Yapılan bir çalışmada poli(N-asetiletilenimin) kullanarak tiyol bazlı tersinir çapraz bağlı polimeri göstermişlerdir (Şekil 2.4) (Chujo ve ark., 1993).



Şekil 2. 4. Disülfid köprüleri ile tersinir polimer çapraz bağlanması (Chujo ve ark., 1990).

- Poliüretan Bazlı Polimerler

Yumuşak bir poli(üre-üretan) ağ (şekil 2.5), harici katalizörlere ihtiyaç duymadan oda sıcaklığında kendi kendini iyileştirme özellikleri sağlamak için aromatik disülfidlerdeki metatez reaksiyonunu kullanır. Bu kimyasal reaksiyon, doğal olarak oda sıcaklığında kovalent bağlar oluşturarak polimerin harici bir enerji kaynağı olmadan kendi kendine iyileşmesini sağlar. Elastomer molekülleri ince ayar yapılarak aralarındaki bağ daha uzun hale getirilebilir. Ortaya çıkan moleküllerin birbirinden ayrılması daha kolaydır ve oda sıcaklığında hemen hemen aynı güçle aynı bağlanma sağlanabilir (Coxworth, 2014).



Şekil 2. 5. Üretan gruplarının moleküler birimlere bağlı olduğu poliüretan sentezi (Chujo ve ark., 1990).

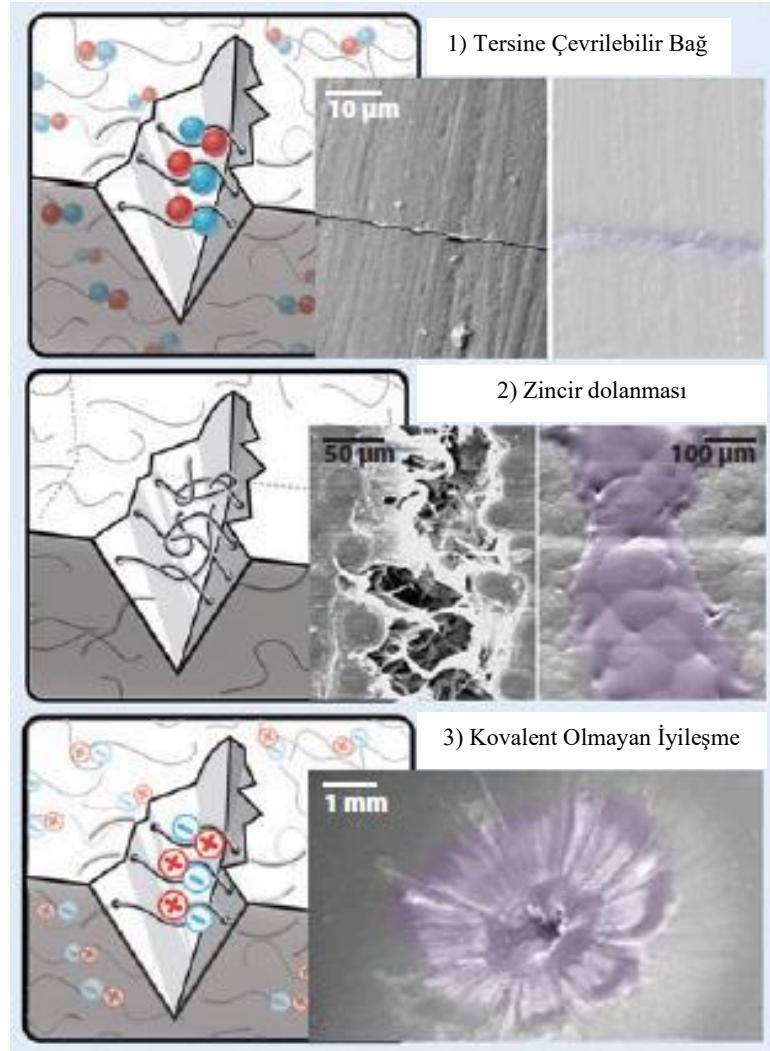
- Termoplastik Polimerler ile Kendi Kendine İyileşme

Termoset malzemelerde kendi kendini iyileştirme, eritilebilir bir termoplastik katkı maddesi eklenerek sağlanmaktadır. Kendi kendini iyileştirme, termoplastik malzemenin erimesi ve ardından hasar bölgesine dağılması, çatlığın doldurulması ve çevreleyen matris malzemesi ile mekanik olarak birbirine kenetlenmesi ile gerçekleşir (Blaiszik ve ark., 2010).

Yapılan bir çalışmada (Hayes, Zhang, Branthwaite & Jones, 2007) dağılmış bir termoplastik reçine olan lineer poli(bisfenol-A-koepiklorohidrin), bir epoksi kompozitine dahil edilmesinin delaminasyon alanını azalttığını, matris çatlamasını ortadan kaldırdığını ve termal etki sonrasında yük taşımanın kabiliyetinin geri kazandığını gözlemlenmiştir. Bu iyileşmenin tekrarlı hasar sonrasında ısı etkisiyle yeniden gerçekleşeceğini gözlemlenmiştir.

- İyonomerik Polimerler ile Kendi Kendine İyileşme

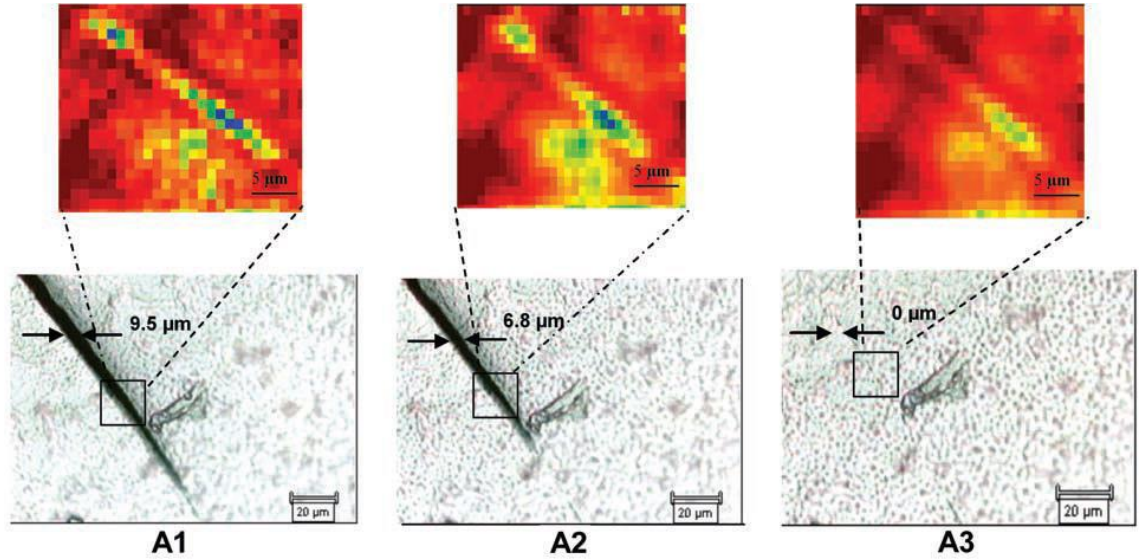
İyonomerik kopolimerler, Şekil 2.6' da gösterildiği gibi tersinir çapraz bağlar gibi davranan kümeler oluşturabilen iyonik segmentlere sahip bir malzeme sınıfıdır. Bu kümeler, sıcaklık veya ultraviyole (UV) ışınması gibi dış uyarılarla etkinleştirilebilir. Kümelerin oluşumu tersine çevrilebilir olduğundan, çoklu bölgelerde tekrarlı iyileşmeler görülmektedir.



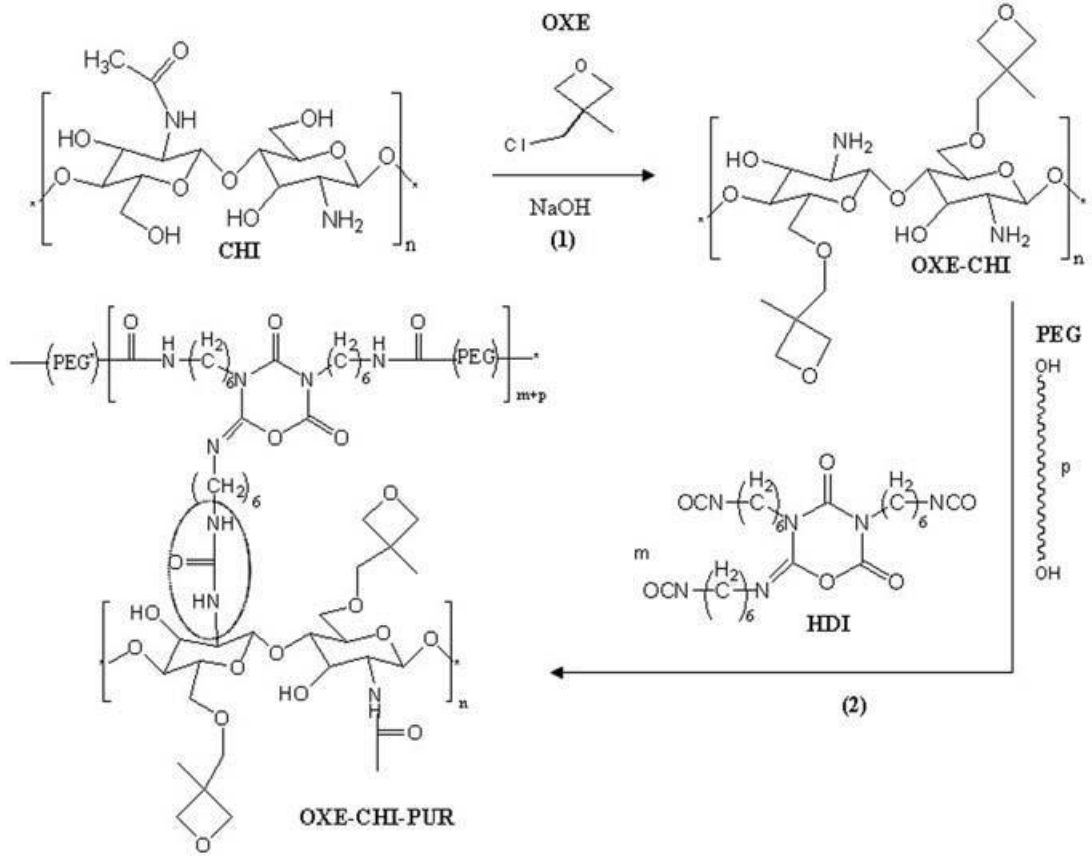
Şekil 2. 6. İyonomerik polimerler ile kendi kendine iyileşme (Akhan, 2019).

Ghosh & Urban (2009), Şekil 2.7' de gösterilen ultraviyole ışığa maruz kaldığında kendi kendini onaran poliüretan ağlarını geliştirmişlerdir (Ghosh & Urban, 2009). Ağ, iki bileşenli bir poliüretan içine ilave edilmiş bir oksetan katkılı kitosandan oluşur. Ağın mekanik hasarı üzerine, dört üyeli oksetan halkaları iki reaktif uç oluşturmak için açılır. Ultraviyole ışığa maruz kaldığında, reaktif oksetan uçlarıyla çapraz bağlar oluşturan kitosan zincir bölünmesi meydana gelir, böylece onarım sağlanır. Bu malzemeler bir saatten daha kısa sürede kendi kendine iyileşebilirler. Bu özellikleri ile birçok kaplama uygulamasında kullanılabilir. Şekil 2.8'de gösterilen sistemin reaksiyon şeması iki adımdan oluşmuştur İlk aşamada, Kitosanın birincil alkolü ile Oksetanın klorometilinin reaksiyonu ile Oxetan-Kitosan sentezlenmiştir (Wan, Creber, Peppley & Bui, 2004)

İkinci aşamada ise, (HDI) polietilen glikol (PEG) varlığında oksetan-Kitosan'ın üç işlevli heksametilen diizosiyanta dahil edilmesine yol açan reaksiyonlar gösterilmiştir.



Şekil 2. 7. Oxetane-Chitosan-Poliüretan ağlarının UV altında A1, 0 dak; A2, 15 dakika; A3, 30 dk. süresince kaydedilen IR (üst) ve optik (alt) görüntüleri (Ghosh & Urban, 2009).



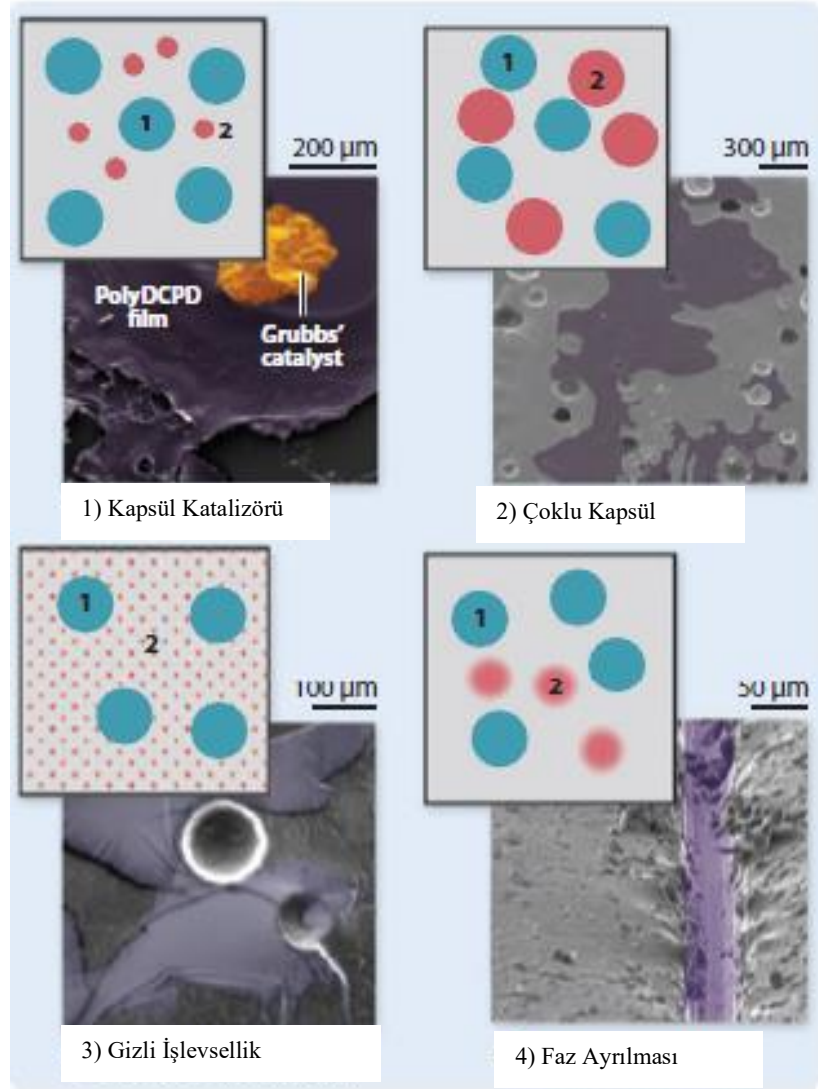
Şekil 2. 8. Oksetan-Kitosan oluşumunda yer alan adımlar, (1) Oksetanın Kitosan ile Oxetan-Kitosan öncüsünün oluşumuna yol açan reaksiyonlar. (2) Oksetan-Kitosan'ın HDI ve PEG ile reaksiyonları, yenilenebilir Oksetan-Kitosan-Poliüretan ağının oluşumu (Chujo ve ark., 1990).

2.1.3. Kapsül Bazlı Kendi Kendine İyileşen Malzemeler

Kapsül bazlı kendine kendine iyileşme mekanizmasında iyileştirici ajan kapsüllere yerleştirilir. Kapsüllerde hasar meydana gelmesiyle, iyileştirici ajanın hasar veya çatlak ortamında salınması ve reaksiyona girer. Bu esnada kendi kendini iyileştirme mekanizması tetiklenir. Meydana gelen iyileşme lokal bölgelerde meydana gelmektedir. Kırılmayan kapsüller içerisinde var olan ajanlar, yeni bir hasar sonrası tekrar iyileşme vasfı sergilemektedir (Dilaver, 2017).

Kapsül bazlı kendi kendini iyileştiren malzemeler, genel olarak sentetik polimerler ve elastomerler çeşitleri için geliştirilmiştir (Blaiszik ve ark., 2010).

Kapsül bazlı iyileşmeler farklı boyutlarda ve farklı tiplerde kapsüllerin kullanıldığı sistemlerdir. C’de, iyileştirici ajanın salınmasını ifade eden dört farklı şema görülmektedir (şekil 2.9). Birinci şemada (kapsül-katalizör), iyileştirici ajan kapsüllenmiş bir sıvıdır ve polimerleştirici, dağılmış bir katalizör fazıdır. İyi bilinen kapsül katalizör sisteminin bir örneği, disiklopentadien (DCPD)-Grubbs'ın birinci nesil katalizör sistemidir (White, Sottos, Geubelle, Moore, Kessler, Sriram, Brown & Viswanathan, 2001). Bu sistem, Grubbs katalizörü aracılığıyla DCPD'nin halkalı metatez polimerizasyonu (ROMP) temelinde çalışır. UF kapsüllü DCPD iyileştirme ajanı ve Grubbs katalizörü kullanılarak otonom olarak kendi kendini iyileşen ve iyileşme verimliliklerini ifade eden çalışmalar yapılmıştır (Brown, Sottos & White, 2002).

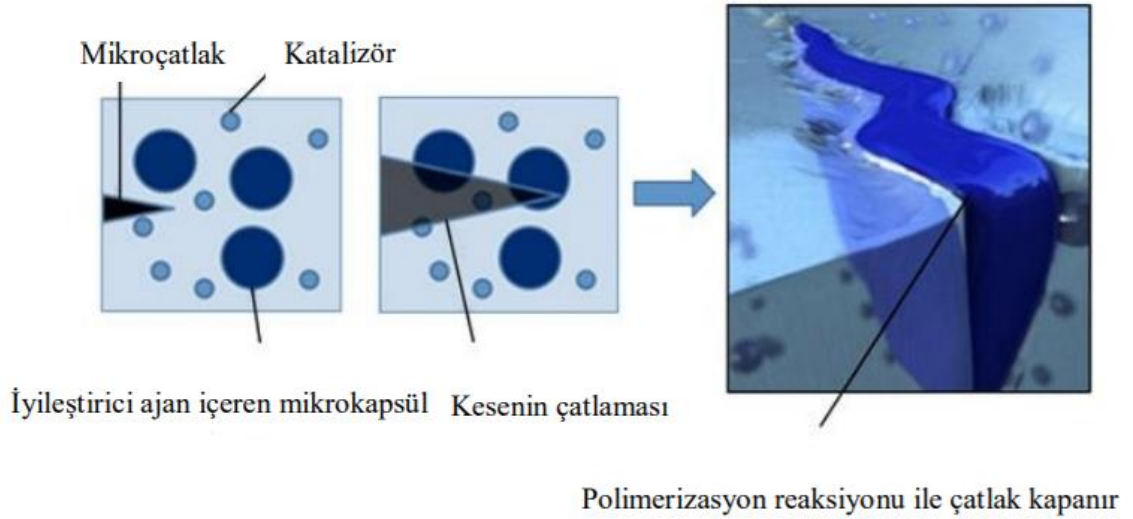


Şekil 2. 9. Kapsül Bazlı Kendi Kendine İyileşme Teknikleri (Akhan, 2019).

İkinci şemada (çoklu kapsül), hem iyileştirici ajan hem de kürleştirici kapsülendir. Bu sistem, çok sayıda farklı kapsül tipini içerecek şekilde genişletilebilen çoklu kapsül tekniği olarak bilinmektedir. İyileşmenin niteliği ve amacı doğrultusunda kapsül içerisine farklı ajanlar yerleştirilmektedir. Bu sistemde ajanlar ile aktivatör bileşenlerinin ayrılması için kapsüllerin bir kısmı aktivatör barındırmalıdır. Yapılan bir çalışmada polidimetilsiloksandan (PDMS) oluşan iki farklı kapsül tipini kullanarak elastomerik bir matriste çok kapsüllü kendi kendini iyileşebilen yapı geliştirilmiştir (Keller, White & Sottos, 2008).

Üçüncü şemada, iyileştirici ajan parçacıklar halinde kapsülendir veya dağıtılır. Aktivatör ise matris içerisinde reaktif bir uyarıcı veya çevresel bir etki halinde etkisini göstermektedir.

Kendi kendini iyileştirmeye yönelik dördüncü kapsül bazlı şemada ya iyileştirici ajan ya da aktivatör, polimerik matriste fazlar halinde bulunmaktadır.



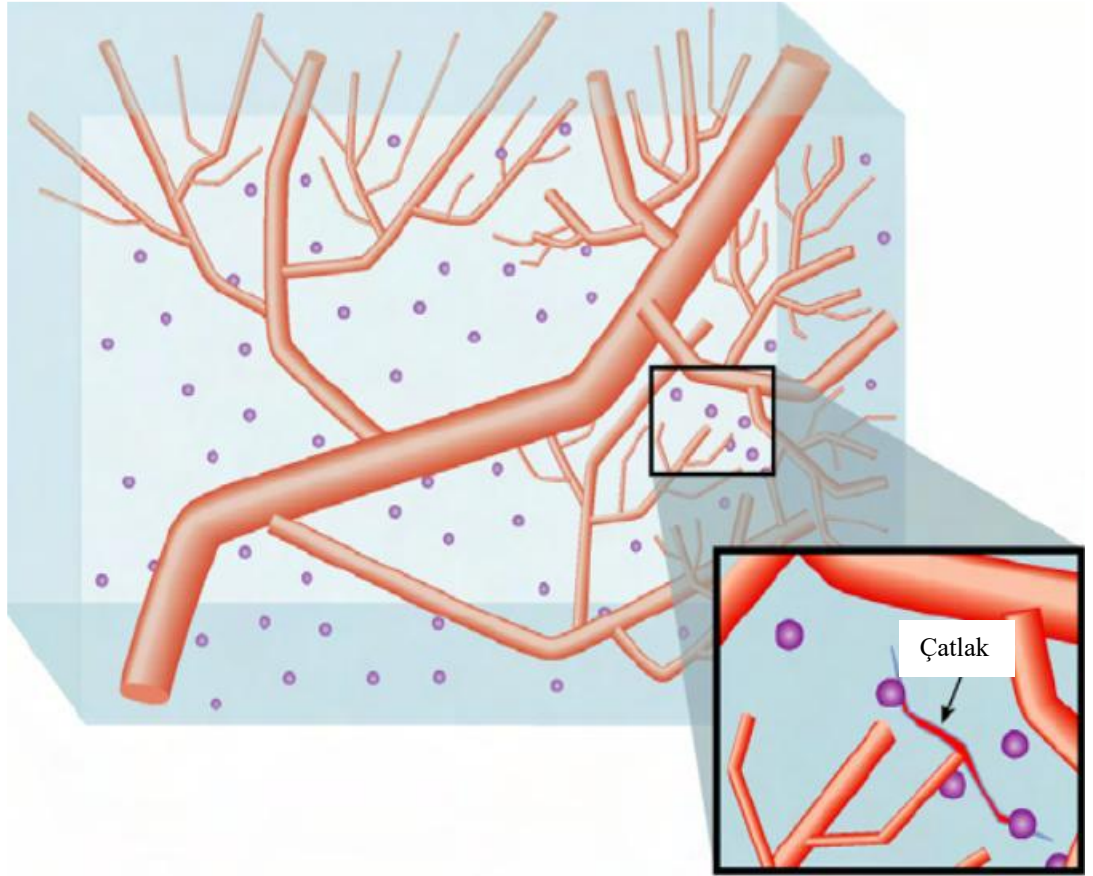
Şekil 2. 10. Kapsüller ile kendi kendine iyileşen malzemede hasar onarımı (Akhan, 2019)

Şekil 2.10 da gösterilen kapsüllerin hasara uğraması ve iyileşme mekanizmasının birçok avantajı vardır;

- Yapıda meydana gelen hasar sebebiyle kırılan mikrokapsüllerden salınan fazla iyileşme ajanlarının çapraz bağlanması sonucunda yorulma çatlaklarının oluşumu azalır.
- Bu iyileşme tekniği yüksek çapraz bağ yoğunluğuna sahip termoset malzemeler için uygulanabilir.
- Geliştirilen kapsüllerin içi farklı iyileşme ajanları ile doldurulabilir. Böylece farklı matrisler için uygun iyileştirme mekanizması oluşturulabilir.

2.1.4. Vasküler kendi kendine iyileşen malzemeler

Son yıllarda çok boyutlu bağlantıya sahip gömülü bir vasküler ağ tarafından hasara uğrayan yapılarda kendi kendine iyileşmeler sağlanmaktadır. İyileşme ajanları ağ yapısı veya içi boş kanallar içerisine hapsedilmektedir. Şekil 2.11’de şematik olarak damar iyileşmesi olarak adlandırılan iyileşme mekanizması görülmektedir.

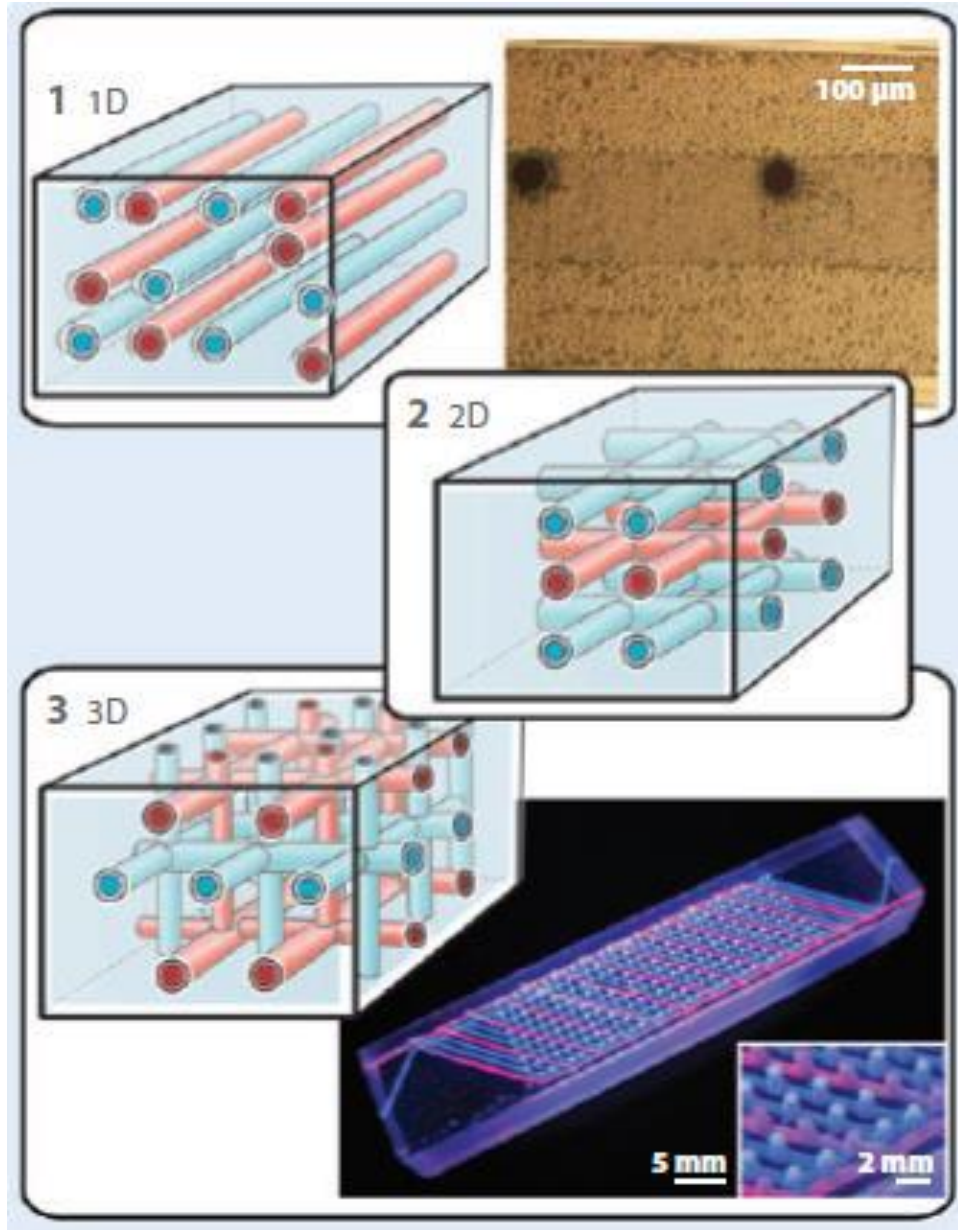


Şekil 2. 11. Vasküler ağ yapısı ve iyileşme mekanizması (Akhan, 2019).

Bu vasküler kendi kendini iyileştirme sürecinde şekil 2.12’ de gösterilen iki ana teknik bulunmaktadır. Kendi kendini iyileştirmeye yönelik bu ağ yapıları aşağıda verilmiştir (Blaiszik, Kramer, Olugebefola, Moore, Sottos & White, 2010).

1- İçi boş cam tüpler ve cam elyaflar

2-Üç boyutlu miskovasküler ağlar



Şekil 2. 12. Vasküler kendi kendine iyileşen malzemeler (Akhan, 2019).

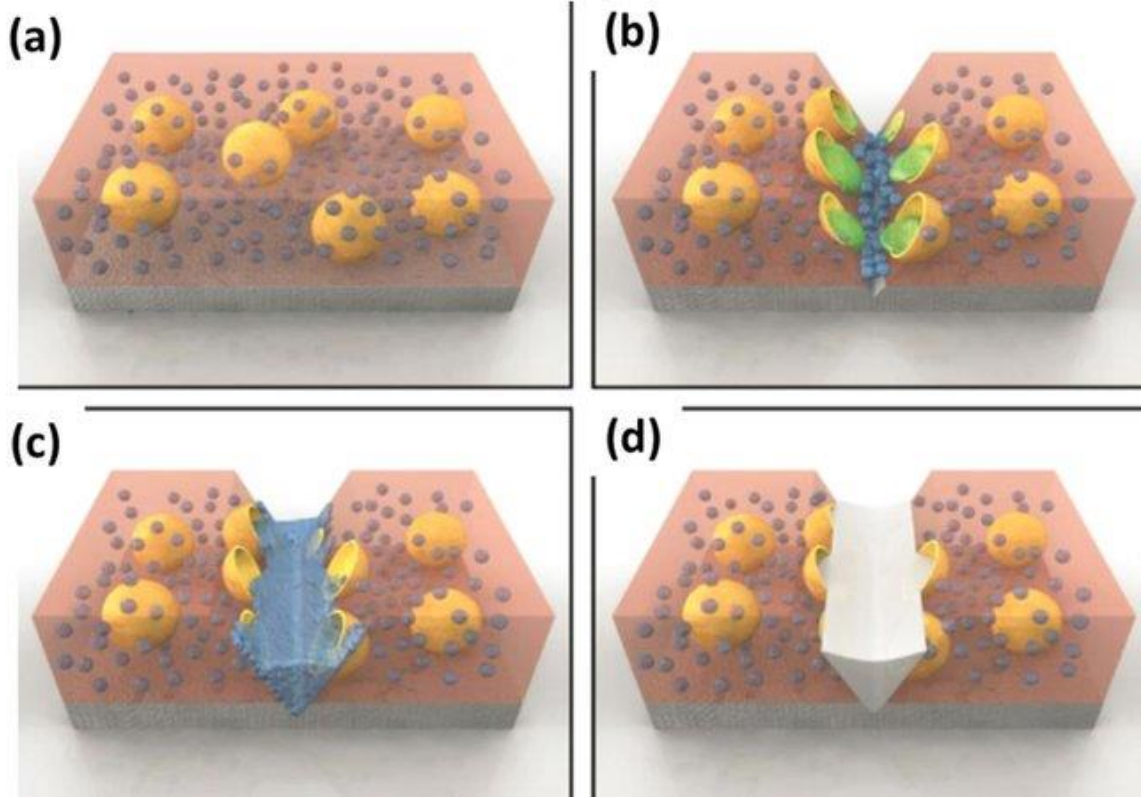
Vasküler sistem farklı boyutlarda karşımıza çıkmaktadır. 1D boyutlu geliştirilen yapılar basit çözümler olarak dikkat çekmektedir ve tekrarlı iyileşmelere olanak sağlayamamaktadır. 2 ve 3 boyutlu sistemler ise, ağ yapıları banlara örnek gösterilebilir. Tekrarlı hasarların iyileşmesine olanak sağlayabilir.

Vasküler yöntemin avantajları aşağıdaki gibi verilebilir:

- Bu yöntem ile mikrokapsül yöntemine göre daha fazla iyileştirici ajan depolanabilir ve böylece büyük boyutlu hasarların onarımı yapılabilir.
- Fazla miktarda depolanan ajanlar ile belirli bir alanda tekrarlanan hasarın iyileşme potansiyeli yüksektir.
- Kanallar rastgele olabilecek çatlakların onarımı için yüzeyin altında homojen şekilde yayılmaktadır.
- Yapı içerisindeki kılcallar ağ şeklinde yayılmaktadır. Böylece hasar oluşan bölgede birden fazla yerde onarım başlayabilir ve daha hızlı bir iyileşme görülür.

2.1.5. Kendi kendine iyileşen kaplamalar

Kendi kendine iyileşen kaplamalar, bir malzemenin yüzey özelliklerinin korunmasına ve kullanım ömrünün artırılmasına katkı sağlamaktadır. Yapı yüzeyinin maruz kaldığı çevresel etkilerden kaynaklı hasar giderilmektedir. Şekil 2.13' de gösterilen hasar meydana geldiğinde (genellikle mikro çatlaklar şeklinde), su ve oksijen gibi çevresel elementler kaplamanın içinden geçebilir ve malzeme hasarına veya arızaya neden olabilir. Kaplamalardaki mikro çatlaklar, sırasıyla, kaplamanın mekanik bozulmasına veya delaminasyonuna veya fiber takviyeli kompozitlerde ve mikro elektronikte elektrik arızasına neden olabilir. Hasar küçük ölçekte olduğundan, onarım genellikle zor ve maliyetlidir. Bu nedenle, kendini iyileştirebilen bir kaplama otomatik olarak geri kazanılan özellikler (mekanik, elektriksel ve estetik özellikler gibi) ile faydalı olabilir ve böylece kaplamanın ömrünü uzatabilir.



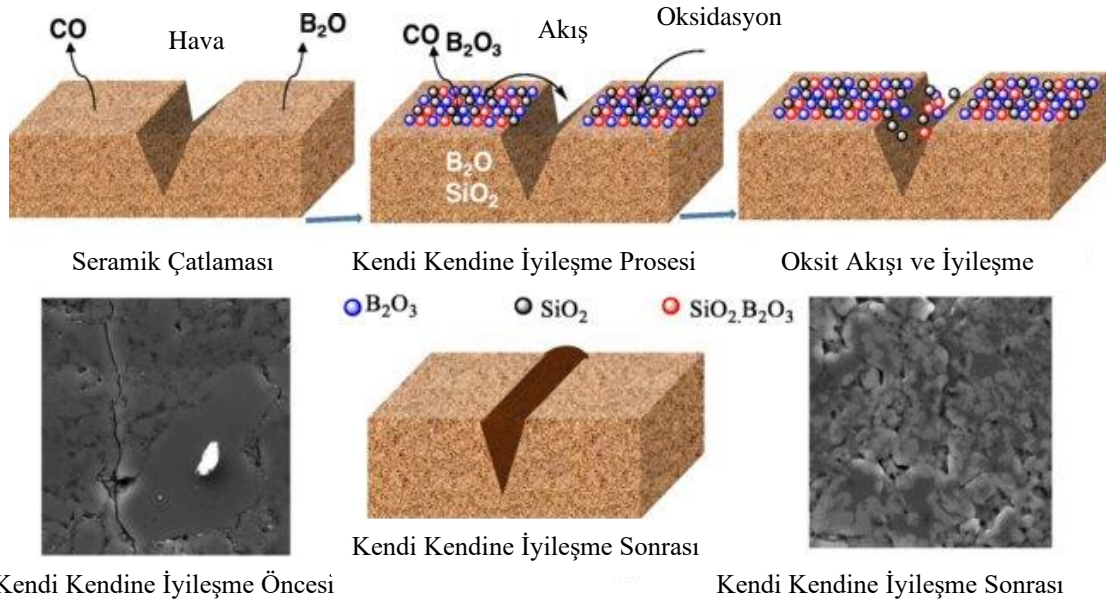
Şekil 2. 13. Kendi kendine iyileşen kaplamalar; a) Hasar öncesi, b) Kapsüllerin hasara uğraması, c) İyileşme evresi, d) İyileşmenin tamamlanması. (Lan, Nunez & Polycarpou, 2020)

2.1.6. Kendi kendine iyileşen seramikler ve metaller

Seramikler yüksek sıcaklıklarda metallere göre daha kullanışlı malzemelerdir. Fakat daha kırılğan ve tok olan seramikler, kullanıldıkları alanlarda yapısal bütünlük ve güvenilirlik açısından çok tercih edilmezler. Şekil 2.14’ de gösterilen seramikler arasında faz seramikleri, içsel bir iyileştirme mekanizmasıyla çatlak hasarını otonom olarak iyileştirebilir. Aşınma veya termal stresin neden olduğu mikro çatlaklar, havaya yüksek sıcaklık maruziyeti sırasında genellikle A elementi olan max faz bileşenlerinden oluşan oksitlerle doldurulur (Yang, Pei, Rao & De Hosson, 2012). Meydana gelen çatlak dolumu Ti_3AlC_2 için havada 1200 °C’de oksidasyon ile meydana gelmiştir. Ti_2AlC ve Cr_2AlC uygun şartlar altında iyileşme performansı sergilemiştir. Bu süreç iyileşme elementlerinin tükenmesine kadar tekrarlanabilmektedir ve max fazlarını, tek çatlak

boşluğu doldurma için harici iyileştirme ajanları (dışsal iyileştirme) gerektiren diğer kendi kendini iyileştiren malzemelerden ayırır. Doldurucu oksite bağlı olarak, yerel mukavemet gibi başlangıç özelliklerinde iyileştirme sağlanabilir (Farle, Kwakernaak, Van Der Zwaag & Sloof, 2015).

Mullit, alümina ve zirkonya normal şartlarda iyileşme yeteneğine sahip değildir. Ancak matris içerisine ikinci faz bileşenleri yerleştirilerek kendi kendini iyileştirme yetenekleri kazandırılabilir. Hasar bölgesinde, bu parçacıklar oksijene maruz kalır ve ısı varlığında, hacim genişlemesi altında çatlak boşluğunu dolduran yeni malzemeler oluşturmak üzere reaksiyona girerler (Ghosh, 2008).



Şekil 2. 14. Kendi kendine iyileşen seramikler (Long, Wu, Shao, Wang X.& Wang Y., 2021)

Metaller, uzun süreler boyunca yüksek sıcaklıklara ve orta düzeyde gerilmelere maruz kaldıklarında, hasarın oluşumu ve büyümesinden kaynaklanan sürünme kırılması meydana gelir. Bu kusurlar, sonuçta içyapıda olumsuzluklara neden olan çatlaklarda birleşir. Erken aşamadaki hasarın kendi kendini iyileşmesi, metalik bileşenlerin ömrünü

uzatmak için umut verici yeni bir yaklaşımdır. Metallerde, yüksek erime noktaları ve sonuç olarak düşük atom hareketliliği nedeniyle, kendi kendini iyileştirme, diğer birçok malzeme sınıfına göre daha zordur. Genel olarak, metallerdeki hasarlar, kusur bölgelerinde çökeltilerin oluşumuyla iyileştirilir. Çeliklerdeki sürünme hasarının iyileşmesine yönelik çalışmalar, sürünme boşluğu yüzeyinde Cu veya BN' nin dinamik çökmesi ile meydana gelmektedir (Laha, Kyono, Kishimoto & Shinya, 2005). Küre şeklindeki Cu çökeltilerinin büyük bir kısmı matris ile aynı anda oluşturulduğundan, Cu çökmesi deformasyon kaynaklı kusurlar için zayıf niteliktedir. Son zamanlarda, altın atomları Fe bazlı alaşımlarda oldukça etkili iyileştirici ajanlar olarak kabul edildi (Zhang, Kohlbrecher & Langelaan, 2013).

Kendi kendini iyileştirme değerlendirilirken, farklı parametrelerin göz önünde bulundurulması gerekir. İyileşme mekanizmalarına göre bu parametreler farklılık göstermektedir. Malzemenin tolere edebileceği tekrarlı iyileşme miktarı, uyarıcı türü, iyileşme süresi ve iyileşme derecesi, iyileşmesi beklenen malzemenin kimyasal ve özgül değerleri örnek olarak gösterilebilir. Ayrıca kopma uzaması, çekme modülü, yorulma direnci, renk ve şeffaflık gibi mekanik ve fiziksel özellikler de dikkate alınmalıdır. Belirli bir malzemenin kendi kendini iyileştirme yeteneği, genellikle, kendi kendini iyileştirme etkinliği olarak adlandırılan, hasar görmemiş malzemeye göre belirli bir özelliğin geri kazanılması dikkate alınır.

Kendi kendini iyileştirme etkinliği, denklem 1' de gösterilen hasar görmemiş (virgin) numune (f_{virgin}) için elde edilen ilgili deneysel değer ile iyileşmiş numune (healed) karşılaştırılarak ölçülebilir (Blaiszik ve ark., 2010).

$$\eta = \frac{f_{healed}}{f_{virgin}} \quad (2.1)$$

Bu tanımın dışsal kendi kendini iyileştiren materyallerle ilgili bir varyasyonunda, iyileştirme etkinliği, iyileştirici ajanın sağladığı katkıyı dikkate alır. Buna göre, iyileşmiş

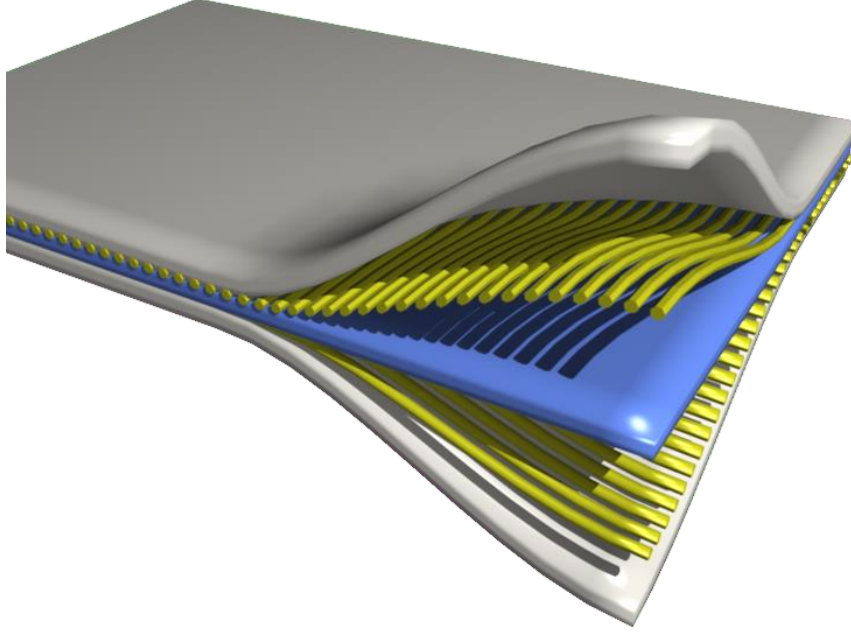
numunenin özelliği, iyileşmemiş (denklem 2) kendi kendini iyileştiren ajanla donatılmış hasarsız bir numuneyle karşılaştırılır.

$$\eta = \frac{f_{healed}}{f_{non-healed}} \quad (2.2)$$

Literatürde yer alan mikro hasarların iyileştirilmesinin aksine makro boyutlu hasarlar ve iyileşmeler hedef alınmıştır. Yaklaşık 3 mm çapındaki makro küreler geliştirilmiştir. Bu kürelerin içleri farklı kullanım amaçları doğrultusunda iyileşme ajanları ile doldurulmuştur. İlk olarak, epoksi reçine ve kürleştirici ajanlar ile doldurulmuştur. Sonrasında geometrik iyileşen ajanlar ve sonrasında kendi kendine ultra hızlı iyileşen yapı geliştirilmiştir. Hasar sonrası kırılan makro kürelerin matris içerisindeki boşluklara sızarak, istenilen amaca uygun iyileşmeler elde edilmiştir. İyileşme performansları deneysel, görsel, spesifik karakterizasyonlar ile tespit edilmiştir. Ayrıca deneyler esnasında absorbe edilen enerji miktarları ve makro kürelerin bu enerji miktarlarına katkısı deneysel olarak belirlenmiştir.

2.2. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzeme, bir başka ifade ile birleşim malzemeleri birbirlerinden farklı fiziksel veya kimyasal özelliklere sahip iki veya daha fazla malzeme ile geliştirilen yapılardır (Şekil 2.15).



Şekil 2. 15. Katmanlı Kompozit Yapı (Lan ve ark., 2020).

Kompozit malzeme yapıları genellikle iki gruba ayrılır; matris ve takviye malzemesi. Bu malzemeler birbirlerinden farklı fiziksel özelliklere sahiptirler ve bir araya getirilmeleri ile oluşan kompozit malzemenin özellikleri her ikisinden farklıdır. Bu iki grup içerisinde takviye malzemesi taşıyıcı görev üstlenir. Takviye elemanlarının etrafını saran matris malzemesi ise takviye elemanlarını bir arada tutmaya ve destekleme görevini üstlenir. Çok eskilerde kullanılan kerpiç, evlerin ana malzemesi olan toprağa karıştırılan saman malzemesi de ayrı bir takviye malzemesidir. Matris malzemesi, bütünleştiren malzeme anlamına gelmekte olup, kullanıldığı malzemenin yekpare davranışını artırmaktadır.

Günümüzde en çok kullanılan kompozit malzemelerden biri inşaat sektöründe sıklıkla kullanılan beton yapılarıdır. Çimento ve kumdan meydana gelen malzeme fiber olarak çelik çubuklar ile beslenerek kompozit bir yapıya dönüştürülür. Yakın dönemde yaygınlaşmış polimer kompozit yapılar otomotiv, savunma sanayi, havacılık ve uzay sanayi gibi hafiflik ve dayanımın ön planda olduğu alanlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Matris malzemesi olarak farklı özelliklerde polimerler kullanılırken,

takviye malzemesi olarak da organik ve inorganik elyaflar tercih edilmektedir. Bu elyaflara örnek olarak karbon, polipropilen, aramid, kevlar, polietilen ve cam elyaflar gösterilebilir. Farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip bu malzemelerin bir arada uyum içerisinde davranış sergilemesi yapısal bütünlük açısından önemlidir. Sağladıkları hafifliğin yanı sıra mekanik değerlerinde artırılması beklendiğinden elyaf ile matris arasındaki arayüzey uyumu önem arz etmektedir.

2. 2. 1. Kompozit malzemelerin temel bileşenleri

➤ Matris Malzemeler

Kompozit yapılarda matris malzemesinin ana görevi; takviye elemanlarını bir arada tutarak, yükü takviye elemanına dağıtmak ve takviye elemanını fiziksel ve kimyasal etkilerden korumaktır. İdeal bir matris malzemesi ilk formunda düşük viskoziteli olabilir. Kompozit matris malzemesi olarak kullanıldığında ise takviye elemanlarını sağlam ve uygun bir şekilde çevreleyebilecek katı forma geçebilmelidir (Asi, 2008).

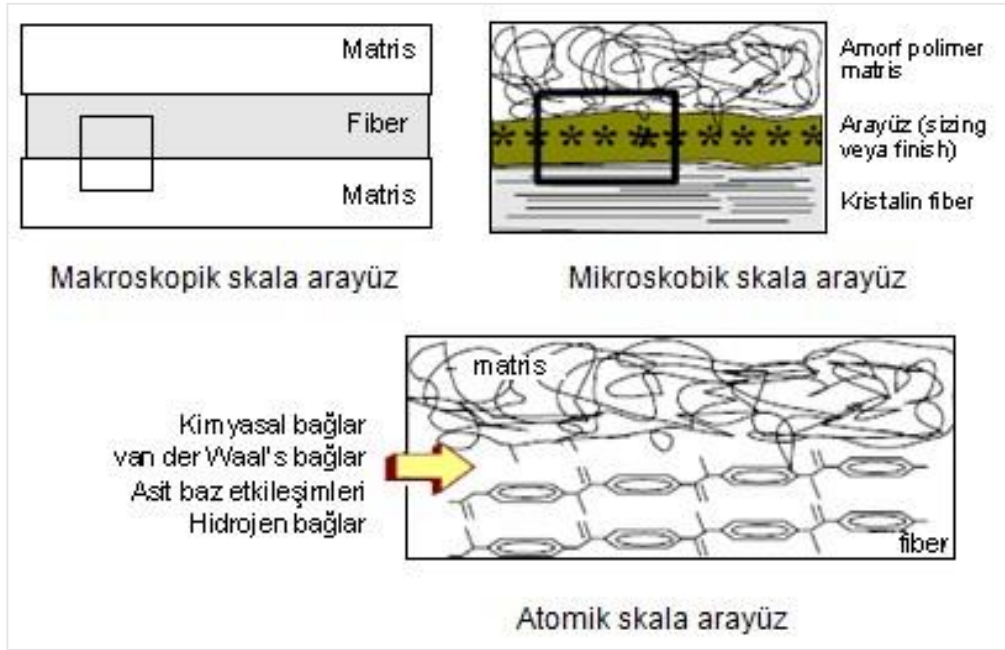
Kompozit malzeme içerisinde matris malzemesinin görevleri aşağıda belirtilmiştir. (Özer, 2015).

- Matris malzeme takviye elemanlarını bir arada tutarak hareket etmelerini engeller.
- Kompozit malzemeye etkiyen dinamik ve statik yüklerin takviye elemanlarına yani fiberlere eşit şekilde dağıtılmasını sağlar.
- Matris malzeme, kompozit malzemenin genel geometrisini belirler ve katı formda kalmasını sağlar.
- Çevresel etkilerden meydana gelebilen fiziksel ve kimyasal zararlara karşı kompozit malzemeyi korur.

➤ Takviye Malzemeler

Takviye elemanının görevi, matris malzemesini güçlendirerek, oluşan kompozit yapının mukavemetini artırmaktır. Takviye elemanı, kompozit malzemenin üzerine gelen yükün büyük çoğunluğunu taşımaktadır. Yükün takviye elemanına iletilebilmesi için matris ve takviye elemanın ara yüzeyinde iyi bir uyum olmalıdır. Kompozit malzemedeki kalıcı yapısal gerilmeler ve buna bağlı olarak delaminasyonlar oluşmaması için, takviye elemanı ile matris elemanının ısı genleşme katsayıları birbirine yakın olmalıdır.

Takviye elemanlarından, yüksek elastisite modülü, yüksek mukavemet, düşük yoğunluk, fiziksel uyum, üretim kolaylığı ve ısı direnç gibi özellikler istenmektedir (İşlek, 2020). Kompozit malzemelerde, matris ve takviye elemanları arasında fiziksel, kimyasal veya mekanik olarak etkileşim gösteren, gerilimi matristen takviye elemana transfer eden bir ara yüz bulunmaktadır (Şekil 2.16). Bu ara yüzde istenilen uyum görülmezse kompozit mekanik sınır değeri matris malzemesinin dahi aşağısında kalabilir. Verimli bir kompozit yapı elde etmek için fazların bir araya gelip yüzey arasında bağlanmaları gerekir.



Şekil 2. 16. Kompozit malzeme arayüzü (Beşergil, 2016).

2. 2. 2. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması

Kompozit malzemelerin takviye ve matris elemanının özelliklerine göre sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırma şekil 2.17' de gösterilmiştir.



Şekil 2. 17. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması

➤ Matris malzemesine göre kompozit malzemeler

Kompozit malzemeler kullanım alanları ve üretim tekniklerine göre metal, seramik ve polimer matrisler olarak sınıflandırılmaktadır.

Metal matrisli kompozit malzemeler; çekirdek yapıları metal ve/veya metal alaşımına sahip kompozitlerdir. Bu yapılarda metal matris içerisine gömülen takviye elemanları, farklı geometrik yapıda olabilir. Metal matrisli kompozit malzemeler takviye edildikleri malzemelere ve kullanım alanlarına bağlı olarak üstün mekanik özellikler gösterebilmektedir.

Seramik malzemeler, yüksek sıcaklığa dayanıklı ve hafif yapılardır. Bu nedenle seramik matrisli kompozit malzemeler genellikle yüksek sıcaklıkta parçaları için tercih edilir.

Ancak sert ve kırılğan malzemelerdir. Çok düşük süneklik ve tokluk özellikleri gösterirler. Bu nedenden dolayı termal şoklara karşı da dayanıksızdırlar. Genellikle liflerle takviye edilirler. Farklı dolgu malzemeleri ile takviye edilerek yüksek elastisite modülü ve çalışma sıcaklıklarına ulaşan yapılar geliştirilmektedir. (Kaya, 2016).

Polimer matrisli kompozitler, rijitlik, dayanım, darbe özellikleri, aşınma dayanımı vb. üstün özelliklerinden dolayı uçak sanayii, inşaat mühendisliği, gemi ve otomobil endüstrisi gibi birçok mühendislik uygulamalarında tercih edilen malzeme türleri arasındadır (Asi, 2008).

Kompozitlerde kullanılan polimer matrisler, termoplastik ve termoset olmak üzere ikiye ayrılır. Bu iki matris malzeme arasındaki temel farklar Çizelge 2.1’de gösterilmiştir:

Çizelge 2.1. Termoset ve termoplastik malzemelerin genel özelliklerinin karşılaştırılması. (Hayırkuş, 2021)

| TERMOSETLER | TERMOPLASTİKLER |
|--|--|
| Düşük gerinmelerde kopar. | Yüksek gerinmelerde kopar. |
| Raf ömrü sınırlıdır. | Raf ömrü uzundur. |
| Yapışkandır. | Yapışkan değildir, kullanımı kolaydır. |
| Kürleşme süresi uzundur. | Proses zamanı kısadır. |
| Üretim sıcaklığı düşüktür. | Üretim sıcaklığı ve viskozitesi yüksektir. |
| Çözücü direnci çok kötüdür. | Çözücü direnci mükemmeldir. |
| Isı altında bozular, geri dönüşüm yoktur. | Isıtma ve basınçta yumuşar, geri dönüşüme uygundur. |
| Örnek: Epoksi, Melamin, Bakalit, Silikon, Poliüretan (PUR) | Örnek: Poliamid (PA), Polikarbonat (PC), Polipropilen (PP), Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS), Polivinil Klorür (PVC) |

➤ Takviye malzemesine göre kompozit malzemeler

Takviye elemanlarının özelliklerine göre kompozit malzemeler üç ana başlık altında sınıflandırılmaktadır:

1. Elyaf takviyeli kompozit malzemeler
 - Sürekli elyaf takviyeli kompozit malzemeler
 - Süreksiz (kesikli) elyaf takviyeli kompozit malzemeler
 - Rastgele süreksiz elyaf takviyeli kompozit malzemeler
 - Yönlendirilmiş süreksiz elyaf takviyeli kompozit malzemeler
2. Parçacık takviyeli kompozit malzemeler
 - Büyük parçacık takviyeli kompozit malzemeler
 - Küçük parçacık takviyeli kompozit malzemeler
3. Yapısal kompozit malzemeler
 - Tabakalı kompozitler
 - Sandviç kompozitler

Kompozitlerde parçacık takviyesi, yapının mekanik özelliklerine elyaf takviyesinden daha az etki etmektedir. Genel olarak sertlik değerinde artış elde eder. Aynı zamanda mukavemet ve tokluk değerlerinde bir miktar artış meydana gelebilir. Parçacık takviyesi kullanıldıkları yapının üretim maliyetlerinin azalmasına katkı sağlamaktadır. (Hayırkuş, 2021)

Günümüzde çok çeşitli elyaf malzemeleri bulunmaktadır. Yüksek özgül mukavemet değerleri ve düşük ısı dirençleri sebebiyle en çok bilinen ve tercih edilen elyaf malzemelerinden biri cam elyaflardır. Bor elyaflar, karbon elyaflar, aramid elyaflar vb. diğer sık kullanılan elyaf malzemeleridir (Özer, 2015).

Çizelge 2.2’de elyaf malzemelerinin mekanik özellikleri verilmiştir:

Çizelge 2. 1. Bazı elyaf malzemelerin mekanik özellikleri (Aksoylu, 2007).

| ELYAF | Yoğunluk (Mg.m⁻³) | Elastisite Modülü (GPa) | Poisson Oranı | Çekme Gerilmesi (GPa) |
|----------------------|---|------------------------------------|--------------------------|----------------------------------|
| SiC | 3 | 400 | 0,2 | 2,4 |
| Bor | 2,6 | 400 | 0,2 | 4 |
| HM karbon | 1,95 | eksenel 380 - radyal 12 | 0,2 | 2,4 |
| HS korbon | 1,75 | eksenel 230 - radyal 20 | 0,2 | 3,4 |
| E-cam | 2,56 | 76 | 0,22 | 2 |
| Nicalon | 2,6 | 76 | 0,2 | 2 |
| Saffil | 3,4 | 300 | 0,26 | 2 |
| Selüloz | 1 | 80 | 0,3 | 3 |

İnce ve tek yönlü polimer matrisli elyaf takviyeli yapıya genellikle lamina katmanları denilmektedir. Tabakalı kompozit malzemeler ise bu katman veya laminaların istenilen düzlem ve açılarda üst üste yerleştirilmesi ile laminat oluşturulmuş halidir. Kompozit yapının elastik özelliklerinin belirlenebilmesi için, her bir katmanda/tabakada elyaf yönelmesi ve hacim oranı üniform olmalıdır (Hayırkuş, 2021).

2.2.3. Termoplastik kompozit malzemeler

Termoplastik malzemeler ısıtılarak şekil verilebilir hale geçen, soğutulduklarında ise katılaşsalar dahi tekrar ısıtıldıklarında yine şekillendirilebilen plastik malzemelerdir. Termosetlerin aksine, ısıtma ve soğutulma işlemleri sırasında sadece fiziksel değişim meydana gelir. Bu özellikleri ile geri dönüştürülebilir malzeme sınıfları arasında yer almaktadır (Paksoy, 2008).

Günümüzde hafif yapılara yönelik endüstriyel alanlarda uygulamalar arttırılmak istenmektedir. Bunun yanı sıra yüksek mekanik değerlere ve düşük maliyetli malzemelere

olan ilgi giderek artmaktadır. Bu noktada termoplastik kompozitler, metal ve termoset malzemelerden daha hafif bir yapıya sahip oldukları için otomotiv ve havacılık sanayisinde sıklıkla tercih edilmektedir. Termoplastik matrisli kompozitler, termoset kompozitler gibi yüksek mekanik özellikler göstermektedir. Ayrıca üstün kimyasal dirence sahiptirler ve maliyetleri de daha uygundur. Polipropilen, polietilen, poliamid, poliformaldehid, termoplastik poliüretan vb. birçok uygulamada tercih edilen başlıca termoplastik matris malzemeleridir. Bu matris malzemeler cam ve karbon gibi çeşitli fiberlerle takviye edilirler. Takviye malzemesi ile matris malzemesi arasında tercihen özel uyumlaştırıcı ilaveler kullanılmaktadır.

Bu termoplastik matris malzemeleri arasından PP (polipropilen); düşük fiyatı, yorulma direnci, özgül mukavemeti üstün kimyasal direnci ile sıklıkla tercih edilmektedir. Günümüzde homopolimer, blok-kopolimer ve rasgele-kopolimer olmak üzere PP' nin üç temel çeşidi kullanılmaktadır (Baydar, Bekem, Doğu, Gemici & Ünal, 2012).

Tüm bu avantajlarının yanında termoplastikler iki temel dezavantaja sahiptir. Bu dezavantajlar, üretimin esnasında uygun ısı ve basınca ihtiyaç duyulduğundan donanımsal gereklilik ve fiberlerin ıslanması için termoplastik malzemelerin uygun viskosiye ulaşmasının zorluğudur.

Termoplastik kompozit malzemeler, sürekli takviyeli kompozitler ve süreksiz fiber takviyeli kompozitler olarak ikiye ayrılır. Sürekli fiber takviyeli kompozit malzemelerin üretim teknikleri arasında termo şekillendirme, şerit sarma, basınçlı döküm, otoklav ve diyafram şekillendirme yer almaktadır. Süreksiz fiber takviyeli termoplastik kompozitlerde ise enjeksiyonla döküm ve üfleli döküm teknikleri kullanılmaktadır (Özer, 2015).

➤ **Termoplastik Kompozit Malzemelerin Mekanik Özellikleri**

Termoplastik kompozit malzemeler, mühendislik termoplastikler ve genel amaçlı termoplastikler olarak ikiye ayrılırlar. Çizelge 2.3 ve 2.4'te bu termoplastiklerden bazılarının mekanik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2. 2. Genel amaçlı termoplastiklerin bazı özellikleri (Smith, Hashemi & Presuel-Moreno, 2019).

| Malzeme | Yoğunluk | Çekme Dayanımı | Darbe Dayanımı (Izod) | Dielektrik Gücü | Maksimum Kullanım Sıcaklığı (Yüksüz) |
|-------------------------------------|----------------------|-----------------------|------------------------------|------------------------|---|
| | (g/cm ³) | (MPa) | (J/m) | (V/mm) | (°C) |
| Polietilen (düşük yoğunluk) | 0,92-0,93 | 6,2-17,2 | | 18912 | 82-100 |
| Polietilen (yüksek yoğunluk) | 0,95-0,96 | 20-37,2 | 21,35-747,3 | 18912 | 80-120 |
| Bükülmez PVC | 1,49-1,58 | 51,7-62,1 | 53,38-298,9 | | 110 |
| Genel maksatlı PP | 0,90-0,91 | 33-38 | 21,35-117,4 | 25610 | 107-150 |
| Stiren akrilonitril (SAN) | 1,08 | 69-82,8 | 21,35-26,69 | 69935 | 60-104 |
| Genel maksatlı (ABS) | 1,05-1,07 | 40,7 | 320,28 | 15169 | 71-93 |
| Genel maksatlı akrilik | 1,11-1,19 | 75,9 | 122,7 | 17730-19700 | 54-110 |
| Selüloz, asetat | 1,2-1,3 | 20,7-55,2 | 133,45-213,52 | 9850-23640 | 60-104 |
| Plitetrafloretilen | 2,1-2,3 | 6,9-27,6 | 64,05-362,98 | 15760-19700 | 288 |

Çizelge 2. 3. Mühendislik amaçlı termoplastiklerin bazı özellikleri (Hayırkuş, 2021).

| Malzeme | Yoğunluk | Çekme Dayanımı | Darbe Dayanımı | Dielektrik Gücü | Maksimum Kullanım Sıcaklığı (Yüksüz) |
|----------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|---|
| | (g/cm ³) | (MPa) | (J/m) | (V/mm) | (°C) |
| Naylon 6.6 | 1,13-1,15 | 62,1.-82,8 | 106,76 | 15169 | 82-150 |
| Poliasetat | 1,42 | 69 | 74,73 | 12608 | 90 |
| Polikarbonat | 1,2 | 62,1 | 640,56-854,08 | 14972 | 120 |
| Polyester (PET) | 1,37 | 71,7 | 42,7 | | 80 |
| Polyester (PBT) | 1,31 | 55,2-56,5 | 64,05-69,39 | 23246-27580 | 120 |
| Polifenilen oksit | 1,06-1,10 | 53,8-66,2 | 266,9 | 15760-19700 | 80-105 |
| Polisülfon | 1,24 | 70,3 | 64,05 | 16745 | 150 |
| Poliefenilen sülfür | 1,34 | 69 | 16,01 | 23443 | 260 |

2.2.4. Sürekli elyaf takviyeli kompozit malzemeler

Sürekli lifler, kontrollü anizotropileri, düşük yüzey boyutu (düşük çapları) ve minimal kusurları nedeniyle mukavemet ve sertlik gibi özelliklerde genellikle yüksek değerlere ulaşan liflerdir. Sürekli elyaf takviyeli kompozitlerde yapı üzerine gelen yükler, çoğunlukla yükün yönlendirilmiş elyaflar tarafından taşınmaktadır. Sürekli elyaf

takviyeler yapı içinde genellikle lif demetleri, yönlendirilmiş kumaşlar, farklı desenlerde örülmüş kumaşlar kullanılmaktadır.

Kompozit malzemenin dayanımını belirleyen ana faktör elyafların matris içindeki yönelimleridir. Boylamasına yapılan dizilimlerde, kompozit üzerine gelen yük elyaflar ile aynı yönde olduğunda en yüksek dayanım değerleri elde edilir. Yük, elyaflar ile aynı doğrultuda olmadığında, bir miktar farklı açıda olması bile, yapının mukavemetinde düşümlere neden olur (Hayırkuş, 2021).

Sürekli elyaf takviyeli kompozitlerde elyaf takviyesi 3 farklı temelde ele alınır. Sürekli elyaf kullanılarak geliştirilen yapılar içerisindeki elyaf yönelimleri farklı yönde gelebilecek etkilere karşı kompozit yapıda hayati öneme sahiptir. Sürekli elyaf takviyeli kompozit malzemelerde elyaf yönelimleri Çizelge 2.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 2. 4. Elyaf yönelimlerinin gösterilmesi (Yerleşen, 2015).

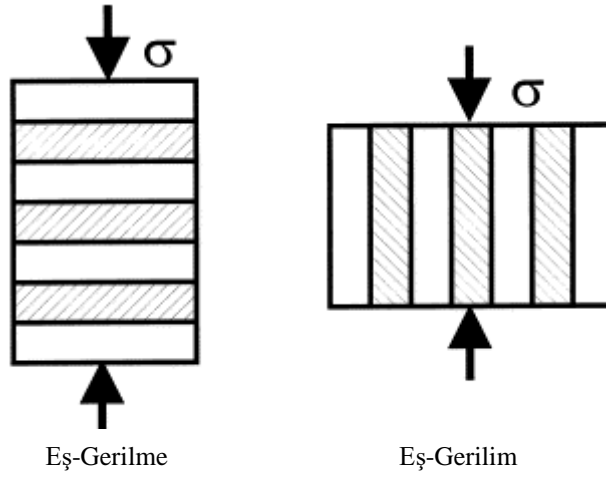
| | | | |
|-------------------------------|---|---|--|
| Tek Yönlü Elyaf Oryantasyonu | Hacimsel Elyaf Oranı Oryantasyon Yönlünde Arttıkça Mukavemet Artar. |  | Takviye Türü: Sürekli Elyaf Sarma. Üretim Şekli: Pultrizyon, Sıkıştırma Kalıplama. |
| Çift Yönlü Elyaf Oryantasyonu | |  | Takviye Türü: Dokuma Cam Elyafı, Katmanlı Üretim. Üretim Şekli: Filaman Sarma, Film İstifleme, Sıkıştırma Kalıplama |
| Çok Yönlü Elyaf Oryantasyonu | |  | Takviye Türü: Çok yönlü örme, Katmanlı Üretim. Üretim Şekli: Sıkıştırma kalıplama, Film İstifleme. |

Tüm bu özellikler doğrultusunda, sürekli elyaf takviyeli termoplastik esaslı kompozit malzemeler, günümüz endüstrisinde sıklıkla tercih edilen malzemeler arasında yer almaktadır.

Termoplastik matrisli sürekli elyaf takviyeli malzemeler sahip oldukları yüksek özgül mukavemet ve düşük ağırlık avantajlarıyla sayesinde, havacılık, makine, otomotiv ve bir çok endüstriyel alanda kullanım ağını genişletmektedir. Özellikle otomotiv endüstrisinde düşük yakıt tüketimi ve yüksek performans ihtiyaçları doğrultusunda hafiflikleri ile büyük bir kullanım potansiyeline sahiptir.

2.3. Kompozit Malzemelerin Fiziksel Özellikleri

Kompozit malzemelerin fiziksel özellikleri doğada izotropik değil (kuvvetin yönünden bağımsız), anizotropiktir (kuvvetin yönüne bağlı olarak farklıdır). Örneğin, kompozit panelin sertliği kuvvetlerin ve/veya momentlerin yönüne bağlıdır. Şekil 2.18’ de gösterildiği gibi, kompozit malzeme mukavemeti iki yükleme koşuluyla sınırlıdır (Kim, 2000).



Şekil 2. 18. Kompozit yükleme koşulları

2.3.1. Eşgerinim karışım kuralı

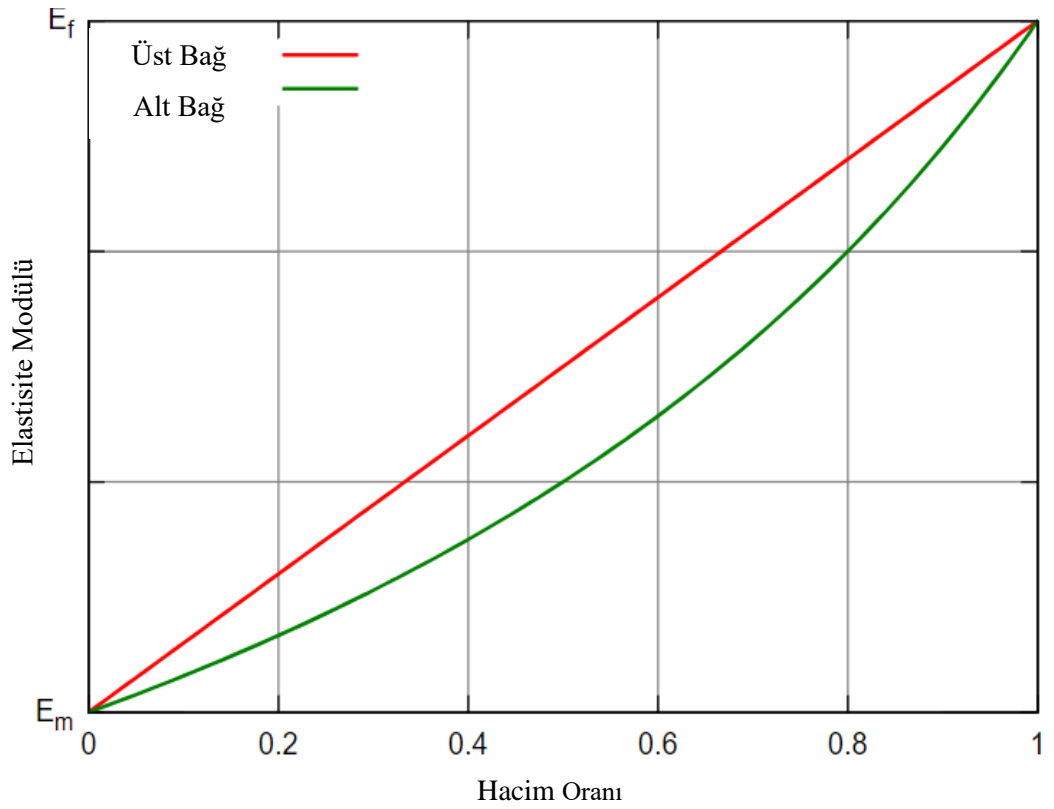
Kompozit yapılarda hem lifler hem de matris yükleme yönüne paralel olarak dizilirse, her iki malzemenin deformasyonu aynı olacaktır. Bu koşul kompozit laminalar arasında delaminasyon olmadığı koşullar için geçerlidir. Eşgerinim karışım kuralı, kompozit

mukavemetin için üst sınırı hakkında bilgi verir karışım kuralı ile belirlenir. Karışım kuralı, bir kompozit malzemenin çeşitli özellikleri hakkında bilgi edinmek için kullanılan ağırlıklı bir ortalamadır. Elastik modül, kütle yoğunluğu, nihai gerilme mukavemeti, termal iletkenlik ve elektrik iletkenliği gibi özellikler üzerinde teorik bilgi sağlar.

Karışım Kuralı:

$$E_c = \sum_{i=1} V_i E_i \quad (2.3)$$

E_c bileşik elastisite modülü ve V_i ve E_i , sırasıyla hacim oranı ve elastisite modülüdür. Örneğin, eşgerinim altında Şekil 2.19'da α ve β fazlarından oluşan bir kompozit malzemenin elastisite modülü görülmektedir.



Şekil 2. 19. Kompozit malzeme hacim oranları ve matris ile lif elastisite modülü ilişkisi

$$E_c = V_a E_a + V_\beta E_\beta \quad (2.4)$$

Denklem 2.4' de V_a ve V_β her fazın hacim oranlarıdır. Kompozit malzeme içerisindeki fazlar yekpare davranış sergilediğinden denklem 2.5 'deki eşgerinimler;

$$\varepsilon_c = \varepsilon_a = \varepsilon_\beta = \varepsilon \quad (2.5)$$

Kompozit yapının düzgün bir kesite sahip olduğu kabul edildiğinde, denklem 2.6 'daki kompozit üzerindeki gerilme, matris ile lif arasındaki ağırlıklı ortalamadır,

$$\sigma_c = \sigma_a V_a + \sigma_\beta V_\beta \quad (2.6)$$

Matris ve lif fazlardaki gerilmeler, denklem 2.7 ve 2.8 de verilen hooke yasası ile elde edilir,

$$\sigma_\beta = E_\beta \varepsilon \quad (2.7)$$

$$\sigma_a = E_a \varepsilon \quad (2.8)$$

Yukarıdaki denklemler birleştirilerek denklem 2.9 da gösterilen toplam gerilme elde edilir.

$$\sigma_c = E_a V_a \varepsilon + E_\beta V_\beta \varepsilon \quad (2.9)$$

2.3.2. Eşgerilme Karışım Kuralı

Kompozit malzemenin mukavemet sınırı, liflerin ve matrisin yükleme yönüne dik olarak yönlendirildiği denklem 2.10 'da verilen eşgerilme koşulu tarafından belirlenir (Courtney, 2005):

$$\sigma_c = \sigma_a + \sigma_\beta + \sigma \quad (2.10)$$

Ayrıca gerinim;

$$\varepsilon_c = \varepsilon_a V_a + \varepsilon_\beta V_\beta \quad (2.11)$$

İle elde edilir.

Matris ve lif fazları için hooke kanunu yeniden yazılırsa;

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma}{E_a} \quad \varepsilon_\beta = \frac{\sigma}{E_\beta} \quad (2.12)$$

Ve

$$\varepsilon_c = V_a \frac{\sigma}{E_a} + V_\beta \frac{\sigma}{E_\beta} = \sigma \left(\frac{V_a}{E_a} + \frac{V_\beta}{E_\beta} \right) \quad (2.13)$$

Hooke yasasından;

$$\frac{1}{E_C} = \frac{V_a}{E_a} + \frac{V_\beta}{E_\beta} \quad (2.14)$$

Genel ifade edilirse;

$$\frac{1}{E_C} = \sum_{i=1}^n \frac{V_i}{E_i} \quad (2.15)$$

Elde edilir. Verilenler doğrultusunda eşgerilme koşulları altında, a ve β fazlarından oluşan bir kompozit malzemenin young modülü;

$$E_C = \frac{\frac{E_a}{E_\beta}}{\frac{V_a}{E_\beta} + \frac{V_\beta}{E_a}} \quad (2.16)$$

Eşgerilme koşulu ile, uygulanan yük altında, matris ve lif fazın da aynı gerilmenin meydana geldiği görülmektedir. Ancak gerilme değerleri arasında farklılık meydana gelebilmektedir. Eşgerilme ve eşgerilme arasındaki herhangi bir yükleme koşulu için genelleştirilmiş denklem şu şekilde yazılabilir:

$$(X_c)^n = V_m(X_m)^n + V_r(X_r)^n \quad (2.17)$$

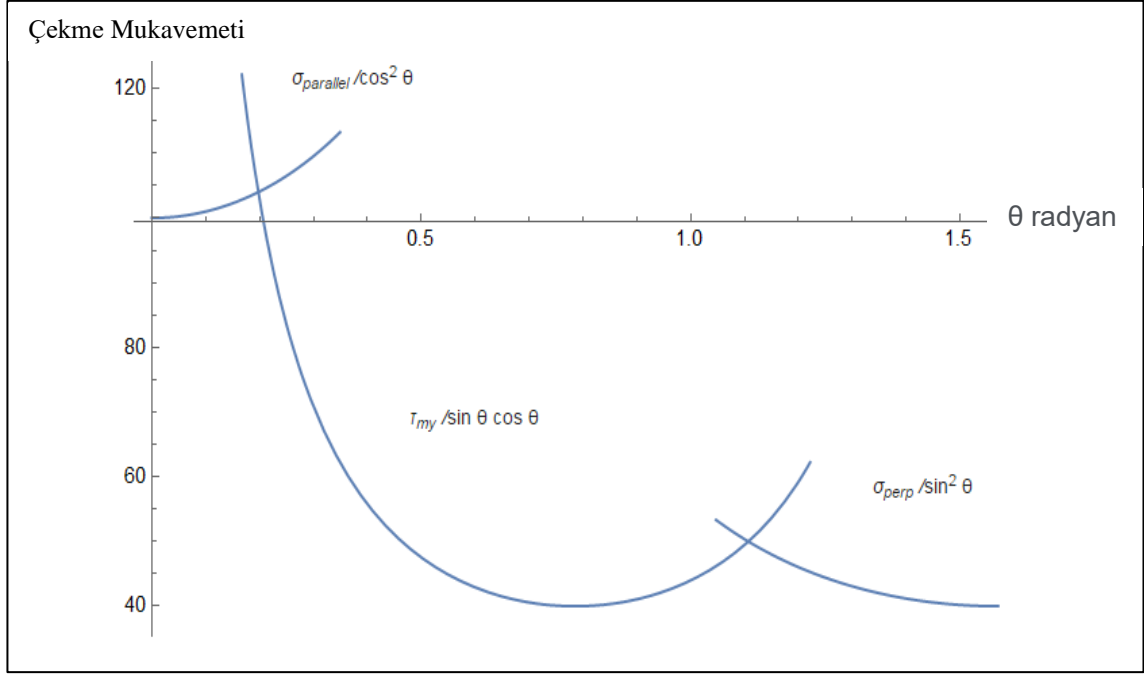
X, elastisite modülü veya gerilme gibi bir malzeme özelliğidir. c, m ve r, sırasıyla kompozit, matris ve takviye malzemelerinin özelliklerini temsil eder ve n değeri 1 ile -1 arasındadır (Courtney, 2005).

Kompozit malzemelerde lifler üzerine gelen kuvvetler, lif yönü ile aynı doğrultuda olduklarında, çekme dayanımını matrisinkinin çok üzerine çıkar ve liflerin kırılmasına kadar malzeme üzerine etki ederler. Şekil 2.20'de gösterilen bir fiberin doğrultusunda θ açısı kadar sapma olduğunda farklı kırılma modları meydana gelmektedir. Küçük θ değerleri için, fiberin artan enine kesit alanı ($A_x \cos \theta$) ve fiberin maruz kaldığı azaltılmış kuvvet ($F/\cos \theta$) nedeniyle kırılmanın başlaması için gereken gerilme $(\cos \theta)^{-2}$ faktörü kadar artar. Açılı elyaflar $\sigma_{\text{paralel}} / \cos^2 \theta$ lık bir kompozit gerilme mukavemetin farkına sebep olur. σ_{paralel} uygulanan kuvvete paralel olarak hizalanmış elyaflara sahip kompozitin gerilme mukavemetidir.

Orta dereceli yanlış yönlendirme açıları θ , kompozit malzemede matris kayma kırılmasına neden olur. Yapı üzerine gelen kuvvetler kayma gerilimini artırdığından açılı kırılmalara sebep olur. Liflerin matrise paralel alanı $1/\sin \theta$ faktörü kadar artar. Benzer şekilde, bu alana gelen paralel kuvvetler ($F/\cos \theta$), bu da $\tau_{my} / \sin \theta \times \cos \theta$ toplam çekme mukavemetine yol açar. Burada τ_{my} , matris kesme kuvvetidir.

Son olarak, büyük θ ($\pi/2$ 'ye yakın) değerleri için, lifler artık yükün küçük kısmını taşıyıp asıl yükü matris malzemesi taşıdığından, enine matris arızasının meydana gelme olasılığı yüksektir. Yine de, liflere dik olan kuvvet ve kuvvetin etkilediği alan $1/\sin \theta$ faktörü kadar

azalacağı ve $1/\sin \theta$ oranında bir kompozit çekme mukavemeti meydana geleceği için, çekme mukavemeti tamamen dik yönelimden $\sigma_{\text{perp}} / \sin 2\theta$ kadar daha büyük olacaktır. σ_{perp} , fiberlerin uygulanan kuvvete dik olarak hizalandığı kompozitin gerilme mukavemetidir (Courtney, 2005).



Şekil 2. 20. Liflerin açısına bağlı olarak meydana gelen kırılma modları.

Ticari olarak üretilen kompozitlerin çoğu, güçlendirici liflerin rastgele dağılımı ve oryantasyonu ile meydana gelir, bu durumda kompozit Young modülü, eş gerilme ve eşgerinim sınırları arasına düşer. Bununla birlikte, mukavemet-ağırlık oranının mümkün olduğunca yüksek olacak şekilde tasarlandığı uygulamalarda (havacılık endüstrisinde olduğu gibi), fiber doğrultuları hayati öneme sahiptir.

Kompozit malzemelerin aksine, standart dövme formlardaki izotropik malzemeler (örneğin alüminyum veya çelik), uygulanan kuvvetler ve/veya momentlerin yöneliminden bağımsızdır. Çünkü her yönde malzeme aynı davranışı sergiler. Bir izotropik malzeme için kuvvetler/momentler ve gerinimler/eğrilikler, Young Modülü,

Kesme Modülü ve Poisson Oranı gibi özelliklere bağlıdır. Anizotropik malzemeler için, ikinci dereceden bir tensörün matematiğine ve 21'e kadar malzeme sabitine ihtiyaç duyulur. Ortogonal izotropinin özel durumu için, Young Modülü, Kesme Modülü ve Poisson oranının her biri için üç farklı malzeme sabiti vardır. Kuvvetler / momentler ve gerinimler/eğrilikler arasındaki ilişkiyi ifade etmek için toplam 9 sabit bilinmelidir.

2.4. Kompozit Malzemelerin Mekanik Özellikleri

2.4.1. Dolgu takviyesi

Genel olarak, dolgu veya partikül takviyesi, kompozitler üzerine fiber takviyesi kadar etki etmemektedir. Genellikle kompozitlerin sertliğini arttırmaktadır. Mekanik özelliklerinden dolayı aşınma direncinin gerekli olduğu uygulamalarda kullanılırlar. Örneğin, çakıl parçacıkların beton yapılara takviyesiyle yapısal sertlik önemli ölçüde artırılabilir. Parçacık takviyesi, düşük maliyetli olmakla birlikte uygulanması çok kolay olduğu için oldukça avantajlı bir yöntemdir (Courtney, 2005).

Parçacık takviyeli kompozitlerin elastik modülü denklem 2.18'den yararlanılarak elde edilir.

$$E_c = V_m E_m + K_c V_p E_p \quad (2.18)$$

Denklemden ifade edilen E elastiklik modülü, V ise hacim oranıdır. c, p ve m alt simgeleri bileşik, parçacık ve matrisi gösterir, K_c ampirik olarak bulunabilen bir sabittir.

Partikül takviyeli kompozitlerin çekme mukavemeti ise denklem 2.19 'da belirtilmiştir.

$$\sigma_c = V_m \sigma_m + K_s V_p \sigma_p \quad (2.19)$$

Denklemden ifade edilen σ çekme mukavemeti ve K_s ampirik olarak bulunabilen bir sabittir (K_c'ye eşit değildir).

2.4.2. Sürekli Elyaf Takviyesi

Sürekli fiber takviyeli kompozit malzeme, bir fiberin güçlü faz olarak zayıf bir faz olan matrise dahil edilmesiyle meydana gelmektedir. Elyaf kullanımının yaygın olmasının nedeni, oldukça yüksek mukavemete sahip malzemelerin elyaf formlarında elde edilebilmesidir. Metalik olmayan lifler, bağlarının kovalent yapısı nedeniyle metal liflere kıyasla genellikle çok yüksek bir mukavemet/yoğunluk oranı gösterir. Bunun en ünlü örneği, spor ekipmanlarından koruyucu ekipmanlara ve uzay endüstrilerine kadar birçok uygulamaya sahip karbon fiberlerdir (Courtney, 2005).

Kompozit malzeme üzerindeki gerilme, fiberin ve matrisin hacim oranı cinsinden denklem 2.20 de ifade edilmiştir.

$$\sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \quad (2.20)$$

Denklemden σ gerilme V ise hacim oranıdır. c , f ve m alt simgeleri sırasıyla kompozit, fiber ve matrisi ifade eder.

Fiber kompozitlerin gerilim-gerinim davranışı test edilerek belirlenebilse de, gerilim-gerinim eğrisinin üç aşaması olan bir eğilim vardır. İlk aşama, hem fiberin hem de matrisin elastik olarak deforme olduğu gerilme-gerilme eğrisinin bölgesidir. Bu lineer elastik bölge denklem 2.21 de ifade edilmiştir (Hayırkuş, 2021).

$$\sigma_c - E_c \varepsilon_c = \varepsilon_c (E_f V_f + E_m V_m) \quad (2.21)$$

Denklemden σ gerilme, ε gerinim ifadesidir. E , elastiklik modülüdür ve V , hacim oranıdır. c , f ve m alt simgeleri sırasıyla kompozit, fiber ve matrisi ifade eder. Gerilme gerinim eğrisinin ikinci bölgesinde hem lif hem de matris elastik bölgeyi geçmiştir. Bu bölgede, matris zayıf faz olduğu için matris plastik olarak deforme olurken fiber hala elastik olarak

deforme olur. Anlık modül, ikinci bölgedeki gerilme-gerinim eğrisinin eğimi kullanılarak belirlenebilir. Gerilme ve gerinim arasındaki ilişki denklem 22'deki gibi ifade edilebilir:

$$\sigma_c = V_f E_f \varepsilon_c + V_m \sigma_m \varepsilon_c \quad (2.22)$$

Denklemden σ gerilme, ε gerinim ifadesidir. E, elastiklik modülüdür ve V, hacim oranıdır. c, f ve m alt simgeleri sırasıyla kompozit, fiber ve matrisi ifade eder. İkinci bölgede eğrinin eğimi modüle eşit olduğundan bu denklemin türevi kullanılabilir (denklem 2.23).

$$E'_c = \frac{d\sigma_c}{d\varepsilon_c} = V_f E_f + V_m \left(\frac{d\sigma_m}{d\varepsilon_c} \right) \quad (2.23)$$

Çoğu durumda, ikinci terim ilkenden çok daha az olduğu için $E'_c = V_f E_f$ olarak kabul edilebilir.

Gerilmeye göre gerilimin türevi, fiber ve matris arasındaki ara yüzey uyumu nedeniyle her zaman modül dönüşümünü vermez. Bu iki faz arasındaki etkileşimin gücü, kompozitin mekanik özelliklerinde değişikliklere neden olabilir (Courtney, 2005)

Kovalent olarak bağlanmış yüksek mukavemetli liflerde (örneğin karbon lifler), plastik deformasyon dislokasyon hareketinden dolayı meydana gelebileceğinden, kırılmadan önce çoğunlukla elastik deformasyon yaşar. Oysa metalik lifler plastik olarak deforme olacak daha fazla alana sahiptir. Bu nedenle kompozit malzemelerin gerilme gerinim eğrisinde hem lifin hem de matrisin plastik olarak deforme olduğu üçüncü bir aşama meydana gelir. Gerilim-gerinim eğrisinin bu bölgedeki gerilim denklem 2.24 'de ifade edilmiştir.

$$\sigma_c(\varepsilon_c) = \sigma_c V_f \varepsilon_c + \sigma_m V_m (\varepsilon_c) \quad (2.24)$$

c, f ve m alt simgeleri sırasıyla kompozit, fiber ve matrisi ifade eder. $\sigma_f \varepsilon_c$ ve $\sigma_m \varepsilon_c$ sırasıyla fiber ve matris akış gerilmelerini ifade eder. Eğrinin üçüncü bölgesinden hemen

sonra kompozit malzemede boyun bölgesi oluşur. Kompozitin boyuna şekil değiştirmesi, kompozitlerin diğer mekanik özelliklerinde olduğu gibi, fiberin boyun verme gerilmesi ile matris arasında olur. Zayıf fazın boyun verme gerilimi, güçlü faz tarafından geciktirilir. Gecikmenin miktarı, güçlü fazın hacim oranına bağlıdır (Courtney, 2005).

Böylece kompozit malzemenin çekme mukavemeti hacim oranı cinsinden denklem 2.25 'deki gibi ifade edilebilir.

$$\sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m (\varepsilon_c) \quad (2.25)$$

Denklemde σ gerilme, ε gerinim, V ise hacim oranıdır. c, f ve m alt simgeleri sırasıyla kompozit, fiber ve matrisi ifade eder. Kompozit malzemenin çekme mukavemeti bir başka ifadeyle denklem 2.26, ve 2.27 'deki gibi ifade edilebilir.

$$\Sigma_c = \sigma_m V_m \quad (2.26)$$

V_f için V_c 'den küçük veya V_c (hacim oranının kritik değeri)'ye eşittir.

$$\sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \quad (2.27)$$

V_f için V_c 'den büyük veya V_c 'ye eşittir.

Kritik hacim oranı denklem 2.28 de ifade edilmiştir.

$$V_c = \frac{[\sigma_m - \sigma_m(\varepsilon_f)]}{[\sigma_f + \sigma_m - \sigma_m(\varepsilon_f)]} \quad (2.28)$$

Açıkça görülüyor ki, eğer σ_c σ_m 'dan büyükse, kompozit gerilme mukavemeti matristen daha yüksektir.

Böylece, fiberin minimum hacim oranı denklem 2.29 'da ki gibi ifade edilebilir.

$$V_c = \frac{[\sigma_m - \sigma_m(\varepsilon_f)]}{[\sigma_f - \sigma_m(\varepsilon_f)]} \quad (2.29)$$

Bu minimum değer, pratikte çok düşük olmasına rağmen, bilinmesi çok önemlidir. Çünkü sürekli liflerin dahil edilmesi ile kompozit malzemelerin mekanik özellikleri iyileştirmektedir ve bu hacim oranı değeri, bu iyileştirmenin eşiğidir (Courtney, 2005).

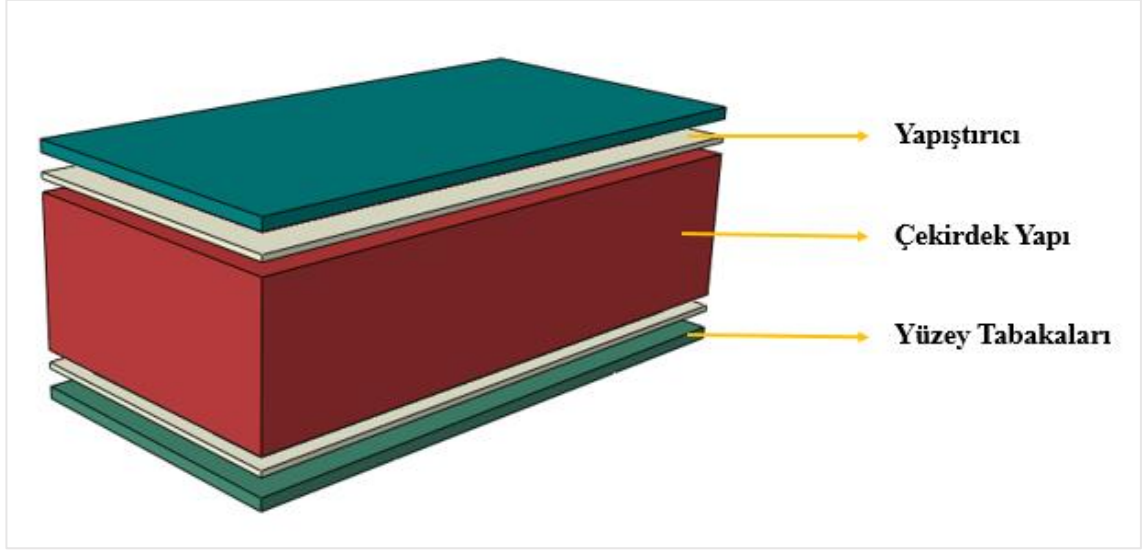
Çalışmada, kendi kendine iyileşme vasfına sahip farklı niteliklerde kompozit malzemeler geliştirilmiştir. Geliştirilen kompozit malzemelerde dolgu maddeleri ve matris malzemesi kullanılmıştır. Mekanik deneyler ve spesifik karakterizasyonlar ile yapıların özellikleri tayin edilmiştir.

2.5. Sandviç Malzemeler

Sandviç yapılar, yüksek özgül mukavemete ve yüksel eğilme rijitliğine sahip yapılardır. Yüzey tabakaları ile hafif çekirdek yapısının birleştirme elemanı (yapıştırıcı) kullanılarak oluşturulan kompozit malzemelerdir. Kompozit malzemeler sınıfında yer almasının nedeni farklı tür malzemelerin bir araya getirilerek istenilen özelliklerde yeni bir malzeme elde edilmesidir.

Sandviç bir yapı  elemandan oluşmaktadır (şekil 2.21):

- Yüzey tabakaları,
- Çekirdek yapı,
- Çekirdek yapı ile yüzey tabakası arasındaki bağ (yapıştırıcı).



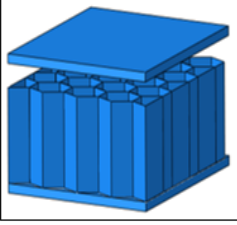
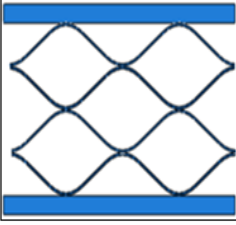
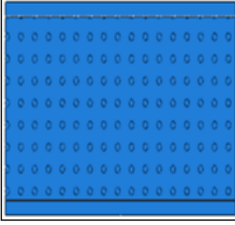
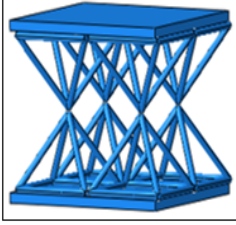
Şekil 2. 21. Tipik bir sandviç yapı gösterimi. (Hayırkuş, 2021)

Genel olarak üç katmandan oluşan sandviç yapıların çekirdek kısımları, sandviç malzemenin eğilme rijitliğini, akustik performansını, panel kalınlığını ve diğer mekanik özelliklerini sağlaması amacıyla geliştirilmiştir. Dış plakalar veya kaplamalar ise farklı geometrik özellikler, renk ve dokularda üretilebilmektedir.

Çekirdek yapının temel amacı, tüm sandviç yapının eğilme rijitliğinin çok az ağırlığa sahip yapı eldesiyle sağlanmasıdır.

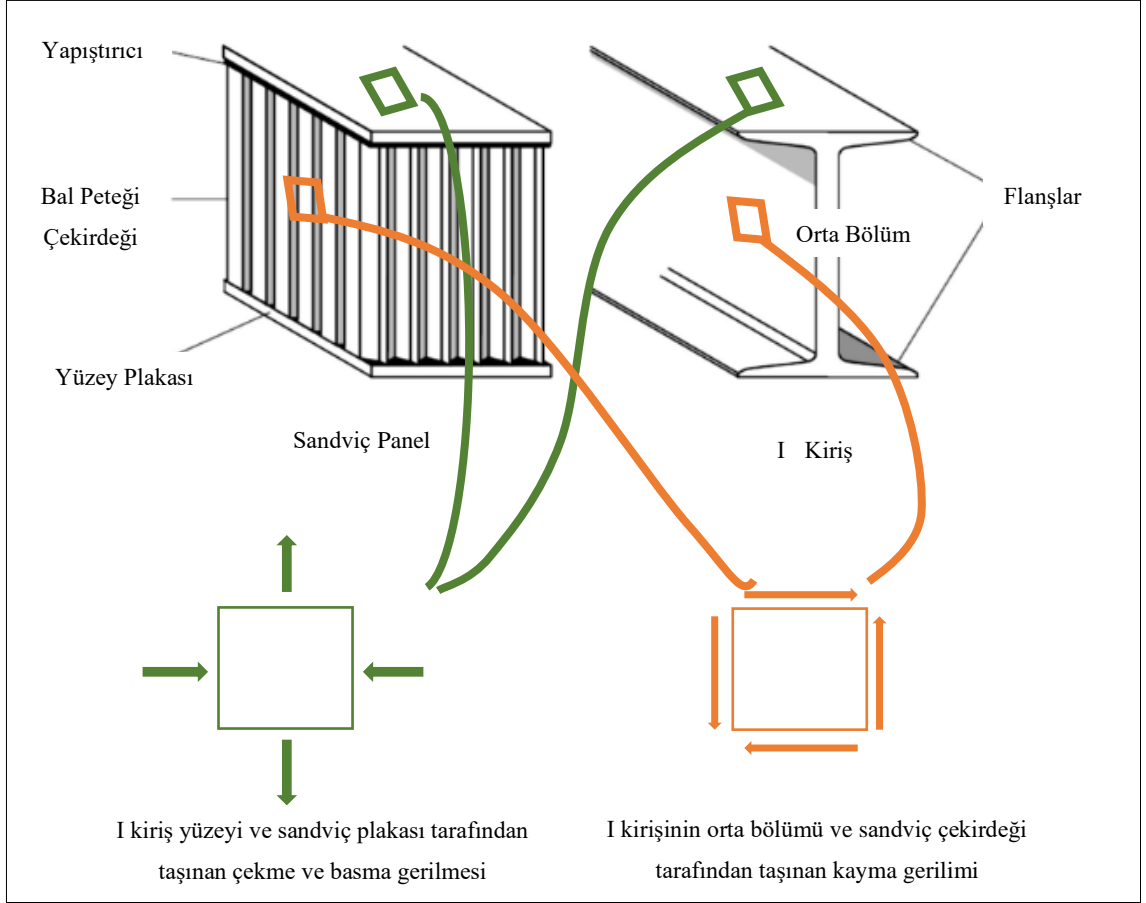
2.5.1. Sandviç Malzemelerin Sınıflandırılması

Sandviç yapılar çekirdek malzeme ve geometrisine göre 4 yapısal sınıfa ayrılmaktadır. Şekil 2.22’de bu çekirdek yapıların özellikleri verilmiştir.

| Balpeteği Yapılar | Oluklu Yapılar | Köpük Yapılar | Kafes Kiriş Yapılar |
|---|--|--|---|
|  |  |  |  |
| <ul style="list-style-type: none"> • Yüksek düzlem-dışı bası ve kayma dayanımı (rijitlik) • Enerji sönümlene kabiliyeti • Düşük yoğunluk ve hafiflik | <ul style="list-style-type: none"> • Yüksek mukavemet • Kolay üretilebilirlik • Yüksek enerji sönümlene kabiliyeti • Nem tutmayan karakteristik yapı | <ul style="list-style-type: none"> • Yüksek mukavemet/ağırlık oranı • Maksimum sertlik ve ezilme dayanımı • İyi elektriksel özellikler • İmalatta esneklik • Yüksek akustik yalıtım | <ul style="list-style-type: none"> • Yüksek özgül mukavemet ve şekil değiştirme • Mükemmel darbe sönümlene • Akustik yalıtım • Ultra hafif yapı |

Şekil 2. 22. Çekirdek yapıların sınıflandırılması (Hayırkuş, 2021)

Malzeme ve imalat endüstrilerindeki gelişme, birçok endüstride yeni yapısal iyileştirmeler beraberinde getirmektedir. Bu gelişmeler aynı zamanda kompozit yapılar ve daha karmaşık şekiller gibi yenilikçi tasarımlara da yol açıyor. Günümüzde uçakların çoğu hem geleneksel hem de geleneksel olmayan tasarımlardan yararlanmaktadır. Geleneksel tasarım ilkeleri, metalik malzemeler veya I-kirişler gibi geleneksel yapıları kullanırken, geleneksel olmayan tasarımlar, gelişmiş malzemelerin ve kompozit malzemeler veya sandviç kirişler gibi yapıların kullanımını içerir. Bu noktada, sandviç kirişler havacılık vb. hafifliğin önem arz ettiği alanlarda hiç olmadığı kadar sık görülür. Sandviç ve I-kirişler arasında benzerlikler ve farklılıklar vardır. Tasarım ilkeleri açısından bir sandviç kiriş ile geleneksel bir I-kiriş arasında güçlü bir benzerlik vardır. Şekil 2.23' e göre, tasarım açısından, bir I-kiriş üzerinden yükün akışı, bir sandviç kirişin yük akışına benzer. Bir I-kirişte, düzlem içi yükleri taşımaktan esas olarak flanşlar sorumludur ve sandviç kiriş yüz levhalarında düzlem içi yüklerden sorumludur. Bir flanşın ağı çoğunlukla kesme yüklerini taşır ve bir sandviç kirişte çekirdek, kesme yüklerini kaldırarak şekilde tasarlanmıştır. Yük akış yollarındaki benzerliklere rağmen, sandviç kirişler geleneksel yapılara göre çeşitli avantajlara sahiptir.



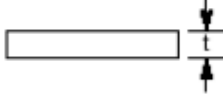
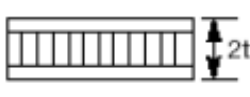
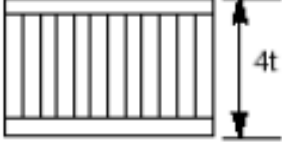
Şekil 2. 23. Sandviç yapılar ile I kirişlerin gerilme davranışları.

İlk olarak tipik bir sandviç kiriş, geleneksel yapılara göre üstün eğilme rijitliğine sahiptir. Sandviç yapıları hem düzlem içi hem de düzlem dışı yüklere karşı etkili bir şekilde tepki verebilen farklı malzemelerin bileşimidir.

Sandviç yapıların diğer bir avantajı ise, geleneksel yapılara kıyasla büyük ağırlık tasarrufu sağlayabilir. Bir sandviç kiriş ve bir katı levha arasındaki bir karşılaştırma, t kalınlığındaki katı bir levhanın sertlik ve ağırlık değerlerinin 100'e normalize edilmiş hali Çizelge 2.5'te verilmiştir. Tabloda, ağırlıktaki sadece %6'lık bir artışın, geleneksel katı

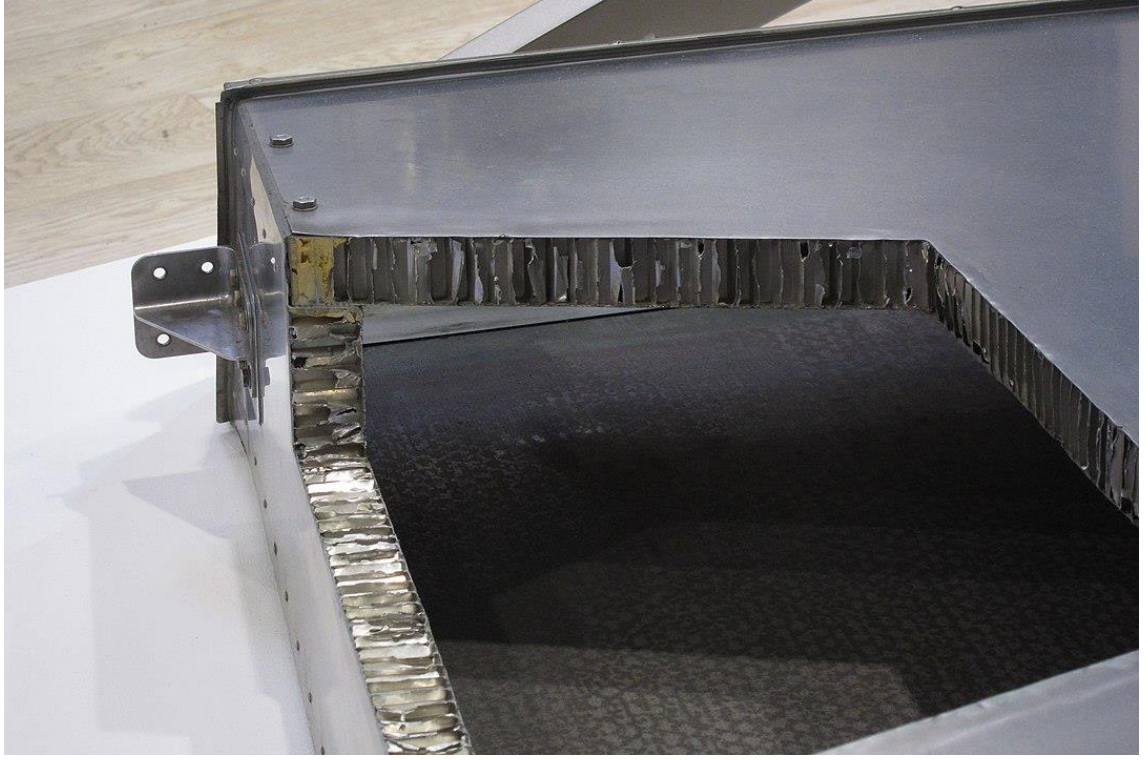
metal levhaya kıyasla 925 kat daha yüksek eğilme mukavemeti değerine yol açtığı gösterilmektedir.

Çizelge 2. 5 . Bal peteği sandviç yapı ve metal levha karşılaştırılması. (Yardımcı, 2019)

| | Katı Metal Levha | Sandviç Yapı | Kalın Sandviç Yapı |
|-------------------|---|--|---|
| |  |  |  |
| Eğilme Rijitliği | 100 | 750 | 3700 |
| Eğilme Mukavemeti | 100 | 350 | 925 |
| Ağırlık | 100 | 103 | 106 |

Bu nedenle, sandviç paneller ve I-kirişler benzer yük akış yoluna sahiptir, ancak malzeme bileşimi ve yapısal performans açısından farklılık gösterirler. Bir sandviç yapı, ağırlıktan ödün vermeden istenilen sertlik ve dayanıklılık özelliklerine kavuşabilir. Bu avantajlar, sandviç yapıların havacılık sektörünün talep görmesini sağlamış ve tasarım, analiz ve imalat yöntemlerinde hızlı bir gelişme sağlamıştır.

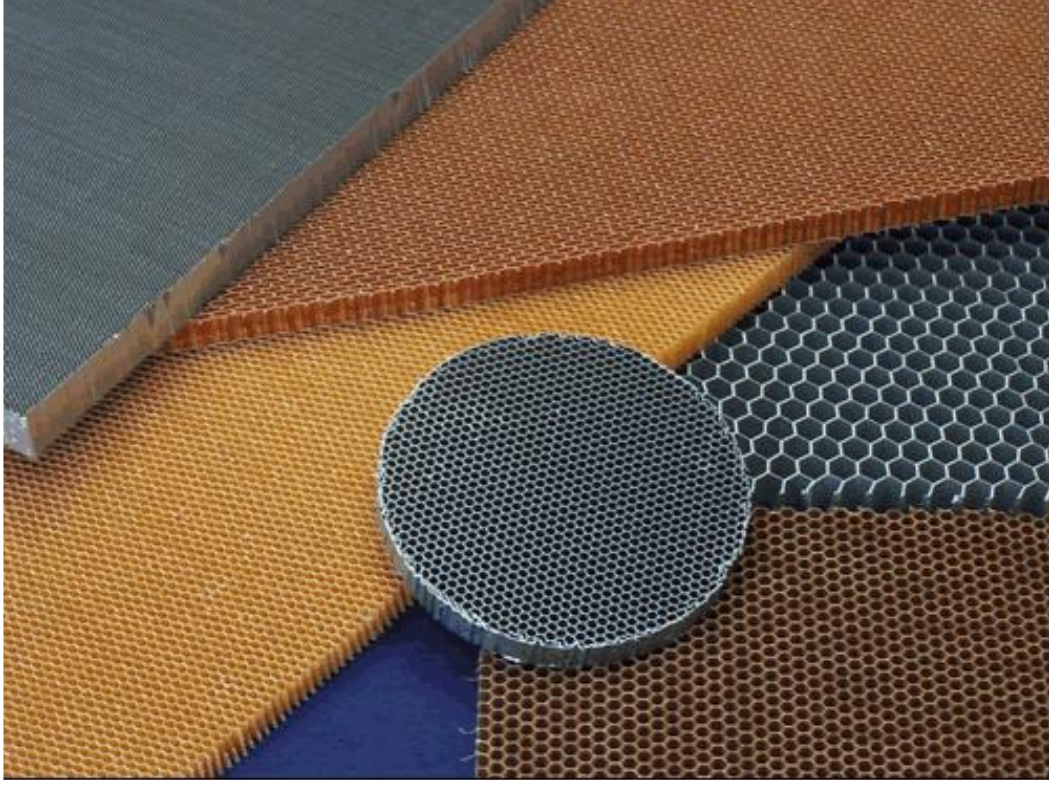
Bal peteği Sandviç kompozit malzemelerinde çekirdek yapısını saran yüzey malzemelerin görevi gelen yükleri hürelere homojen dağıtmak ve kayma dayanımını artırmaktır. Yüzeyi malzemeleri alüminyum, karbon kompozit, cam kompozit vb. plakalardan oluşmaktadır. Alüminyum yüzey malzemeli bal peteği sandviç kompozit örneği Şekil 2.24' de gösterilmiştir. Geliştirilen sandviç yapının mekanik yüklemelere karşı direnç sağlayan bölümü hücre çekirdeğidir. Hücre çekirdekleri çeşitli geometri ve malzemelerden oluşmaktadır. Altıgen, kare, köpük, alüminyum kâğıt vb. yapılar örnek olarak gösterilebilir. Bal peteği sandviç kompozitlerde çekirdek yapılar ile yüzey malzemeleri arasındaki bağ yapıştırıcılar ile sağlanmaktadır. Yapıştırıcılar arasında vinil fenolik, nitril fenolik, epoksi vb. örnek olarak verilebilir (Akkuş, 2016).



Şekil 2. 24. Karbon fiber yüzey malzemeli bal peteği sandviç yapı (Taşkesen, 2020).

2.5.2. Bal peteği çekirdek malzemelerin üretim yöntemleri

Bal petekli çekirdekli yapıya sahip kompozitler genel olarak uzatarak ve kıvrılarak şekil verme yöntemi ile üretilirler. Bal peteği kompozitlere örnek Şekil 2.25’te gösterilmiştir.



Şekil 2. 25. Bal peteği kompozitler (Taşkesen, 2020).

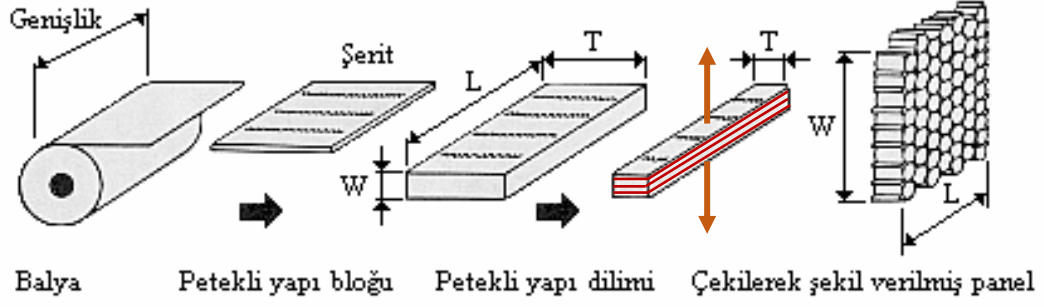
➤ **Uzatarak Şekil Verme Yöntemi**

Uzatarak şekil verme yöntemi genellikle metal malzemelerin üretiminde kullanılır. Bal peteği çekirdeklerinde en çok kullanılan yöntemdir. Bu yöntem belirli aşamalardan meydana gelir.

- Şerit biçiminde yapıların kesilmesi.
- Hazır parçalara yapıştırıcı malzemenin sürülmesi.
- Yapıların üste birikmesi ile petek hücrelerin sıcaklıkta pres malzemesi içinde şekillendirilmesi.

Alüminyum malzemeler istenilen boyutlarda ve kalınlıklarda dilim şeklinde ayrılır. Uzatarak şekil verme yöntemi ile petek hücre üretimi şematik resmi Şekil 2.26' da gösterilmiştir.

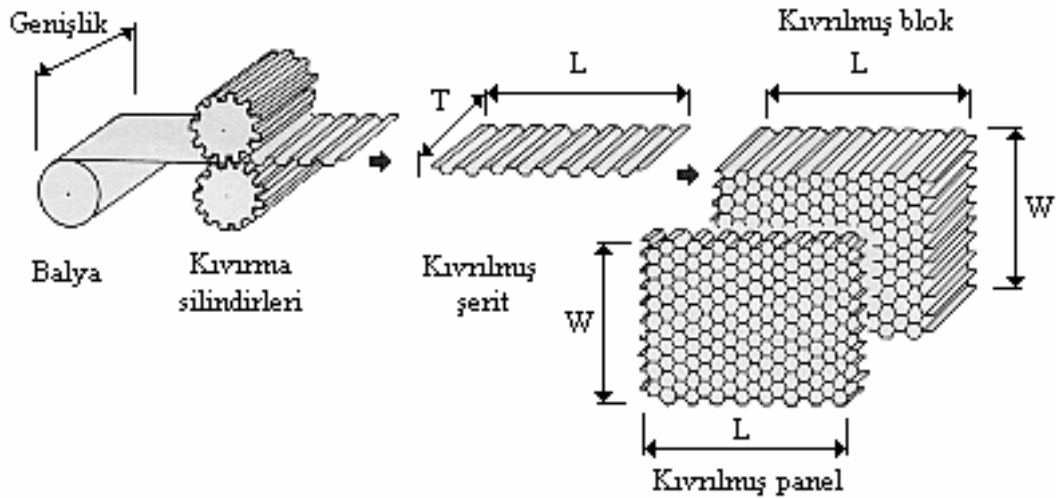
Tez çalışmasında kullanılan Alüminyum bal petekleri bu yöntemle üretilmiştir.



Şekil 2. 26. Uzatarak şekil verme yöntemi ile petek hücre üretimi (Taşkesen, 2020).

➤ Kıvrılarak Şekil Verme Yöntemi

Kıvrılarak şekil verme yöntemi, yüksek sıcaklık etkisiyle şekil verilen, boyut kalınlığı ve yoğunluğu standartlardan fazla olan petekli yapıların imalatında tercih edilir. Bu yöntemde şerit levhalar istenilen geometride kıvrılır ve düğüm noktalarına yapıştırıcı uygulanır. Ardından levhalar üst üste konur ve kıvrılmış bloklar belli sıcaklıkta bekletilir. Daha sonra bloktan istenilen kalınlıkta dilimler kesilerek bal peteği çekirdek malzeme elde edilir (Taşkesen, 2020). Kıvrılarak şekil verme yöntemi ile petek hücre üretimi şematik resmi Şekil 2.27' de gösterilmiştir.



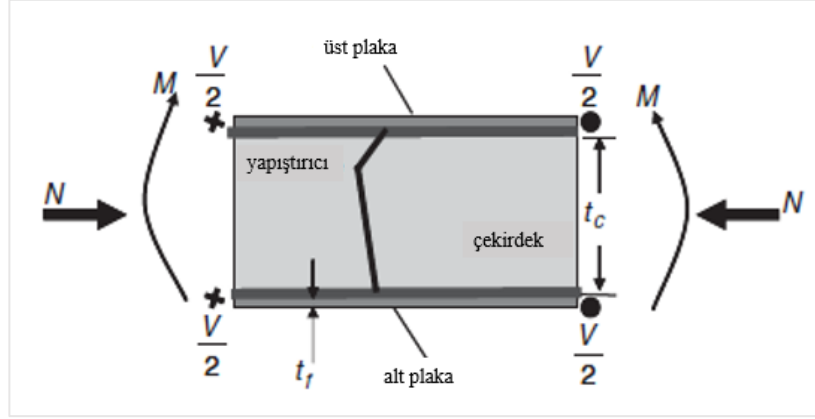
Şekil 2. 27. Kıvrılarak şekil verme yöntemi ile petek hücre üretimi (Taşkesen, 2020)

Kompozit malzemelerin özellikle bal peteği sandviç kompozitler havacılık, uzay, otomotiv vb. hafiflik ve rijitlik istenilen uygulama alanlarında sıklıkla kullanılmaktadır. Kullanılmalarının çok fazla avantaj yaratacak nedeni vardır. Özellikle hafiflik, dayanıklılık, mukavemet, korozyon direnci ön plana çıkan avantajlarıdır.

Bu çalışmada geliştirilen kendi kendine iyileşen malzemeler alüminyum bal petekleri içerisine yerleştirilmiştir. Kalan boş hacimler epoksi reçine ile doldurulmuştur. Sonrasında çalışmanın niteliğini belirleyecek deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu esnada al bal peteğinin deneylere ve dağılan ajanların hücrel bütünlüğe katkıları belirlenmiştir.

2.6. Sandviç Teorisi

Kompozit malzemelerde, istenen özelliklere bağlı olarak çekirdek yapılar geliştirilmiştir. Köpük, petek yapı, düşük yoğunluklu köpüklü alüminyum, vb. çoğu çekirdek malzemesi, anizotropiktir. Farklı yönlerde farklı mekanik özelliklere sahiptir. Genel olarak, çekirdeğin amacı, sandviçin eğilme rijitliğini arttırmaktır. Çekirdeğin sertliği (ve mukavemeti) yüzey tabakalarınınkinden çok daha düşüktür. Sonuç olarak, Şekil 2.28' de gösterilen gibi genel yükleme durumları için, sırasıyla uygulanan eğilme momenti M ve düzlem içi eksenel ve kayma yükleri N ve V ile tüm yük yüzey levhaları tarafından alınır homojen olarak çekirdek malzemesine aktarılır. Sonuç olarak, Şekil 2.28' de gösterilen yükleme durumları için, birim genişlik başına uygulanan eğilme momenti M ile eksenel kuvvet denklem 2.30'daki gibi hesaplanır:



Şekil 2. 28. Sandviç konfigürasyonu (Kassapoglou, 2013).

$$N_m = \frac{M}{t_c + t_f} \quad (2.30)$$

Eksenel yük N ve kesme yükü V , iki yüzey tabakası arasında eşit olarak bölünmektedir. Çekirdek malzemesi belirli yönlerden gelen yükler altında düşük mukavemet ve sertliğe sahip olmalıdır. Böylece çekirdek yapı üzerine gelen yükler cidarlar arasında transfer edilir.

2.6.1. Sandviç Eğilme Rijitliği

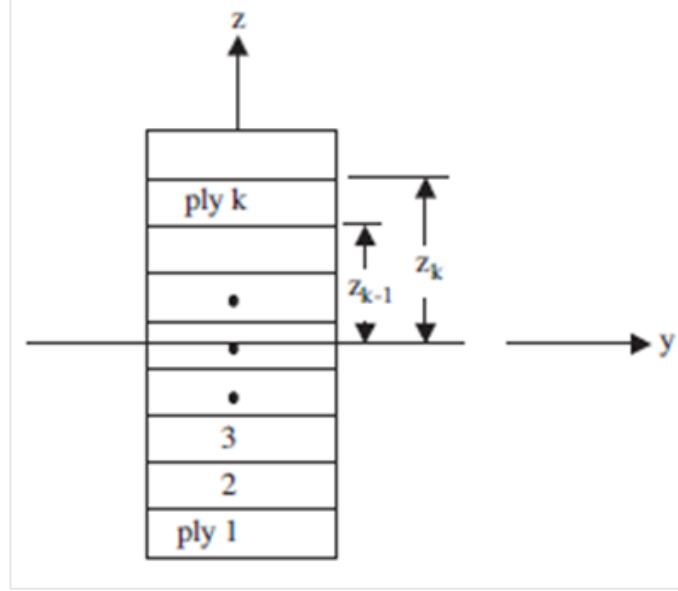
Bir sandviç malzeme genel olarak, çekirdeğin ihmal edilebilir sertlik ve mukavemet özelliklerine ve çekirdek kalınlığına eşit kalınlığa sahip başka bir kat olduğu bir laminat olarak kabul edilebilir. A_{ij} uzama-kesme, B_{ij} uzama-eğilme ve D_{ij} eğilme-burulma olmak üzere rijitlikleri temsil eden matrisleri belirlemek için klasik levha teorisi kullanılabilir. Bu teoriye göre A, B ve D rijitlikleri şu şekilde yazılmaktadır:

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n Q_{ij} (z_k - z_{k-1}) \quad (2.31)$$

$$B_{ij} = \sum_{k=1}^n \frac{Q_{ij}}{2} (z_k^2 - z_{k-1}^2) \quad (2.32)$$

$$D_{ij} = \sum_{k=1}^n \frac{Q_{ij}}{3} (z_k^3 - z_{k-1}^3) \quad (2.33)$$

Burada $i,j = 1,2,6$, toplam laminatın n katlarıdır. z_k ve z_{k-1} ise Şekil 2.29' da gösterilen katmanların üst ve alt z koordinatlarıdır.



Şekil 2. 29. Kat numaralandırma sistemi (Kassapoglou, 2013).

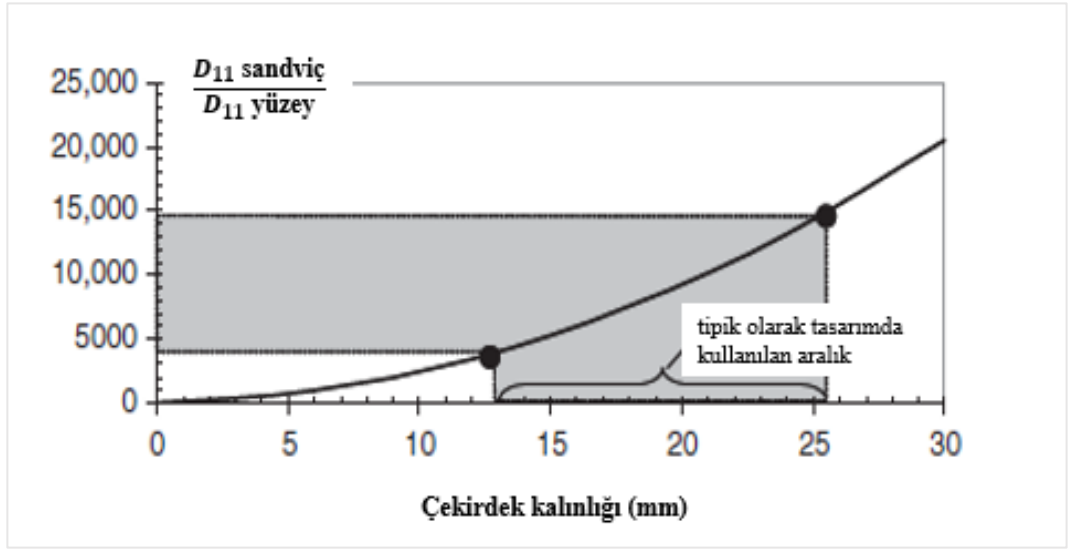
Katmanlı levha teorisi için yazılan bu denklemlerde çekirdeğin varlığı A matrisini etkilemez. Ancak B (toplam yerleşimin asimetrik olduğu durumda) ve laminat eğilme rijitliğini ifade eden D matrislerini önemli ölçüde etkiler. Aynı yüzey plakalarına sahip sandviç malzeme için eğilme rijitlik matrisi (D) Denklem 2.34' deki gibi yazılmaktadır:

$$D_{ij} = 2(D_{ij})_f + 2(A_{ij})_f \left(\frac{t_c + t_f}{2} \right)^2 \quad (2.34)$$

Tüm sandviçlerde denklem 2.33 kullanılarak, D_{11} 'in her bir yüzey tabakası için D_{11} 'e bölümü, değişen çekirdek kalınlığının bir fonksiyonu olarak elde edilebilir. Sandviç

eğilme rijitliğinin çekirdek kalınlığına bağlı bir fonksiyonu olarak değişimini gösteren grafik Şekil 2.30' da gösterilmiştir.

Şekil 30' da çekirdek kalınlıklarının küçük olması (5 mm) bile eğilme rijitliğinde 1000 kat artışa neden olmaktadır. Çekirdek ve yapıştırıcının varlığı nedeniyle ağırlıkta küçük bir artış olsa da sandviç yapının yüksek eğilme rijitliği kazanması sayesinde tolere edilebilir durumdadır.



Şekil 2. 30. Çekirdek kalınlığının bir fonksiyonu olarak sandviç eğilme rijitliğindeki değişim (Kassapoglou, 2013)

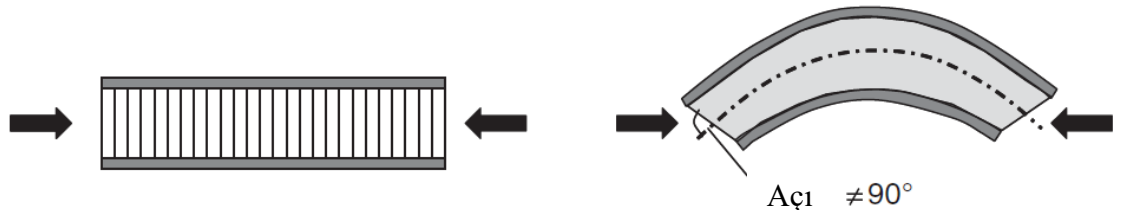
2.6.2. Sandviç Yapının Burkulması

Burkulma, özellikle çekirdek kalınlığı fazla sandviç paneller için kritik bir hasar çeşitidir. Ancak buradaki önemli nokta sandviç yapı üzerine gelen yükler altında yapının burkulma dayanımını belirleme prosedürüdür.

➤ Bası Etkisinde Sandviç Burkulması

Çekirdeğin varlığı, enine doğrultuda gelen yüklemeler altında, enine kesmenin etkilerini çok önemli kılmaktadır. Bu yüklemeler hesaba katılmazlarsa, yapıdaki burkulma dayanımı çok düşük olacaktır.

Enine kesme etkilerinin önemli olduğu üniform kalınlıkta bir plakada Kirchhoff hipotezi artık geçerli değildir. Düzlem bölümleri düzlem olarak kalır, ancak artık plaka orta düzlemine dik değildir. Bu durum, Şekil 2.31' de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2. 31. Basınç altında bir sandviç panelin eğilmesi (Kassapoglou, 2013)

Basınç altındaki sandviç yapılar, geniş bir kiriş olarak kabul edilir ve burkulma yükü denklem 2.35 'deki gibi hesaplanır:

$$N_{xcrit} = \frac{N_{Ecrit}}{1 + \frac{kN_{Ecrit}}{t_c G_c}} \quad (2.35)$$

Burada, t_c sandviç çekirdek kalınlığı ve G_c enine kayma modülüdür. N_{Ecrit} ise enine kesme etkileri ihmal edilirse sandviçin malzemedeki burkulma yükü N_0 'dır. Basit mesnetli kenarlar için Denklem (2.36) ile verilmiştir:

$$N_{Ecrit} = \frac{\pi^2}{a^2} [D_{11}m^2 + 2(D_{12} + 2D_{66})(AR)^2 + D_{22} \frac{(AR)^4}{m^2}] \quad (2.36)$$

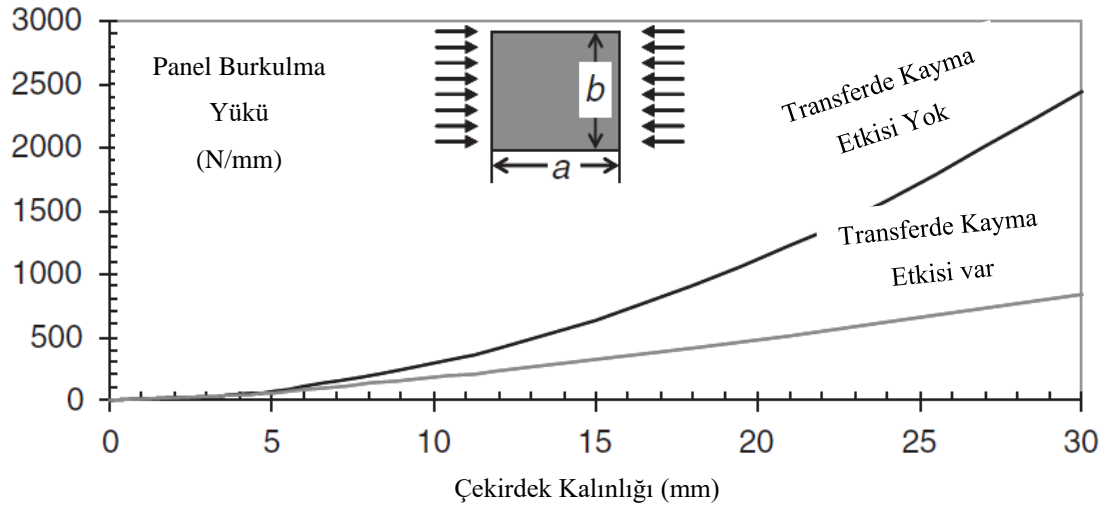
Denklem 2.34' deki k , kayma düzeltme faktörüdür. Kayma düzeltme faktörü, plakanın kalınlığı boyunca türetilen ve varsayılan enine kayma gerilmesi dağılımları arasındaki belirsizliği ortadan kaldırmaktadır. Birinci dereceden kesme deformasyon teorisine bağlı olarak mühendislik eğilme teorisi, kesme gerilmesinin plaka kalınlığından bağımsız olduğunu varsayarken, plaka boyunca kesme gerilmesinin ikinci dereceden bir dağılımına yol açar. Bu durumda her iki formülasyonu takiben yapılan işin aynı olduğu tutarsızlığı ortadan kaldırır. Böylece enine kesme kuvveti (birim genişlik başına) için denklem 2.37' daki ifade ortaya çıkar.

$$Q_x = kG_{xz}h\gamma = \frac{5}{6}G_{xz}h\gamma \quad (2.37)$$

Denklemde kayma düzeltme faktörü $k = 5/6$, h plaka kalınlığıdır ve y enine kayma gerinimidir.

Daha önce ifade edildiği gibi, çoğu sandviç yapı çekirdeği, yüzey plakalar ile karşılaştırıldığında çok küçük kayma gerilmesine G_{xz} sahiptir. Sonuç olarak, kalınlık boyunca kayma gerilmesi hemen hemen üniform dağılır. Bu üniform dağılım, daha önce bahsedildiği gibi, eğilme momentlerinin kuvvet çifti olarak bir sandviç aracılığıyla iletilmesi nedeniyle, eğilme gerilmelerinin çekirdeğin kalınlığı boyunca doğrusal olarak dağılmadığı gerçeğiyle tutarlıdır. Böylece, eğilme teorisi ile birinci mertebeden kayma deformasyon teorisi ve $k \approx 1$ arasında (neredeyse) hiçbir tutarsızlık yoktur.

Çekirdek kalınlığı 5 mm'yi aştığında, enine kesme etkileri dahil burkulma yükünün, enine kesme etkileri olmadan burkulma yükünden büyük ölçüde farklı olduğu görülmektedir. Enine kesme etkileri dahil edilirse, burkulma yükü her zaman daha düşüktür. 3 mm' lik bir çekirdek kalınlığı için bile, iki burkulma yükü (enine kesme etkileri olan ve olmayan) arasında %21 farklılık meydana gelir. Farklı çekirdek kalınlıklarının burkulma yükü altındaki davranışı şekil 2.32' de gösterilmiştir.

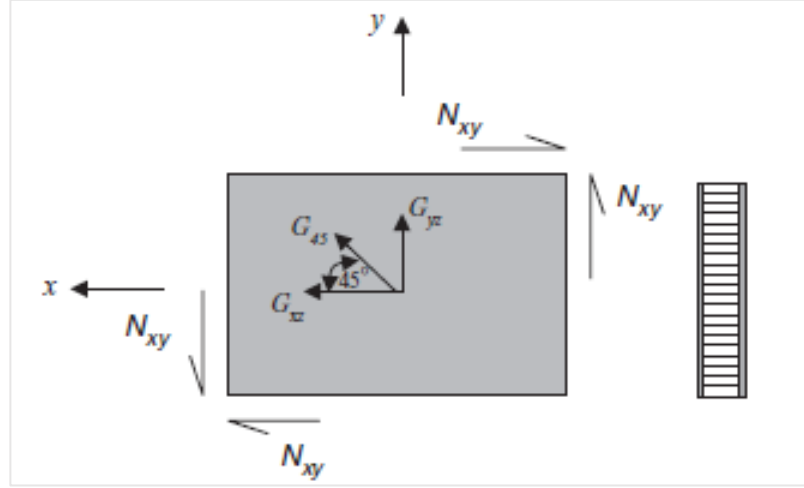


Şekil 2. 32. Çekirdek kalınlığının enine kesme etkisi olan ve olmayan bir sandviçin burkulma yükü etkisindeki davranışı (Kassapoglou, 2013).

➤ Kayma Etkisindeki Sandviç Burkulması

Sandviç yapılar bası altında olduğu gibi kesme kuvvetleri altında da burkulmaya maruz kalabilmektedir. Basit mesnetli bir sandviçin kesme altında burkulmasını ifade denklem 2.38 formu, Denklem (2.35) ile aynıdır:

$$N_{ycrit} = \frac{N_{xyc}}{1 + \frac{N_{xyc}}{t_c G_{45}}} \quad (2.38)$$



Şekil 2. 33. Kesme yükü altında sandviç panel (Kassapoglou, 2013).

Burada N_{xyc} , enine kesme etkilerinin meydana gelmediği kesme burkulma yüküdür. G_{45} ise şekil 2.34’de gösterilen 45° yönündeki çekirdek kayma modülüdür.

Birincil yük yönü ile hizalı olduğundan kayma modülü G_{45} kullanılır. Teorik kayma yüklemesi, bir yönde çekme ve diğer yönde basma ile çift eksenli yüklemeye eşdeğer olduğundan, eğilmiş yarım dalgaların oluşma eğilimi Şekil 2.34 ‘de 45° çizgisi (maksimum basma yönü) boyuncadır. Bu yöndeki çekirdek kayma modülü olan G_{45} , bu eğilime karşıdır.

G_{45} standart tensör dönüşüm denklemlerinin belirlenmesi için denklem 2.39’deki form kullanılır:

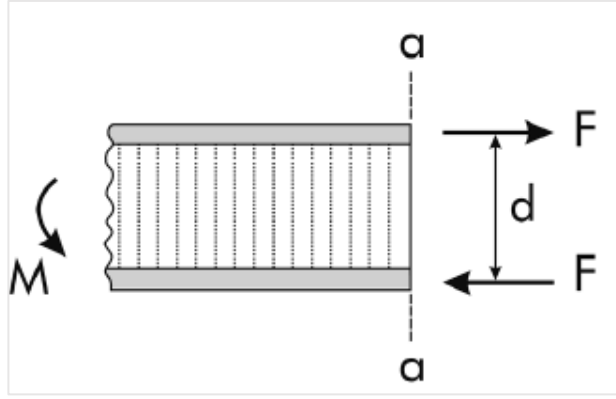
$$G_{45} = \sin^2 45 G_{yz} + \cos^2 45 G_{xz} = \frac{G_{yz} + G_{xz}}{2} \quad (2.39)$$

Bunun sonucunda Denklem 2.35, Denklem 2.40’deki gibi yeniden yazılır (45).

$$N_{xycrit} = \frac{(G_{xz} + G_{yz})t_c}{\frac{(G_{xz} + G_{yz})t_c}{N_{xyc}} + 2} \quad (2.40)$$

2.6.3. Sandviç yüzey plakaları ve çekirdekteki gerilmeler

Sadece eğilme yüklemelerine maruz kalan bir sandviç malzeme ele alındığında çoğu çekirdek malzeme eğilme rijitliğine önemli ölçüde katkıda bulunmaz. Böyle bir durumda Şekil 2.34' deki serbest cisim diyagramında gösterilen yüzey plakaları çekirdek kalınlığına göre ince ise, eğilme momenti M 'nin, yüz tabakalarının merkezlerine etki eden eşit büyüklüğe sahip iç gerilim ve bası kuvvetleri tarafından dengelendiği kabul edilir.

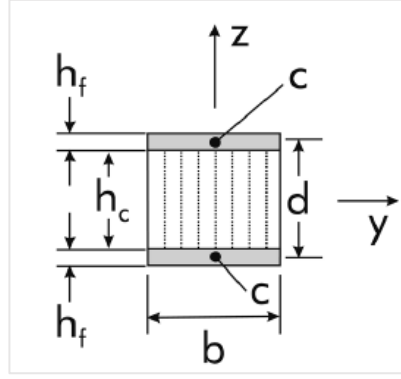


Şekil 2. 34. Yüzey plakalarındaki iç kuvvetleri gösteren serbest cisim diyagramı (Carlsson & Kardomateas, 2011).

Çekirdekteki eğilme gerilmeleri ihmal edilirse, Şekil 2.34' deki elemanın dengesi, yüzey plakalarındaki ortalama eğilme gerilmesini (denklem 2.41) verir. Ayrıca d kalınlığı denklem 2.42' de ifade edilmiştir.

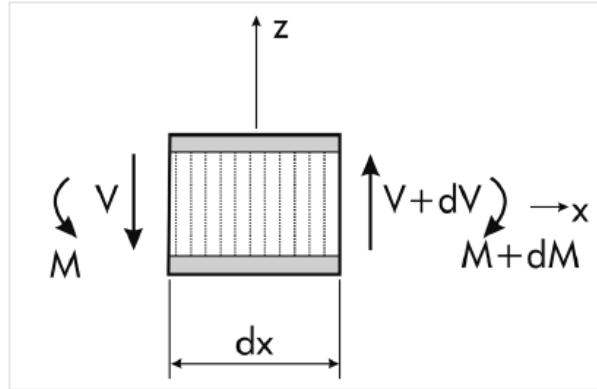
$$\sigma = \frac{M}{bdh_f} \quad (2.41)$$

$$d = h_c + h_f \quad (2.42)$$



Şekil 2. 35. Bir sandviç yapının kesit görünümü (Carlsson & Kardomateas, 2011)

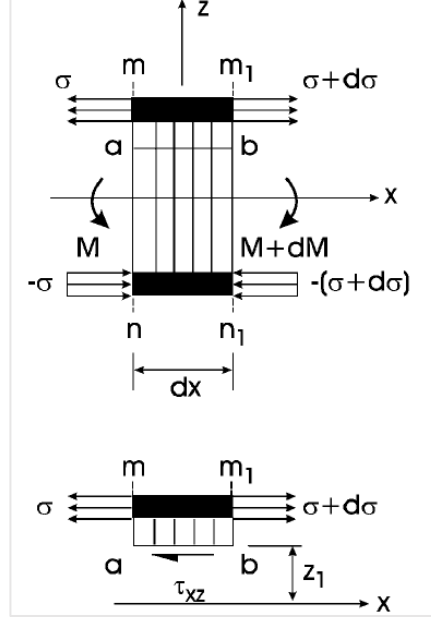
Şekil 2.35’ de kesit görünümü verilen sandviç yapıda, d yüzey plakalarının ağırlık merkezleri arasındaki mesafeyi, h_c ve h_f sırasıyla çekirdek ve yüzey plaka kalınlıklarını ve b ise sandviç genişliğini ifade eder.



Şekil 2. 36. Eğilme momenti altında bir sandviç kiriş elemanı (Carlsson & Kardomateas, 2011)

Sandviç kiriş, şekil 2.36’ da ki gibi uzunluğu boyunca değişen bir eğilme momenti ile yüklenirse, serbest cisim diyagramında, kiriş ekseninde çapraz etkiye sahip bir kesme kuvvetinin olacağını görülmektedir. Bu kesme kuvveti V , Denklem 2.43’de verilmiştir.

$$V = \frac{dM}{dx} \quad (2.43)$$



Şekil 2. 37. Çekirdek kayma gerilmesi hesaplarında dikkate alınan ifadeler (Carlsson & Kardomateas, 2011).

Sandviç çekirdeğini etkileyen kayma gerilimi τ_{xz} , Şekil 2.37' nin alt kısmında gösterilen $mm_1 ab$ elemanının denge hesabı ile elde edilir. Elemanın sol tarafına etki eden σ gerilmesinden kaynaklanan yatay (x eksen) kuvvet Denklem 2.44' de verilmiştir.

$$F_1 = \sigma b h_f = \frac{M}{d} \quad (2.44)$$

Sandviç elamanın sağ tarafına etki eden yatay kuvvet ve ab kesitinde çekirdek yüzeyini etkileyen kayma gerilmesinden kaynaklanan yatay kuvvet sırasıyla Denklem 2.45 ve Denklem 2.46' da verilmiştir.

$$F_2 = \frac{M+dM}{d} \quad (2.45)$$

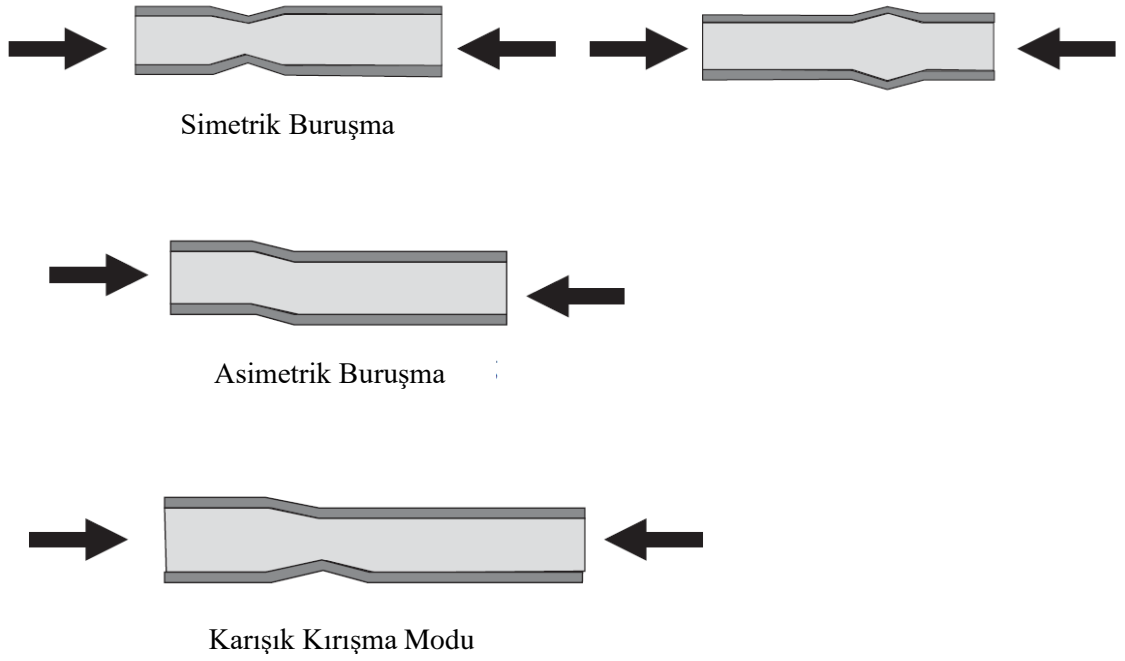
$$F_3 = \tau_{xz} b dx \quad (2.46)$$

$$\tau_{xz} = \frac{dM}{dx} \frac{1}{bd} = \frac{V}{bd} \quad (2.47)$$

Denklem 2.47, çekirdekdeki kayma gerilmesinin üniform (z koordinatından bağımsız) olduğunu gösterir. Kesin analiz, kayma gerilmesinin, yüz/çekirdek ara yüzlerinde $V/(bd)$ değerinden dış yüz yüzeylelerinde sıfıra doğru lineer olarak azaldığını göstermektedir. Ayrıca, çekirdek malzemesi düşük kayma modülüne sahipse, çekirdekdeki kayma deformasyonu aşırı olabilir ve sandviçin genel deformasyonunu doğrudan etkileyebilir. Bu nedenle, sandviç yapılarda aşırı kayma deformasyonunu engellenmelidir. Bunun için yüksek kayma modülüne sahip çekirdek malzeme kullanılmalıdır (Carlsson & Kardomateas, 2011).

2.6.4. Sandviç Malzemelerde Buruşma

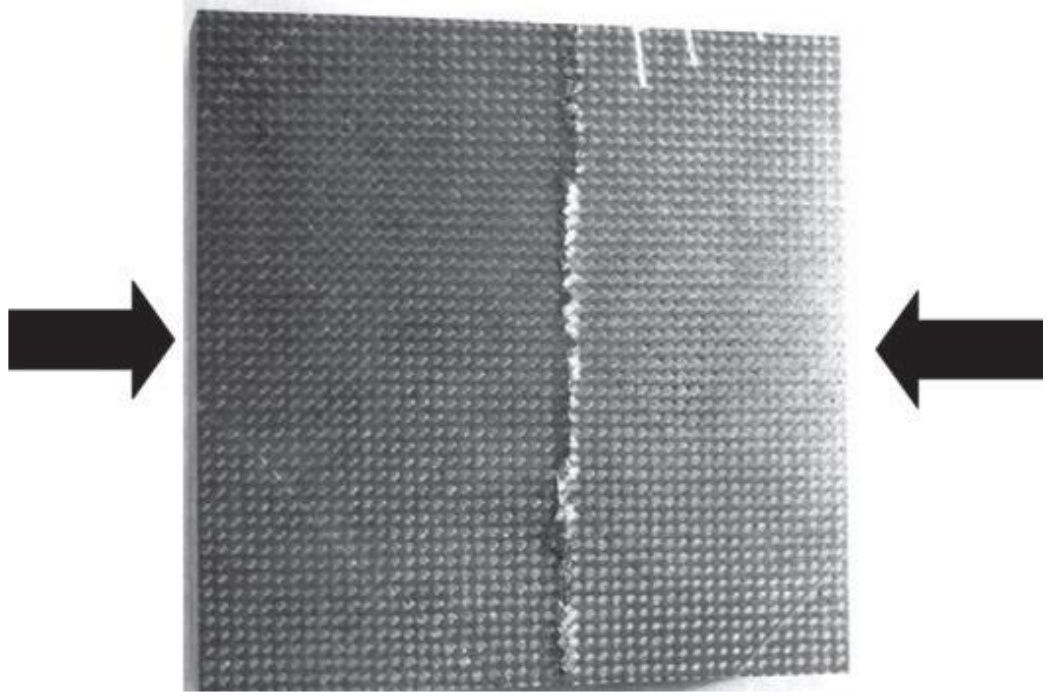
Buruşma, bir sandviçin yüzey tabakasında meydana gelen burkulma olgusudur. Panelin toplam uzunluğu veya genişliği ile ilgisi olmayan, lokal burkulmalar olarak da ifade edilebilir. Simetrik, antisimetrik ve karışık modlu buruşma olmak üzere üç olası mod vardır. Bunlar, yapı üzerinde benzer sıkıştırma için Şekil 2.38' de şematik olarak gösterilmiştir. Buruşma, kesme veya birleşik yükler altında da meydana gelebilir.



Şekil 2. 38. Sandviç buruşma modları (Kassapoglou, 2013)

➤ **Bası Altında Sandviç Buruşması**

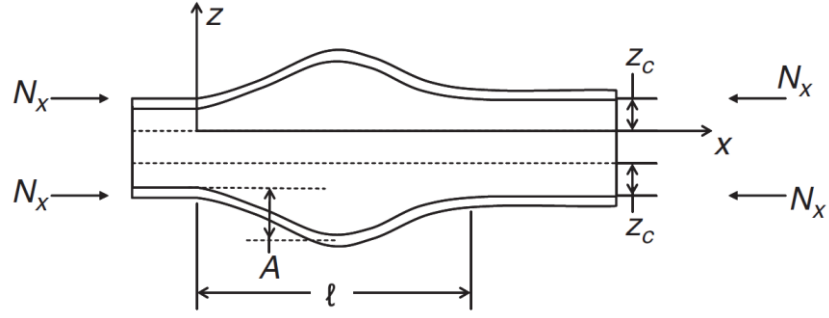
Sandviç numunelerde bası etkisi altında simetrik olmayan buruşmalar meydana gelmektedir. Şekil 2.39' da buruşma hasarı meydana gelen bir sandviç panel görülmektedir.



Şekil 2. 39. Bası testi sonrası buruşma meydana gelen sandviç numune (Kassapoglou, 2013)

➤ **Sandviç Malzemelerde Bası Altında Buruşma**

Yüzey tabakasında buruşmanın meydana gelmesi Şekil 2.40' da gösterilmiştir. Bu şekil, sandviçin genişliği boyunca uzanır (Şekil 2.40' da ki düzleme dik). Sandviçin y yönünde çok uzun olduğu varsayılır. Ayrıca, bükülmüş şeklin kenarlarında, $x = 0$ ve $x = l$ 'de, yüzey tabakasındaki sınır koşullarının basit desteğin koşulları olduğu, yani orada $w = 0$ olduğu varsayılır. Çekirdek ve yüzey tabakası arasında mükemmel bir bağlanma olduğu varsayıldığında, şekil 2.40' da çekirdeğin bükülmüş yüzey tabakası altında deforme olduğu açıktır. Bu durumda çekirdek z yönünde uzanır. Çekirdek çok kalın olsaydı, çekirdeğin orta düzlemine yakın bir yerde çekirdeğin deforme olmayacağı bir bölge olurdu. Bu nedenle çekirdekteki deformasyonlar, yüzey tabakasına yakın bir bölgede sınırlandırılmıştır. Bu bölgenin Z_c genişliğine sahip olduğu varsayılır ve bu noktada Z_c bilinmemektedir. Ayrıca z yönündeki çekirdek sapmalarının z ile doğrusal olarak değiştiği varsayılmaktadır.



Şekil 2. 40. Simetrik buruşmaya maruz kalan sandviçin konfigürasyonu (Kassapoglou, 2013).

Deforme edilmiş yüzey tabakası için basitçe desteklenen uçların ve çekirdek için sapmanın doğrusal varyasyonunu birleştirerek, w denklem 2.48 ile ifade edilmiştir.

$$w = A \frac{z}{z_c} \sin \frac{\pi x}{l} \quad (2.48)$$

Denklem 2.48, $x = 0$ ve $x = l$ 'de $w = 0$ durumunu ifade eder. Ayrıca, w' nin z' nin bir fonksiyonu olarak lineer değişimini $w = 0$ ile $z = 0$ 'da (yani, çekirdek deformasyonlarının önemli olduğu ara yüzde) meydana gelir ve yüzey tabakası sinüzoidal deformasyonunu yeniden üretir. $z = z_c$ durumda ise, çekirdek ön yüz ile kesişmiştir. Buruşma yükü, enerji minimizasyonu ile belirlenir. Buruşma sırasında enerji, yüzey tabakasının bükülmesinde ve çekirdeğin uzatılmasında depolanır. Yani enerji ifadesi denklem 2.49' da ifade edilmiştir.

$$\Pi_c = 2U_f + U_c - 2W \quad (2.49)$$

Burada U_f , her bir yüzey sayfasındaki enerjidir ve U_c , çekirdekte depolanan enerjidir. W , sandviçin bir ucuna uygulanan yükün yaptığı iştir. Bu denklemdeki 2'nin faktörleri, iki (özdeş) yüzey plakasının varlığını açıklar. Yüzey plakası düzlemindeki u ve v deformasyonları ihmal edilerek, denklem 2.50 ve 2.51' de ifade edilen yüzey tabakasındaki gerinim ve gerilme denklemlerden elde edilebilir.

$$\varepsilon_x = -z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (2.50)$$

$$\sigma_x = E_f \varepsilon_f \quad (2.51)$$

Burada E_f , yüzey tabakası membran modülüdür. O halde denklem 2.52:

$$\sigma_x \varepsilon_x = E_f z^2 \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 \quad (2.52)$$

Elde edilir ve yüzey plaka enerjisi denklem 2.53' deki gibi yazılabilir:

$$U_f = \frac{1}{2} \iint E_f z^2 \left[\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 \right]_{z=z_c} dz dx = \frac{1}{2} E_f \bar{I} \int_0^l \left[\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 \right]_{z=z_c} dx = \frac{(E\bar{I})_f}{2} \int_0^l \left[\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 \right]_{z=z_c} dx \quad (2.53)$$

Burada \bar{I} birim genişlik başına yüzey plakasındaki atalet momentidir. Bu ifadenin, simetrik bir yüzey plaka olduğu varsayılarak, sadece D11 teriminin $D11 = EI/b$ ile katkıda bulunduğuna dikkat edilmelidir. Şekil 2.40' da ki düzleme dik olan yüzey plakasının genişliğidir.

Çekirdeğe uygulanan gerinim-deplasman ve gerilim-gerinim ifadeleri denklem 2.54, 2.55, 2.56 ve 2.57' de verilmiştir.

$$\varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (2.54)$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial z} \quad (2.55)$$

$$\sigma_z = E_c \varepsilon_z \quad (2.56)$$

$$\tau_{xz} = G_{xz}\gamma_{xz} \quad (2.57)$$

E_c , z yönünde çekirdek modülüdür ve G_{xz} , çekirdeğin xz düzleminde enine kayma modülüdür. Daha önce de belirtildiği gibi, çekirdeğin u sarması ihmal edilebilir. Daha sonra, yukarıdaki denklemler birleştirilerek denklem 2.58 ve denklem 2.59 elde edilir.

$$\sigma_z \varepsilon_z = E_c \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \quad (2.58)$$

$$\tau_{xz} \gamma_{xz} = G_{xz} \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \quad (2.59)$$

Çekirdeklerde depolanacak enerji ise denklem 2.60' da ifade edilmiştir.

$$U_c = \frac{1}{2} \int_0^l 2 \int_0^{z_c} (E_c \sigma_z \varepsilon_z + G_{xz} \tau_{xz} \gamma_{xz}) dz dx = \int_0^l \int_0^{z_c} \left(E_c \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + G_{xz} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right) dz dx \quad (2.60)$$

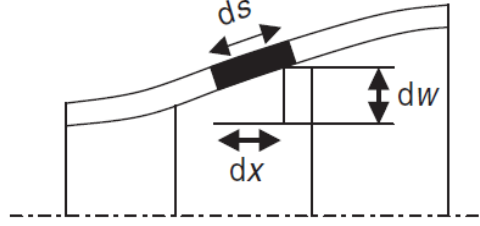
Çekirdek enerjisine katkıda bulunan z_c kalınlığındaki çekirdeğin iki bölümü (biri orta düzlemin üstünde ve biri orta düzlemin altında) olduğundan integralin önündeki 2 faktörüne dikkat edilmelidir. Birim genişliğe düşen yüzey plakasına uygulanan yük olan N_x tarafından yapılan dış iş, denklem 2.61 ve denklem 2.62' de ifade edilmiştir.

$$W = N_x \delta \quad (2.61)$$

$$\delta = l - \int_0^l dx \quad (2.62)$$

δ , $x = 0$ ve $x = l$ de, sandviç kısmının kenarındaki sapmayı ifade eder.

Şekil 2.41’ de gösterilen yüzey tabakasının deforme olmuş şekli göz önüne alındığında, sapma δ pisagor teoremi kullanılarak ve w küçük sapmalar dikkate alınarak hesaplanabilir.



Şekil 2. 41. Yerel bölgede deforme olmuş yüzey plakası (Kassapoglou, 2013).

Pisagor teoremi ile denklem 2.63 elde edilir.

$$(dx)^2 + (dw)^2 = (ds)^2 \text{ ise } dx = ds \sqrt{1 - \left(\frac{dw}{ds}\right)^2} \quad (2.63)$$

Karekökü miktarı, denklem 2.64’ de verilen bir Taylor serisinin ilk iki terimine genişletilebilir (küçük $(dw/ds)^2$ için geçerlidir).

$$\sqrt{1 - \left(\frac{dw}{ds}\right)^2} \approx 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{dw}{ds}\right)^2 \quad \text{for small } \left(\frac{dw}{ds}\right)^2 \quad (2.64)$$

Küçük sapmalar için w denklem 2.65’ de ifade edilmiştir.

$$\frac{dw}{ds} \approx \frac{dw}{dx} \quad (2.65)$$

Bu nedenle, ifadede δ yerine yazılırs:

$$W = \frac{N_x}{2} \int_0^l \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 \Big|_{z=z_c} dx \quad (2.66)$$

Enerji ifadesinde bulunan ilgili w türevleri elde edilir (denklem 2.67).

$$\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 = \frac{A^2 z_c^2}{z_c^2} \frac{\pi^2}{2l^2} \left(1 + \cos \frac{2\pi x}{l}\right)$$

$$\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 = \frac{A^2}{z_c^2} \frac{1}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{l}\right) \quad (2.67)$$

$$\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right)^2 = \frac{A^2 z_c^2}{z_c^2} \frac{\pi^4}{2l^4} \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{l}\right)$$

Denklem (2.49) dönüştürülmüştür. İntegraller değerlendirilerek denklem 2.68 elde edilir.

$$\Pi_c = \frac{\pi^4}{2l^3} (E\bar{I})_f A^2 + \frac{1}{2} \left[\frac{E_c l}{z_c} + \frac{1}{3} G_{xz} z_c \frac{\pi^2}{l} \right] A^2 - N_x \frac{A^2 \pi^2}{2l} \quad (2.68)$$

Denklem 2.68, bilinmeyen A genliğine göre minimize edilmelidir (denklem 2.69).

$$\frac{\partial \Pi_c}{\partial A} = 0 \text{ ise } 2A \left[\frac{\pi^4}{2l^3} (E\bar{I})_f + \frac{1}{2} \left[\frac{E_c l}{z_c} + \frac{1}{3} G_{xz} z_c \frac{\pi^2}{l} \right] - N_x \frac{\pi^2}{2l} \right] = 0 \quad (2.69)$$

A'nın sıfır olmayan değerleri için parantez içindeki miktar sıfır olmalıdır. Bu, buruşma yükü N_x için bir koşul verir. N_{xwr} ile buruşma yükü denklem 2.70' de gösterilmiştir.

$$N_{xwr} = \frac{\pi^2 (E\bar{I})_f}{l^2} + \frac{E_c l^2}{\pi^2 z_c} + G_{xz} \frac{z_c}{3} \quad (2.70)$$

Denklem 2.70 incelendiğinde, sağ taraftaki ilk terimin bir kiriş kolonundaki birim genişlik başına burkulma yükü olduğu görülebilir. İkinci terimde ise, temelin rijitliği $k = E_c/z_c$ eşit olduğunda, elastik bir temel kirişin burkulma yüküne yaptığı katkıdır. Üçüncü

terim, yaylı yaylar yerine burulma yaylarının kullanıldığı elastik temelin katkısıdır. Buruşma yükü için bu ifadede hala iki bilinmeyen vardır: l buruşma sırasında yarı dalga boyu ve z_c buruşma sırasında deformasyona uğrayan çekirdeğin kısmının ifadesidir. N_x sıfırdan artmaya başlarsa ve z_c ' nin bir fonksiyonu olarak Denklem 2.70 'de izin verilen olası en düşük değerde buruşmanın meydana geleceğine dikkat edilmelidir. Bu nedenle, N_{xwr} l ' ye göre en aza indirgenmelidir (denklem 2.71).

$$\frac{\partial N_{xwr}}{\partial l} = 0 \text{ ise } l = \pi \left(\frac{(E\bar{I})_f}{E_c} z_c \right)^{1/4} \quad (2.71)$$

Denklemde l ve z_c ile ilgili bir koşul verilmiştir. Denklem 2.70 'den l çıkarılırsa denklem 2.72 elde edilebilir.

$$N_{xwr} = \frac{2\sqrt{E_c(E\bar{I})_f}}{\sqrt{z_c}} + \frac{G_{xz}z_c}{3} \quad (2.72)$$

Bu ifade z_c cinsindedir. Şimdi z_c ' ye göre uyarlanır ve sonucu 0'a eşitlenirse, denklem 2.73 elde edilir.

$$\frac{\partial N_{xwr}}{\partial z_c} = 0 \text{ ise } z_c = 3^{2/3} \left(\frac{E_c(E\bar{I})_f}{G_{xz}^2} \right)^{1/3} \quad (2.73)$$

Birim genişlik başına atalet momenti (denklem 2.74);

$$\bar{I} = \frac{t_f^3}{12} \quad (2.74)$$

z_c ' nin son halini elde etmek için Denklem 2.74' de yerine koyulursa;

$$z_c = \frac{3^{2/3}}{12^{1/3}} t_f \left(\frac{E_c E_f}{G_{xz}^2} \right)^{1/3} = 0.91 t_f \left(\frac{E_c E_f}{G_{xz}^2} \right)^{1/3} \quad (2.75)$$

Denklem 2.75 elde edilir. Yarım dalga boyu denkleminin son halini elde etmek için denklem 2.69' da yerine konulursa,

$$l = \frac{\pi 3^{1/6}}{12^{1/3}} t_f \left(\frac{E_f}{\sqrt{E_c G_{xz}}} \right)^{1/3} = 1.648 t_f \left(\frac{E_f}{\sqrt{E_c G_{xz}}} \right)^{1/3} \quad (2.76)$$

Denklem 2.76 elde edilir. Buruşma yükünün son halini elde etmek için, Denklem 2.71, denklem 2.72' de yerine yazılırsa.

$$N_{xwr} = 0.91 t_f (E_f E_c G_{xz})^{1/3} \quad (2.77)$$

Denklem 2.77 elde edilir.

Denklem 2.77 birçok farklı yolla elde edilebilir [45]. Aslında varsayımlara bağlı olarak denklemin şekli aynı kalır ve sadece sağ taraftaki katsayı değişir [7]. Şu ana kadar elde edilen ifadelerde, çekirdeğin deformasyona uğrayan z_c kısmının çekirdek kalınlığının $t_c/2$ yarısından daha az veya buna eşit olacak şekilde çekirdeğin yeterince kalın olduğu varsayılmıştır.

Denklem 2.75 ile verilen z_c çekirdek kalınlığının yarısından büyükse, buruşma sırasında tüm çekirdek deforme olur ve

$$z_c = \frac{t_c}{2} \quad (2.78)$$

Denklem 2.78' de elde edilen yeni z_c değeri ile l ve N_{xwr} ' nin yeni değerleri hesaplanmalıdır. Daha önce olduğu gibi aynı yol izlenerek, denklem 2.71' da z_c yerine kullanılır.

$$l = \frac{\pi}{24^{1/4}} \left(\frac{E_f}{E_c} t_f^3 t_c \right)^{1/4} \quad for \quad z_c = \frac{t_c}{2} \quad (2.79)$$

Daha sonra, z_c' nin yeni değeri Denklem 2.72' de yerine yazılarak elde edilir.

$$N_{xwr} = 0.816 \sqrt{\frac{E_f E_c t_f^3}{t_c}} + G_{xz} \frac{t_c}{6} \quad (2.80)$$

Çekirdeğin içlerinde buruşma deformasyonları meydana gelmesi durumu Denklem 2.75' den elde edilebilir. Denklemin sağ tarafı $t_c/2$ 'den büyükse, tüm çekirdek kalınlığı deforme olur. Bu nedenle, eğer,

$$t_c < 1.817 t_f \left(\frac{E_f E_c}{G_{xz}^2} \right)^{1/3} \quad (2.81)$$

Tüm çekirdek deforme olur ve Denklemler (2.78), (2.79) ve (2.80) geçerlidir.

Denklem 2.80 'ye göre çekirdek kalınlığı arttıkça buruşma yükünün azaldığına dikkat edilmelidir. Bu nedenle, belirli bir çekirdek kalınlığının ötesinde buruşmanın birincil başarısızlık modu haline gelmesi beklenir. Ancak, bu sadece denklem 2.81 sağlandığı sürece geçerlidir. Çekirdek kalınlığı Denklem 2.81' in sağ tarafını aştığında, ana denklem, çekirdek kalınlığından bağımsız olan Denklem 2.77 olur.

Simetrik olmayan buruşma için, yukarıda sunulana benzer bir yaklaşım yapılabilir [45]. Ancak farklı sınır koşullarını sağlamak için çekirdeğin w sapması için farklı bir ifadeyle, aşağıdaki denklemler dikkate alınmalıdır.

$$N_{xwr} = 0.51 t_f (E_f E_c G_{xz})^{1/3} + \frac{G_{xz} t_c}{3} \quad (2.82)$$

$$l = 2.15 t_f \left(\frac{E_f^2}{E_c G_{xz}} \right)^{1/6} \quad (2.83)$$

$$z_c = \frac{3}{2} t_f \left(\frac{E_f E_c}{G_{xz}^2} \right)^{1/3} \quad (2.84)$$

Yeterince kalın çekirdek için,

$$t_c \geq 3 t_f \left(\frac{E_f E_c}{G_{xz}^2} \right)^{1/3} \quad (2.85)$$

Veya tüm çekirdek kalınlığı deformasyona uğradığında (çekirdek nispeten incedir),

$$N_{xwr} = 0.59 t_f^{3/2} \sqrt{\frac{E_f E_c}{t_c}} + 0.378 G_{xz} t_c \quad (2.86)$$

$$l = 1.67 t_f \left(\frac{E_f t_c}{E_c t_f} \right)^{1/4} \quad (2.87)$$

Denklemleri elde edilir.

Pratikte, belirli bir uygulama için hem simetrik hem de simetrik olmayan buruşma yüklerinin değerlendirilmesi ve ikisinin en düşük olanı kullanılması gerekir. Bununla birlikte, sadece çok ince çekirdekler için simetrik olmayan buruşmanın mümkün olmaktadır. Standart çekirdek kalınlıkları için simetrik buruşma aynı zamanda bir bozulma modudur.

Simetrik ve simetrik olmayan buruşma tahminlerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması, şimdiye kadar sunulan denklemlerle yapmak zordur. Bunun ana nedeni, sandviç yapının çoğunlukla çekirdek, yapıştırıcı ve yüzey tabakalarının aynı anda birlikte sertleştirilmesiyle üretilmesidir. Bu işlemin bir sonucu olarak, ön yüzler tamamen düz değil, biraz dalgalıdır. Bu dalgalanma, şu ana kadar sunulan analizlere dahil edilmemiştir. Yalnızca yüzey tabakaları ayrı ayrı önceden sertleştirilir ve ardından mükemmel düz bir çekirdek üzerine yapıştırılırsa, dalgalanma ortadan kaldırılacaktır. Bu nedenle, şimdiye

kadar sunulan tahminler, yüzeylerin tamamen düz olduğu sonlu eleman modelleri ile karşılaştırılmıştır (Kassapoglou, Fantle & Chou, 1995).

Dört düz dokuma kumaş katı ve yerleşimi $[(\pm 45) / (0/90)_2 / (\pm 45)]$ ile yapılmış 25,4 mm petek çekirdekli ve yüzey tabakalı bir sandviç, sonlu elemanlar kullanılarak basma altında modellenmiştir. Yüzey tabakası sertliği E_f 64 GPa'dır. Çekirdek kalın olduğu için sadece simetrik buruşma tahminleri kullanıldı. İlgili çekirdek özellikler ve denklemler (2.74) ve (2.75)'den bir karşılaştırma veya tahmin, aynı bilgi sayfasına sahip üç farklı çekirdek malzeme için çizelge 2.7'de gösterilmektedir.

Çizelge 2. 6. Sandviç panel buruşmasında sonlu elemanlar analizlerine karşılık analitik tahminler.

| E_c | G_{xz} | $\frac{N_{xwr}}{t_f}$ (MPa) | $\frac{N_{xwr}}{t_f}$ (MPa) | $\Delta(\%)$ | l (mm) | l (mm) | $\Delta(\%)$ |
|-------|----------|-----------------------------|-----------------------------|--------------|----------|----------|--------------|
| | | Mevcut | FE | | Mevcut | FE | |
| 133 | 42 | 646 | 658 | -1.8 | 11.3 | 22.4 | -0.9 |
| 266 | 42 | 842 | 1033 | -18.5 | 9.5 | 8.9 | +6.7 |
| 133 | 84 | 808 | 821 | -1.6 | 10.6 | 13.2 | -19.7 |

Buruşma gerilimi N_{xwr}/t_f ve karşılık gelen yarım dalga boyu l için tahminlerde, en yüksek tutarsızlığın %20'den az olduğu sonlu elemanlarla iyi bir uyum içinde olduğu görülebilir. Öngörülen buruşma yüklerinin her zaman sonlu elemanlar sonucundan daha az olduğuna dikkat edilmelidir. Ayrıca, buruşma gerilmesindeki en büyük farklılık (durum 2), yarım dalga boyunda en büyük farklılığın olduğu duruma (durum 3) karşılık gelmez. Tutarsızlıklar, uygun yük girişi ve sınır koşulları ile ilgili sonlu eleman modelleme konularının bir kombinasyonuna ve Denklem (2.47)'nin bir yaklaşım olduğu gerçeğine, özellikle de düzlem dışı koordinat z ile varsayılan lineer varyasyonu dikkate alınmalıdır.

Şimdiye kadar verilen ifadeler de ön yüzlerde kompozit malzeme kullanım durumunu açıkça açıklamadı. Sadece yüzey tabakasında düzlem içi sertliği E_f için uygun değerlerin türetilen denklemlerde yerine yazılmasıyla kompozit laminatlar hesaba katılabilir.

Yüzeyde kompozit plakaların kullanılması durumunda E_f için daha doğru değerler denklem 2.88.' da kullanılabilir.

$$E_f = \frac{12(1-\nu_{xy}\nu_{yx})D_{11f}}{t_f^3} \quad (2.88)$$

Burada ν_{xy} , ν_{yx} ve D_{11f} , kompozit yüzey tabakanın Poisson oranları ve eğilme rijitliğidir.

Kompozit yerleşimleri içeren diğer modeller literatürde bulunabilir. Örneğin simetrik buruşma Pearce ve Webber [48] tarafından denklem 2.89 ile belirlenmiştir:

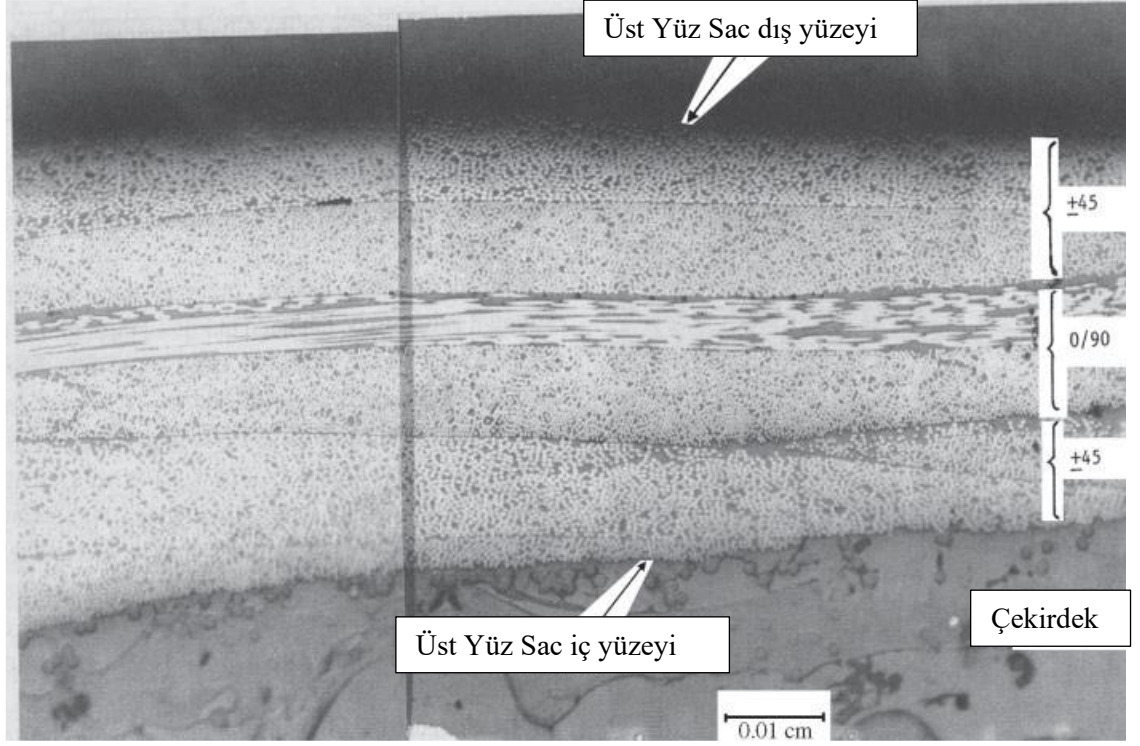
$$N_{xwr} = \frac{\pi^2}{a^2} \left[(D_{11})_f m^2 + 2((D_{12})_f + 2(D_{66})_f) \left(\frac{a}{b}\right)^2 + \frac{(D_{22})_f}{m^2} \left(\frac{a}{b}\right)^4 \right] + \frac{2E_c a^2}{m^2 \pi^2 t_c} \quad (2.89)$$

Denklem 2.89 incelendiğinde, buruşma yükünün iki kısımdan oluştuğunu, yüzey tabakasının burkulma yükünün ve $k = 2E_{c/t_c}$ yay sabiti ile elastik olarak hareket eden çekirdek katkısının olduğunu göstermektedir. Denklem 2.89' un ilk kısmı, basınç altında basit bir şekilde desteklenen bir plakanın burkulma yükü ile aynıdır.

Son olarak, denklem 2.89 ile daha önce elde edilen buruşma ifadesi (denklem 2.66) karşılaştırıldığında, ön yüzün bileşik olduğu dâhil edilmeden, denklem 2.66' in ilk iki terimi ile bire bir örtüştüğü görülmektedir. İlk terim, bilgi formunun burkulmasına ve ikincisi, elastik bir temel görevi gören ve z yönünde deformasyonda enerji depolayan çekirdeğe karşılık gelir. Ancak Denklem 2.66, çekirdek kayma deformasyonlarını temsil eden çekirdek kayma rijitliğine bağlı ek bir terime sahiptir. Bu terim Denklem 2.89' da bulunmamaktadır. Bu nedenle, çekirdek kayma deformasyonları fark edilebilir olduğunda Denklem 2.89' un o kadar doğru olması beklenmemektedir.

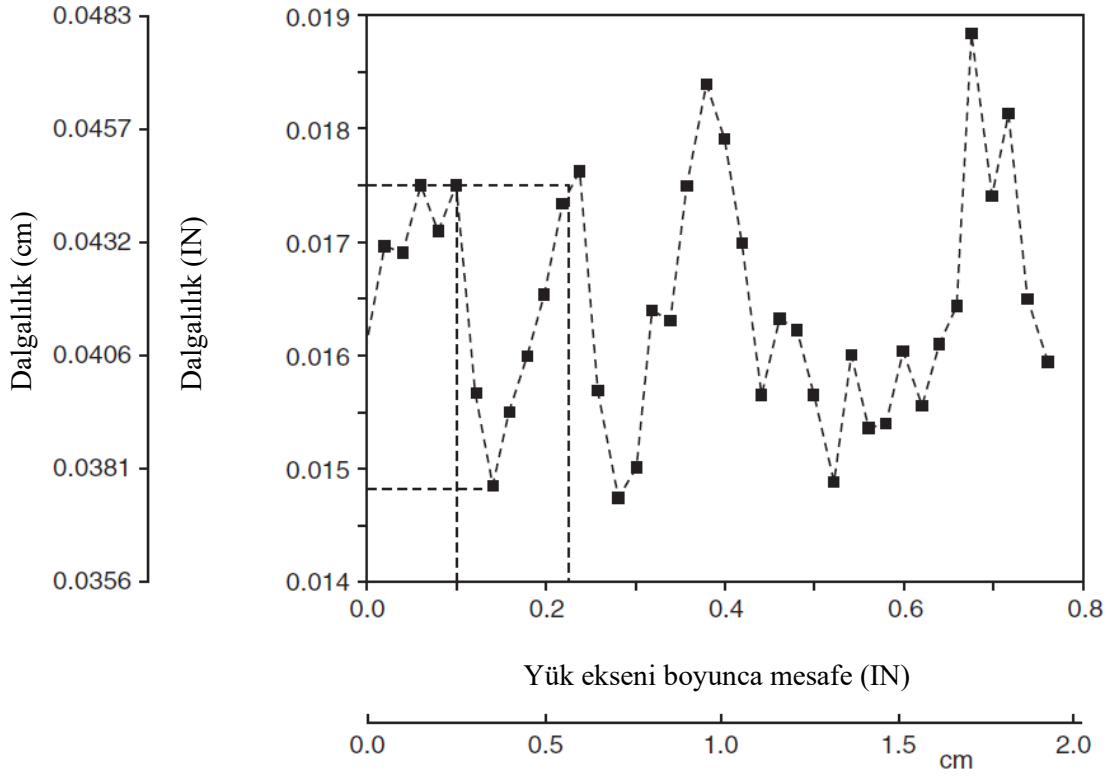
Daha önce ifade edildiği gibi, çekirdek malzemesi ve yüzey plakalarından meydana gelen sandviç yapılar yekpare davranış sergilerler. Yüzey plakasındaki dalgalanmalar sandviç sertliğini artırabilir ve sandviçin performansını önemli ölçüde etkileyebilir. Bu durumda

şimdiye kadar sunulan tasarım denklemlerinin kullanılabilirliği sınırlanabilir. Dalgalanmanın etkisini dâhil etmeye yönelik bir girişim Kassapoglou ve arkadaşlarının çalışmasında ifade edilmiştir. Petek çekirdek üzerindeki bir $[(\pm 45)/(0/90)/(\pm 45)]$ plakasının kesiti Şekil 2.42' de gösterilmektedir (Kassapoglou ve ark., 1995).



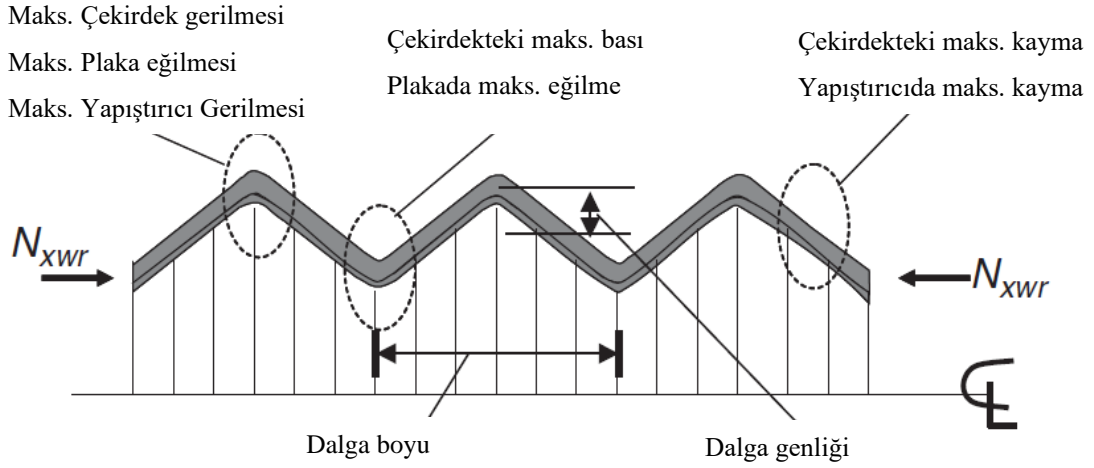
Şekil 2. 42. Yüzey plakasını ve çekirdeğin bir kısmını gösteren sandviç enine kesiti (Kassapoglou, 2013).

Şekil 2.42' de kesiti verilen numunenin yüzey tabakasından dalgalanma ölçülmüş ve şekil 2.43' de çizilmiştir. Şekil 2.43' de dalgalanmanın önemli olabileceği ve genliğinin dörtte bir ile üçte biri oranına yaklaşabileceği görülmektedir. İncelenen yüzey plakası kalınlığı $t_f = 0,5717$ mm dir.



Şekil 2. 43. Yüzey plakasının dış yüzeyindeki dalgalanma (Kassapoglou, 2013).

Şekil 2.43’ de elde edilen dalgalanmalarda bir rastgelelik unsuru vardır. Fakat belirli bir genlik ve dalga boyunun ana sinüzoidal bileşeni tahmin edilebilir. Kompozit yüzey plakasının her yerde mevcut olduğu varsayılarak, dalgalılığını hesaba katan bası altında yeni bir yüzey plakası deformasyon modeli oluşturulabilir (Kassapoglou ve ark., 1995). Bu model, Şekil 2.44’ de şematik olarak gösterilen yüzey tabakasının sinüzoidal bir şeklini varsayar. Bu model, Şekil 2.44’ de açık gri renk olarak gösterilen yüzey plakasının, koyu gri renk olarak gösterilen yapıştırıcının ve çekirdeğin ve bunların ilgili arıza modlarının varlığını nispeten kolay bir şekilde hesaplanmasına katkıda bulunur. Model, şekil 2.44’ de gösterilen dalgalanmanın sandviçin kenarlarına kadar uzandığını varsayar.



Şekil 2. 44. Sandviç dalgalanması (Kassapoglou, 2013).

Şekil 2.44’ de gösterilen hasar modlarının her biri, çekirdek gerilimi, çekirdek sıkıştırması, çekirdek kayması, yapışkan gerilimi, yapışkan kesme ve yüzey levhası eğilmesi için kontrol edilmelidir ve en kritik gerilmeye sahip olan gelirme, arıza tahminini verecektir. Bu, karşılık gelen izin verilenler hakkında doğru bilgi gerektirir. Böylelikle karışıklık ortadan kaldırılabilir.

Çizelge 2. 7 Elde edilen buruşma tahminleri ve test edilmiş dalgalı model sonuçlarının karşılaştırılması (Kassapoglou, 2013).

| Plaka Dizilimi | Çekirdek | Öngörülen Buruşma Gerilmesi (MPa) | Test Buruşma Gerilmesi (MPa) | Δ (%) |
|--|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|--------------|
| (± 45)/(0/90) | Nomex [®] HRH 10-1/8-3.0 | 295 | 313 | -5.8 |
| (± 45)/(0/90)/(± 45) | Nomex [®] HRH 10-1/8-3.0 | 264 | 297 | -11.2 |
| (± 45)/(0/90) ₂ /(± 45) | Nomex [®] HRH 10-1/8-3.0 | 426 | 337 | +26.4 |
| (± 45)/(0/90) | Phenolic HFT 3/16-3.0 | 344 | 350 | -1.8 |
| (± 45)/(0/90)/(± 45) | Phenolic HFT 3/16-3.0 | 255 | 349 | -26.9 |
| (± 45)/(0/90) ₂ /(± 45) | Phenolic HFT 3/16-3.0 | 309 | 382 | -19.0 |
| (± 45)/(0/90)/(± 45) | Korex [®] 1/8-3.0 | 246 | 365 | -32.7 |

Kassapoglou ve arkadaşlarının çalışmasından (Kassapoglou ve ark., 1995) alınan test sonuçlarıyla bu modelin bir karşılaştırması çizelge 2.7’ de gösterilmektedir. Burada üç

farklı plaka yerleşimi ve üç farklı çekirdek kullanıldı. Çizelgede sonuçlar ve karşılaştırılmaları verilmektedir. Test sonuçlarındaki farklılıkların ana nedenleri şunlardır:

(a) Yukarıda bahsedilen arıza modları için izin verilenlerin bilgilerin çok doğru olmaması, ve

(b) Her durumda, Şekil 2.42' den elde edilen bir genlik ve dalgalılık kullanılmıştır. Bu, Çizelge 2.8' de bazı çekirdek ve yüzey plakası yerleşimleri için yeterince doğru değildir.

Yine de bir dalgalanma modeli kullanmak umut vericidir ve doğru veriler ve ifadeler kullanılarak çok güvenilir tahminler elde edilebilir. (Genellikle bilinmeyen) dalgalılık ve diğer karmaşık faktörlerin etkisini hesaba katmak için, denklem 2.77' in sağ tarafındaki katsayıyı azaltarak simetrik buruşma için denklem 2,90 olarak yazılmıştır.

$$N_{xwr} = 0.43t_f(E_f E_c G_{xz})^{1/3} \quad (2.90)$$

Benzer şekilde, sadece ince çekirdeklerde meydana gelen simetrik olmayan buruşma için, denklem 2.86, denklem 2.90 gibi değiştirilir [49]:

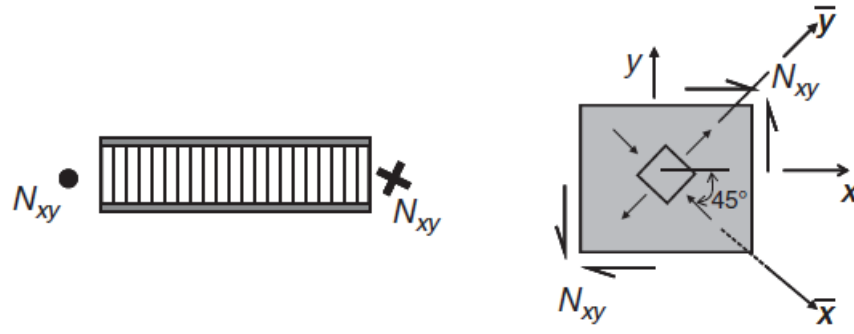
$$N_{xwr} = 0.33t_f E_f \sqrt{\frac{E_c t_f}{E_f t_c}} \quad (2.91)$$

Denklem 2.90 ve 2.91, metaller de dâhil olmak üzere çok çeşitli yüzey plakası ve çekirdek malzemeleri üzerinde kullanışlı olduğu bilinmektedir (Sullins ve ark., 1969).

Şimdiye kadar sunulanlar, sandviç buruşma modelleme yaklaşımlarının sadece küçük bir kısmıdır. Her biri kendi uygulanabilirlik alanına sahip daha birçok model mevcuttur.

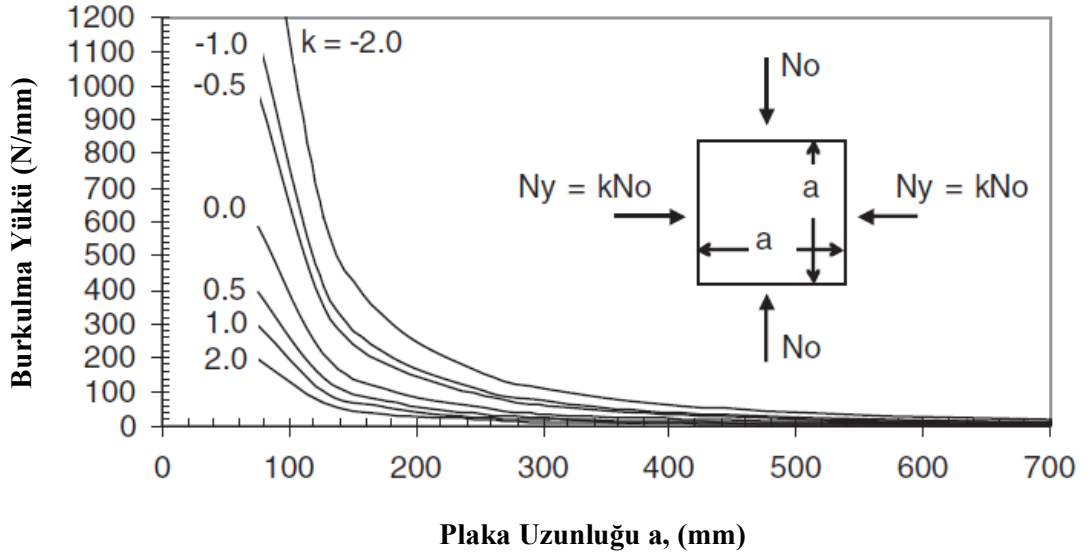
➤ Sandviç Malzemelerde Kayma Altında Buruşma

Uygulanan kayma yükü altında bir sandviç yapıda buruşma meydana gelebilir. Saf kayma bir yönde sıkıştırma ve diğer yönde çekme ile çözümlenebilir. Şekil 2.45' de bası kısmında, uygulanan kayma yüküne göre 45°'lik bir çizgi boyunca sandviçin buruştuğu görülmektedir.



Şekil 2. 45. Kayma yükü altındaki sandviç numunenin bası ve çekme yükleri dâhilinde analizi (Kassapoglou, 2013).

Bası altında buruşma yükünü tahmin etmenin yolu, sandviçi 45° çizgisi boyunca basınç altında yüklenmiş olarak analiz etmek ve çekme yükünü ihmal etmektir. Bunun nedeni, basma ve çekme ile çift eksenli yükleme durumlarında, çekme yükünün yapıyı stabilize etme eğiliminde olması ve burkulma yükünün sadece basma uygulanan duruma göre daha yüksek olmasıdır. Bu, Şekil 2.46' da burkulma yükünün çift eksenli bası haline göre bası ve çeki halinin daha yüksek olduğu gösterilmiştir.



Şekil 2. 46. Plaka boyutu ve çift eksenli yükleme oranı N_y/N_x ' in bir fonksiyonu olarak kare yarı izotropik bir plakanın burkulma yükü (Kassapoglou, 2013).

Bu nedenle, ilgili E_f , E_c ve G_{xz} değerlerinin uygulanan bası yönüne döndürülmesiyle, bası altında buruşma için türetilen denklemler burada da kullanılabilir. Bunlardan, z yönündeki çekirdek Young modülü E_c etkilenmeden kalır. Yüzey plaka modülü E_f , istifleme dizisini bu açıyla basitçe döndürerek o yönde elde edilen laminatın membran modülü hesaplanarak 45° döndürülür. Çekirdek kayma modülü G_{45} , eğer çekirdek kendi düzleminde izotropik değilse de değişikliğe uğrar. Böylece, xy koordinat sisteminde, x eksenine paralel bası ile, döndürülen çekirdekteki kesme rijitlikleri denklem 2.92' daki gibi hesaplanır.

$$G_{\bar{x}z} = \sin^2 \theta G_{yz} + \cos^2 \theta G_{xz} = \frac{G_{yz} + G_{xz}}{2} \quad \text{for } \theta = -45^\circ \quad (2.92)$$

$$G_{\bar{y}z} = \cos^2 \theta G_{yz} + \sin^2 \theta G_{xz} = \frac{G_{yz} + G_{xz}}{2} \quad \text{for } \theta = -45^\circ$$

➤ **Sandviç Malzemelerde Kombine Yükler Altında Buruşma**

Birleşik yükler altındaki buruşma, monolitik plakaların burkulması için etkileşim eğrilerine benzer şekilde analiz edilir. En yaygın durumların özeti çizelge 2.9' da verilmiştir. Çizelge 2.9' u kullanmak için denklem 2.93 ve denklem 2.94' deki oranlardan yararlanılabilir.

Sadece bası için,

$$R_c = N_x / N_{xwr} \quad (2.93)$$

Tek başına kesme için,

$$R_s = N_{xy} / N_{xywr} \quad (2.94)$$

Kullanılır. Burada N_{xwr} , bası altındaki buruşma yüküdür.

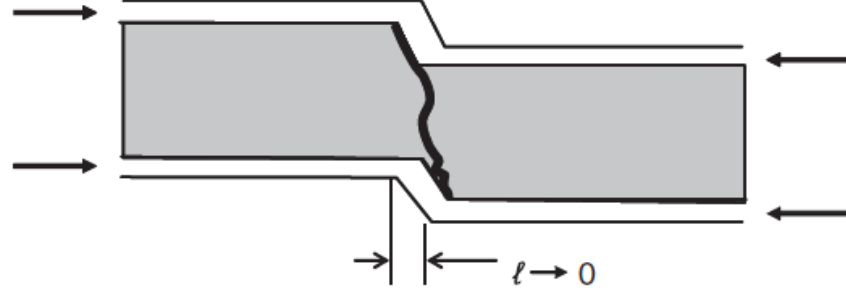
Çizelge 2. 8. Kombine yükler altında sandviç buruşması için etkileşimler (Kassapoglou, 2013).

| Durum | Yükleme | Tasarım Denklemi |
|---|---------|---|
| Çift eksenli bası | | $N_x = \frac{N_{xwr}}{\left(1 + \left(\frac{N_y}{N_x}\right)^3\right)^{\frac{1}{3}}}$ |
| X ekseninde bası ve Y ekseninde çeki | | $N_x = N_{xwr}$ |
| Kombine bası ve kayma | | $R_c = R_s^2 = 1$ |
| Çift eksenli bası ve kayma | | $R_c + R_s^2 = 1$ $R_c = N_y / N_{xwr}$ $R_s = N_{xy} / N_{xywr}$ $N_{xwr} \text{ buruşma yükü}$ |
| X ekseninde bası, Y ekseninde çeki ve kayna | | $R_c + R_s^2 = 1$ $R_c = N_x / N_{xwr}$ $R_s = N_{xy} / N_{xywr}$ $N_{xwr} \text{ buruşma yükü}$ |

2.6.5. Sandviç malzemelerde kıvrılma

Bu arıza çeşidi şekil 2.47' de gösterilmiştir. Çekirdek kayma sertliği çok düşük olduğunda ve çekirdek merkezlerinde sapmanın olduğu durumlarda (örneğin, çekirdek kalınlığı tekdüze olmadığında veya birçok kat atıldığında yüzey tabakası kalınlığında ani bir

değişiklik olduğunda) ortaya çıkar. Bu, esasen sıfır dalga boyunda ($l \rightarrow 0$) simetrik olmayan kırışmaya benzer bir arıza çeşididir.



Şekil 2. 47. Sandviç kıvrılması (Kassapoglou, 2013).

➤ Bası Altındaki Sandviç Malzemelerde Kıvrılma

Burkulma modunun dalga boyu l sıfıra eğilimliyse, burkulma yükü $1/12$ ile orantılı olduğu için karşılık gelen burkulma yükü sonsuz olma eğilimindedir. Daha sonra, bası altındaki bir sandviç için temel burkulma denklemi denklem 2.35 kullanılabilir:

$$N_{xcrit} = \frac{N_{Ecrit}}{1 + \frac{N_{Ecrit}}{t_c G_c}} \quad (2.35)$$

➤ Kayma Altındaki Sandviç Malzemelerde Kıvrılma

Bu durumda, bir yarı deneysel formül kullanılır (denklem 2.95)

$$N_{xycrit} = t_c \sqrt{G_{xz} G_{yz}} \quad (2.95)$$

Burada G_{xz} ve G_{yz} yöne bağlı olarak uygulanan yüküdür.

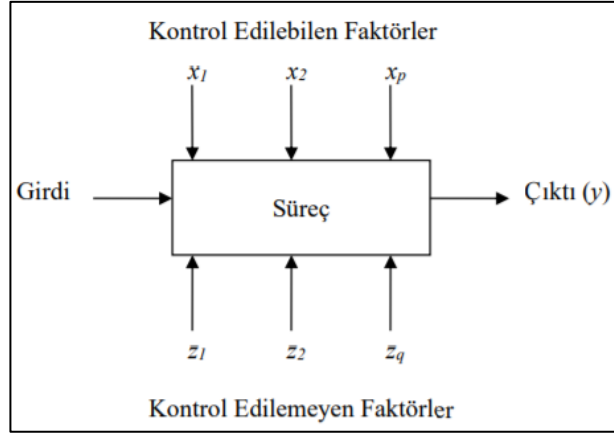
2.7. Deneysel Tasarım Yöntemi

Deneysel tasarım (Design of Experiment, DoE), deney yaklaşımlarının geliştirilmesine, giriş-çıkış faktörlerinin ve deneyin işlem değişkenlerinin iyileştirilmesine imkân sağlamaktadır (Buruk Şahin, Aktar Demirtaş & Burnak, 2016). Bu anlamda deney boyunca toplanan verilerden elde edilen bilgilerin, bu veriler arasındaki etkileşimini de inceleyerek deney için planlama stratejisi oluşturulmaktadır. Bir deney için oluşturulan, bağımlı ve bağımsız değişkenler arasında matematiksel modeller elde edilerek deneme seti oluşturulur. Bu deneme seti sonucu oluşan matematik modeller sayesinde deneylerin değişkenleri arasında yorum yapılabilir, tahminde bulunulabilir ve optimizasyon sağlanabilmektedir. Deneysel tasarım yönteminin önemli avantajlarından biri, deney değişkenlerine bağlı olarak daha az deney sayısı ile çıkarımda bulunmaktadır. Böylece iş gücü ve malzeme tasarrufu sağlayarak yararlı olmaktadır.

Deneysel tasarımın, tam faktöriyel, kısmi faktöriyel, Plackett-Burman, Box-Behnken, karışım, Taguchi, vb. gibi birçok tasarımı mevcuttur (Santos, Rato & Reis, 2019) . Bu tasarım sonucu elde edilen sonuçların varyans analizi (ANOVA) yapılarak, verilerin güvenilirliği ve deneyin faktörleri arasındaki ilişkiler ortaya çıkmaktadır. Bunun yanında ANOVA analizi sonrası, optimizasyon ile çıktının istenilen özelliklerde olması için gereken optimum değerler bulunmaktadır.

Deney tasarımı, üretim sürecini iyileştirmek amacıyla, bu süreci etkileyen faktörler üzerinde değişikliklere gidilerek, sürecin çıktısındaki değişkenliklerin elde edilmesi ve yorumlanmasıdır.

Bir süreçteki değişkenler ve değişkenlerin bileşenleri Şekil 2.48' deki gibi gösterilmektedir.



Şekil 2. 48. Bir sürecin genel modeli (Montgomery, 2013).

Süreç, ürün veya hizmet gibi çıktıların elde edilmesi amacıyla birbirleriyle etkileşim halinde bulunan malzeme, makine ve insan gibi kaynakların kullanıldığı faaliyetler dizisi olarak ifade edilmektedir. Deney değişkenleri veya faktörler ise deney sonucunu etkileyen kontrol edilebilen veya edilemeyen tasarım değişkenleridir.

Sürece etki eden faktörlerin bazılarının istenildiği gibi değer ataması yapılabilir ve sürecin işleyişi boyunca bu değerler sabit olarak tutulabilir. Bu tip faktörlere kontrol edilebilen faktörler denir. Kullanılan malzeme tipi, makine ayarları, üretim yöntemi vb. faktörler kontrol edilebilen faktörlerdir. Ortamdaki nem miktarı, sıcaklık gibi çevresel faktörler her ne kadar ölçülebilir isede, bu faktörlerin sürecin işleyişi esnasında sabit olarak tutulmaları çok zor veya imkânsızdır. Bu tip faktörler ise kontrol edilemeyen faktörler olarak isimlendirilmektedir.

2.7.1. Deneysel tasarımın amacı

Deney tasarımının amacı genel olarak bir çalışma süreci hakkında toplanan bilgilerin, kalite özelliklerinin belirlenmesi ile kalitede iyileştirmeye gidilmesidir. Sonuç olarak hangi faktörlerin hangi değerlerde olması gerektiği tespit etmektedir. Böylece optimum faktör seviyeleri belirlenmiş ve süreçten beklenen performansın artırılmaktadır.

Deney tasarımı amaçları aşağıda verilmektedir (Montgomery, 2013):

1. Çalışmada değişken üzerinde etkisi fazla olan faktörlerin belirlenmesi,
2. İlgilenilen değişkenin hedeflenen seviyelere yaklaştırılması için kontrol faktörlerinin belirlenmesi,
3. İlgilenilen değişkenin hedef değerden sapmasını en aza indirecek kontrol faktörlerinin belirlenmesi,
4. İlgili değişkenin istenilen seviyelere ulaşmasını etkileyen, kontrol edilemeyen faktörlerin belirlenmesi ve etkilerinin azaltılması.

Deney tasarımı yeni geliştirilen süreçlerde ve geliştirilmiş süreçlerin verimliliğinin artırılmasında çok önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle, sürecin kontrol edilemeyen dış etkilere karşı istenilen performansı göstermesi olarak ifade edilen robust (sağlam) tasarımların geliştirilmesinde deneysel tasarım yöntemleri yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Montgomery, 2013).

2.7.2. Deney tasarımının uygulama alanları

Deney tasarımı ile bir süreç ve sürecin ilerleyişi hakkında bilgi toplanmaktadır. Bu nedenle farklı deney tasarımları birçok alanda yaygın biçimde kullanılmaktadır.

Deney tasarımı, mühendislikte genellikle imalat süreçlerinde performans geliştirme amacıyla kullanılan kritik öneme sahip kalite iyileştirme yöntemidir. Ayrıca deney tasarımı yeni üretim süreçlerinin geliştirilmesinde ve geliştirilen süreçlerin optimize edilmesinde de kullanılmaktadır. Deney tasarımı teknikleri ile bir sürecin ilerleyişinde aşağıdaki katkılar elde edilmektedir (Montgomery, 2013):

1. Çıktı miktarı artırılır,
2. Süreç değişkenlerinde azalma sağlanır,
3. Zaman tasarrufu sağlanır,
4. Maliyetler azaltılabilir.

Deney tasarımı teknikleri mühendislik tasarım ve uygulamalarında da önemli bir role sahiptir. Bu teknikler, mühendislik tasarımında:

1. Tasarım konfigürasyonlarının geliştirilmesi ve alternatif konfigürasyonlar ile karşılaştırılmasında,
2. Alternatif üretim ve malzeme çeşitliliğinde,
3. Üretim için gerekli tasarım parametre teşhisine,

Yaygın olarak uygulanmaktadır (Montgomery, 2013).

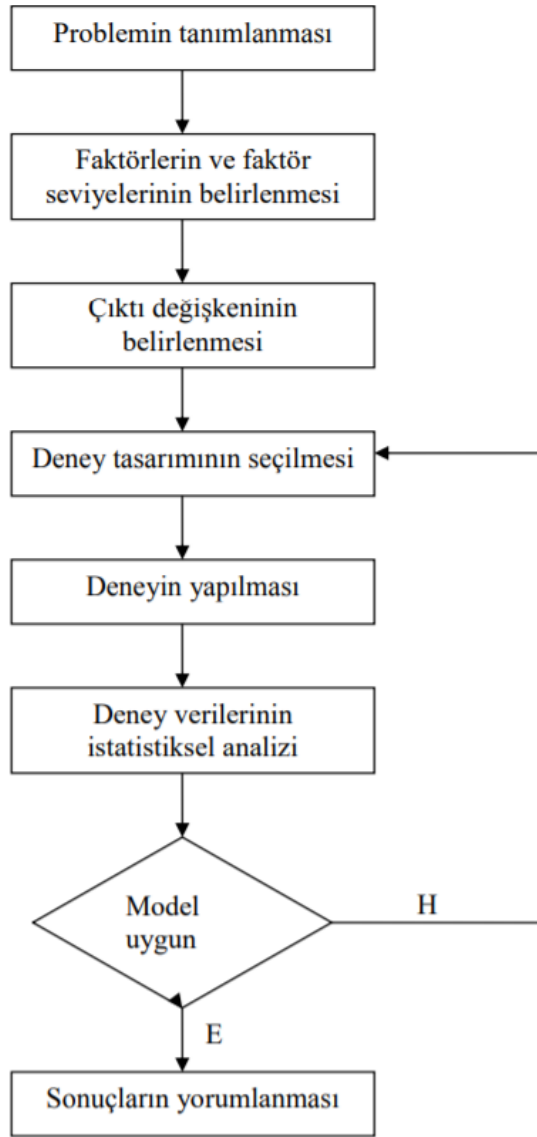
2.7.3. Deney tasarımının uygulanması süreci

Deneysel tasarım uygulama süreci şekil 2.49' da şematik olarak verilmektedir.

Deney tasarım uygulamalarında öncelikle geliştirilmesi istenen problem tanımlanması adımıdır. Bu adımda deney amacı ve hedeflenen çıktılar ile ilgili tüm bilgiler toplanarak, açık bir şekilde tanımlanır. Geliştirilecek ürüne göre üretim aşamaları ve birimlerinden tüm birimlerden gerekli tüm bilgilerin alınmalıdır. Böylelikle problemin açıkça ortaya konularak, gerekli çözüm veya geliştirme aşamalarına geçilebilir.

Problem için gerekli bilgilerin toplanmasıyla ilgili sürece etki eden faktörler ve bu faktörlerin seviyeleri belirlenmelidir. Bu aşamada incelenecek faktörlerin nasıl kontrol edileceği ve nasıl ölçüleceği belirlenebilir. Bu aşamanın ardından çıktı değişkenleri belirlenebilir.

Sonraki aşamada, problemin amacı doğrultusunda uygulanacak deneysel tasarım yöntemine karar verilir. Belirlenen yöntem adımlarında tekrar sayısı seçimi, deney uygulama sırası seçimi, bloklama gereksinimleri ortaya konmaktadır. Deney tasarımının belirlenmesindeki en önemli parametre deneyin amacıdır (Demir, 2004).



Şekil 2. 49. Deney tasarımının uygulama süreci (Montgomery, 2013).

Bu çalışmada önceden oranları belirlenmiş karışım için karışıma etki eden maddelerin etkileşimi analiz edilmiştir. Sayısal analiz ile istenilen değerlerde çıktı için optimizasyon verileri belirlenmiştir.

2.8. Kaynak Araştırması

Dinamik çapraz bağlayıcılar sayesinde kendi kendini iyileştiren polimerler, son yıllarda oldukça dikkat çekmeye başlamıştır (Li, Zhong, Liu, Rong, Yang, Zhou, Shen, Gao & He, 2020). Bu polimerlerden epoksi reçineler en sık kullanılan termoset malzemelerdendir. Epoksi reçineler, üstün mekanik ve elektriksel özelliklere sahip, makul termal davranış gösterebilen ısı ile sertleşen termoset reçinelerdir. Ayrıca, mükemmel kimyasal ve nem direncine sahip olması ve farklı yüzeyler üzerinde iyi bir yapışma özelliği yapısal uygulamalarda kullanımına olanak sağlamaktadır (Xie & Rousseau, 2009). Bu özelliklerinden dolayı epoksi reçineler, fiber takviyeli kompozitlerin matris malzemesinde, elektronik malzemelerde, yapıştırıcılarda ve kaplama teknolojisinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Jin, Li & Park, 2015).

Endüstride sıklıkla kullanılan epoksi matrisli malzemelerin ani sıcaklık değişimi, aşırı yüklenme gibi durumlarda yapısında mikro çatlakların oluşabilir. Çevresel etkilere karşı daha duyarlı hale gelen bu çatlaklar nemin de etkisiyle hızlı bir şekilde genişleyebilir. Bundan dolayı mikro çatlaklar, performans kaybına ve yapının bozulmasına neden olabilir. Bu durum, polimer kompozitlerin mekanik davranışlarını olumsuz yönde etkiler. Sonra belli bir süre sonunda da malzemenin işlevini tamamen kaybetmesine neden olabilmektedir. Bununla birlikte kompozitlerin iç yapısındaki heterojenlikten dolayı oluşan çatlakın tespit edilmesi zorlaşır. Tespit edilemeyen hasarın onarılması ise çok güçtür. Bu sebeple kendi kendine iyileşen ajanların matris içerisinde kullanılmaktadır. Böylece yapının kullanım ömrü ve yapısal kararlılıkları artırılmaktadır (Sun, Shen, Peng, Fan, Liu & Wu, 2019).

Kendi kendini iyileştiren polimer kompozitler, uzun süreli kullanımlarda mikro çatlaklardan veya hasarlardan kolayca kurtularak malzemenin ömrünü uzatabilmesi mümkündür. Literatürde kendi kendine iyileştirme üzerine çok fazla çalışma yapılmıştır. Yapılan incelemelerde, kapsüllenme yoluyla kendi kendini iyileştirmenin,

daha fazla çatlak genişliğini iyileştirebildiği ve çatlığa daha hızlı yanıt verdiği görülmüştür. Değerlendirilen bu sistemin, daha yüksek kalitede kendi kendine iyileşme sağlama potansiyeline sahip olduğu sonucuna varılmıştır (Souradeep & Kua, 2016).

Kapsül formunda iyileştirici ajanlara sahip olan kendi kendini iyileştirebilen kompozitleri (Chen, Fang, Li, Gao, Lu & Xu, 2020), oluşan hasarı her noktada otonom olarak onarmak için tasarlanmıştır (Jin, Mangun, Stradley, Moore, Sottos & White, 2012; Birjandi Nejad, Garrison & Mather, 2016; Zhang, Liu, Pan & Li, 2018). Bu malzemelerin geliştirme aşamalarında doğadan ilham alınmıştır. Dışsal iyileşme (Yan, Min, Ming, Chen, Gui & Xue, 2008) ve içsel iyileşme (Hu, Zhang, Lu, Yuan, Zhang, Liu, Shao, Guo & Huang, 2018) olarak iki farklı iyileşme mekanizmalarına sahip epoksi reçineler geliştirilmiştir. Böylece, hizmet ömrünü uzatan yapılar elde edilmiştir. İçsel iyileşmede ise kovalent bağların yeniden oluşmasıyla hasarın onarılması ile tersinir bir sistemin oluşması söz konusudur (Chang, Panhwar & Zhao, 2020). Dışsal iyileşmenin gerçekleştiği sistemlerde ise, epoksi reçine matris içine kapsüllerin yerleştirilmesi esas alınır. Darbe yüklemesine maruz kalan kapsül sistemleri, çatlak oluşturarak kırılabilir. Kırılma sonucu açığa çıkan iyileştirici ajanlar hasarı onarırlar ve kendi kendine iyileştirme gerçekleştirirler. Bu iyileştirici yapıyı oluşturmak için gerçekleştirilen çalışmalarda epoksi reçinelere birçok dinamik bağ (Guadagno, Vertuccio, Naddeo, Calabrese, Barra, Raimondo, Sorrentino, Binder, Michael & Rana, 2019) ve yapı (Capelot, Montarnal, Tournilhac & Leibler, 2012; Kuang, Liu, Dong, Liu, Xu & Wang, 2015) eklenmiştir. Yeni işlevlere sahip olan kompozitlerin yapısal performansı iyileşerek akıllı özelliklerin kombinasyonu haline gelir (Gu, Ma, Gu, Guo, Yan, Huang, Zhang & Guo, 2016).

Mühendislik malzemelerinin tasarımı için yenilikçi bir duruş sergileyen kendi kendini iyileştirme işlevine sahip polimer kompozitler, yüksek katma değerli uygulamalar için uzun ömürlü ve daha güvenilir malzeme sınıfını oluştururlar (Syrett, Becer & Haddleton, 2010; Weihermann, Meiner & Pezzin, 2019). Genel olarak, kendi kendini iyileştiren polimer sistemleri, polimer matris içine dağılmış, genellikle monomerler veya primerler gibi bir iyileştirici madde ile doldurulmuş mikro kapsüller içerirler. Malzemede çatlak meydana geldiğinde, yayılan çatlak mikro kapsül kabuğunu kıracaktır. Mikro kapsülün

kırılması ile iyileştirici ajan ortama salınarak polimerize olmaktadır. Polimerize olan iyileştirici ajan sayesinde çatlak yayılması önlenir ve yapının bütünlüğünü sağlamış olur (Feng, Yu, Bian, Lu, Shi & Chai, 2017; Demertzi, Silveste & Durão, 2020).

Son yıllarda kendi kendine iyileşme yöntemi için farklı yaklaşımlar ortaya çıkmıştır. Üre formaldehit, amin, epoksi mikro kapsüllerden (Jin ve ark., 2012) , gözenekli kum kapsülleri, polimer mikro kapsüller, kalsiyum aljinat kapsüllere kadar (Li, Sun G., Sun, Lu, Ma & Deng, 2020) birçok farklı malzeme kullanılarak yapılan iyileştirme çalışmaları olumlu sonuçlanmıştır. Mikro boyuttan makro boyuta kadar geniş bir çalışma alanına hitap eden kendi kendine iyileşme çalışmaları benzer prensipleriyle istenileni karşılamıştır (Kessler, 2012; Parsaee, Mirabedeni, Farnood & Alizadegan, 2020).

Literatürde yapılan bir çalışmada (Jin ve ark., 2012) içi boş üre-formaldehit kullanarak core-shell yapılar oluşturulmuştur. Oluşturulan bu yapıların kendi kendine iyileşmesi değerlendirilmiştir. Ayrıca, bu core-shell yapıların çalkalama hızlarıyla olan ilişkisi incelenmiştir. Kabuk oluşumu sırasında tercih edilen çalkalama hızı ne kadar artarsa o kadar küçük çapa sahip içi boş mikro küreler elde edilmiştir. Bu işlemden sonra amin ve epoksiyle içi dolu küreler elde edilerek kendi kendine iyileşmenin mümkün olduğunu gösterilmiştir. Her iki mikro kürenin de iyileştirici ajanların hacimsel oranı doğrudan kapsül ağırlık oranı ile ilişkili olduğunu belirtilmiştir. Epoksinin amin kapsüllerine optimal oranı oluşturulduktan sonra, toplam kapsül konsantrasyonunun etkisini incelemek için kırılma testleri gerçekleştirilmiştir. Tüm bu işlemlerin sonunda ise toplam kapsül konsantrasyonu arttıkça iyileştirme etkinliğinin arttığı sonucuna varılmıştır.

Mükemmel mekanik özellikler, termal-oksidatif kararlılık ve üstün alev direnci gibi yüksek performans özelliklere sahip olan ftalonitril bazlı reçineler de iyileştirme çalışmalarında kullanmıştır (Sastri & Keller, 1999)(Sastri & Keller, 1999). Bu malzemenin polimerizasyonu son derece yavaş olup, yüksek sıcaklıkta birkaç gün beklemesi gerekir. Literatürde yapılmış bir araştırmada (Zeng, Zhou K., Zhou Z., Hong, Zhou H., Wang, Miao & Yang , 2009), hidroksi grupları içeren ftalonitril bazlı polimerleri (HPNM) kullanılarak kür reaksiyonunun iyileşmeyle olan ilişkisi incelenmiştir. Sonuç

olarak, bu iyileştirme davranışlarının moleküler yapıları ile yakından ilişkili olduğunu ortaya koymuştur.

Malzemelerin mekanik özellikleri malzemeye uygulanan şekil değiştirme hızıyla değişmektedir. Bu nedenle tasarım ve imalatı yapılacak malzemelerin mekanik özellikleri, tekrarlı yük altındaki deformasyon hızına bağlıdır. Kauçuk türü malzemelerin kullanım yerindeki deformasyon hızı bilinmeli ve bu deformasyon hızında gerçekleştirilen deneylerden elde edilen deneysel veriler ile bünye denklemleri oluşturularak bilgisayarda simülasyonu yapılmalıdır (Cheng & Chen, 2003)

Mikro kapsüllenmiş disiklopentadien (DCPD) ve Grubbs katalizör parçacıkları içeren epoksi bazlı malzemeler kullanılarak, mikro kapsül çapının ve çatlak boyutunun kendi kendini iyileştiren malzemelerin performansı üzerindeki etkisi de bir çalışmada incelenmiştir (Rule, Sottos & White, 2007). Mikro kapsüllerin yırtılmasıyla DCPD'nin katalizörle karışarak polimerin çatlak yüzeyinde kalması sonucunda otonom onarım işleminin gerçekleşmesi sağlanmıştır. Mikro kapsüllerin bir çatlak yüzüne verdiği sıvı miktarı, kapsüllerin belirli bir ağırlık fraksiyonu için mikro kapsül çapı ile doğrusal olarak ölçeklendiği gösterilmiştir. Bunun yanı sıra, kendi kendini iyileştirme performansının çatlak tamamen doldurmak için yeterli iyileştirici ajanın mevcut olduğu zaman maksimum seviyelere ulaştığını test etmiştir. Çalışmanın sonucunda ise kendi kendine iyileşmenin çok daha küçük mikro kapsüller ve daha düşük ağırlıktaki mikro kapsüller ile verimli bir şekilde gerçekleştiğine varılmıştır.

Günümüzde asfalt ve betonarme çalışmalarında da tercih edilen kendi kendine iyileşme yöntemi, hizmet ömrünü uzatmada önemli bir rol oynamaktadır. Bu noktada mikro kapsül boyutunun önemi öne çıkmaktadır. Literatürde asfalt karışımının iyileşme verimliliğini artırmak için çeşitli çalışmalar yapılmıştır (Xue, Wang, Pei, Li, Zhang & Fan, 2017; Li ve ark., 2020). Bu konuyla ilgili yapılan bir çalışmada (Xue ve ark., 2017), mikro kapsüllerin asfalt eritme işleminde bozunmadan kaldığı, düşük sıcaklık ve yorulma yükü altında iyileştirme performansı gösterdiği incelenmiştir. Diğer bir çalışmada (Li ve ark., 2020) ise, hedeflenen inşaat ve hizmet sektöründe asfalt karışımındaki mikro kapsüllerin

hayatta kalma ve aktivasyon davranışını incelenmiştir. In situ polimerizasyon yöntemi ile çeşitli boyutlarda mikro kapsüller hazırlanarak, bunların partikül boyut dağılımı, çekirdek malzeme içeriği, kabuk geçirgenliği ve diğer özellikleri kantitatif analiz prensipleri ile karakterize edilmiştir. Mikro kapsül boyutunun ve karıştırma sıcaklığının bu kapsüllerin kullanım süresine olan etkisini de incelemiştir. Kapsül boyutunun yaşlanmış asfalt mastiklerinin iyileştirme verimliliği üzerindeki etkisini araştırmak için de yorulma testi gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, sıcaklık ve mikro kapsül boyutu optimize edilerek, malzemenin hizmet ömrünün arttırılabileceğine iyileştirilebileceğine varılmıştır. Bu duruma göre, daha büyük boyutlara sahip mikro kapsüller, yaşlandırılmış asfalt mastiğinin iyileştirme verimliliğini önemli ölçüde arttırmıştır. Özellikle, mikro kapsüllerin yapım sürecinde hayatta kalmasını ve çatlaklar ortaya çıktığında aktive olmasını sağlamak için karışımlara uygun boyuttaki mikro kapsüllerin eklenmesi uygun görülmüştür. Bu yönüyle çalışma, endüstride dünya çapında kullanılan malzemelerin ömrünü artırmanın bir adımını oluşturmaktadır.

Çimento esaslı bir kendi kendine iyileşme sistemi oluşturan bir çalışmada da epoksi/üre formaldehit mikro kapsülleri tercih edilmiştir (Han ve ark., 2020). Yollarda, köprülerde, barajlarda, alt yapı ve endüstriyel çalışmalarda çimento esaslı malzemeler kullanılır. Çimento esaslı malzemelerden olan betonun üstün performansı ve düşük maliyeti sektörde öne çıkmasını sağlamıştır. Betonun kendine has özellikleri nedeniyle çimento esaslı malzemelerde zamanla mikro çatlaklar ve çeşitli hasarlar oluşmaya başlamaktadır. Bu hasarlar betonun dayanımını ve hizmet ömrünü olumsuz etkilemektedir (Li, Lim & Chan, 1998). Kendi kendine iyileşme, betondaki çatlakların ilerlemesini önleyerek kullanım süresini uzatmak için önemli bir strateji olarak ele alınmıştır. Ayrıca, betona farklı oranlarda ilave edilen mikro kapsüllerin, malzemenin sızdırmazlığı üzerindeki etkisini incelenmiştir. Eklenen mikro kapsül oranı arttıkça iyileşmede artış meydana geldiği gözlenmiştir. Tüm bunlarla birlikte, çimento esaslı kompozitlerin kendi kendine iyileşme verimliliği pek çok farklı çalışma tarafından da ele (Long, Gu, Liao & Xing, 2017; Al-Tabbaa, Litina, Giannaros, Kanellopoulos & Souza, 2019; Xue, Li, Qu, Sun & Shah, 2020). Bu durumu inceleyen bir başka çalışma da Caihong Xue ve ark. (2020) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bükülme sıkışma gibi etkilerin olumsuz sonuçları tersine

çevirerek çatlak iyileşmesini sağlayan bu çalışmada, kompozitin çatlak kapanması ve mekanik performansını geri kazanması üzerindeki etkileri incelenmiştir. Kendi kendini iyileştiren ürünler ile çatlak yüzeyi arasındaki arayüzey de analiz edilmiştir. Gerçekleştirilen testler sonucu bağlama ara yüzünün bükülme mukavemetinin arttığını gözlemlenmiştir. Böylece, iyileşme verimliliği değerlendirilmiştir. Bu duruma göre, otonom kendi kendini iyileştirmenin maksimum iyileştirme verimliliği sağladığı ortaya konulmuştur.

Kompozit sandviç panellerin malzemelerin iyileşmesine olan etkisi farklı çalışmalar tarafından incelenmiştir (Yazıcı, Güçlü & Deliktaş, 2021; Demertzi ve ark., 2020). Havacılıktan otomotive kadar geniş bir kullanım alanına sahip olan sandviç yapılar (Liu, C., Xing, Liu, Huang, Nong, Xu, 2021; Vermeer, Rossi, Tamis, Jonkers & Kleerebezem, 2021; Qian, Zheng, Zhang & Su, 2021), çeşitli tipte çekirdek yapısı ve çekirdek malzemesiyle dikkat çekmektedir (He & Hu, 2008). Geliştirilen bu yapılar kullanıldığı yere bağlı olarak farklı noktalardan farklı yüklere maruz kalabilmektedirler. Bu durumda yapısal kararlılığın artırılması gerekmektedir. Bunun için tercih edilen sandviç yapıların en çok kullanılan türü bal petekleridir. Bal petekleri, homojen bir şekilde yerleştirilen altıgen yapısıyla öne çıkar. Alüminyum, cam elyaf takviyeli plastik ve aramid kağıdın tercih edildiği çekirdeğe sahip olan bu yapılar genel itibarıyla darbe esnasında enerji sönmülmesi ve üstün eğilme direnci ile dikkat çekmektedir (Sun, 2013). Endüstride genellikle düşük yoğunluğundan dolayı alüminyum bal petekleri kullanılmaktadır. Bu malzemeler yapısal uygulamalarda ağırlık azalmasından dolayı önemli derecede avantaja sahiplerdir (Bekem, Ercan, Dogu & Unal, 2011).

Sandviç yapının sahip olduğu çekirdek, iki plaka arasında yer almaktadır. Çekirdeğin en önemli görevi, yüzeyleri burkulmaya ve yüzeye gelen kesme yüklerine karşı desteklemektir. Çekirdek yapısı, yüksek kesme mukavemetine ve sıkıştırma sertliğine sahiptir. Sandviç panel, darbenin geldiği noktalarda çekme ve basma kuvvetlerini verimli bir şekilde absorbe edebilmektedir (He & Hu, 2008)(Jiang, Ren, Jin, Zhu & Liu, 2020).

Bugüne kadar yapılan çalışmalarda, en iyi iyileştirici ajan dağıtım sistemine mikro kapsüller kullanılarak ulaşılabacağına varılmıştır (Bekem ve ark., 2011; Sun ve ark., 2013). Ancak, yapılan çalışmalarda genellikle kullanılan mikro kapsüllerin sınırlı miktarlarda onarım maddesini kapsülleyebildiği gösterilmiştir. Bu durum, iyileştirici maddenin çoğu tek bir yükleme döngüsü altında tükenbilmesine neden olur (Souradeep & Kua, 2016). Mikro kapsülün bu dezavantajı göz önüne alındığında, literatürde yapılan çalışmalardan farklı olarak fazla miktarda iyileştirici ajanın kapsüle edilebilmesi için bu çalışmada, makro boyutta küreler kullanılarak kendi kendine bir iyileşme sistemi geliştirilmiştir.

Otonom olarak iyileşme gözlemlenen kendi kendine iyileşen polimerler, biyolojik sistemlerin taklit edilmesi ile geliştirilir (Brown ve ark., 2002; Brown ve ark., 2005) (Toohey, Sottos, Lewis, Moore & White, 2007). Böylece bu sistemler manuel bir uygulamaya gerek kalmadan küçük hasarların onarımını sağlar. Kendi kendini iyileştiren malzemeler, uyarıcı görevi görerek pasif onarım gerçekleştirir (Rule ve ark., 2007). Kapsüllenmiş iyileştirici ajan ve polimer, matris içerisine bir kimyasal veya fiziksel tetikleyici (Zhu ve ark., 2015) eklenerek onarım işlemi gerçekleştirilebilir. Malzeme içerisinde bulunan kapsüller, çeşitli darbeler sonucu parçalanır. Bu sayede, iyileştirici ajanlar kılcal çatlaklardan salınır. Aktive olan bu ajanlar çatlak yüzeylerinde iyileşme meydana getirir (Brown ve ark., 2005). Mikro çatlaklar, sertlikte azalma ve geçirgenlikte artışa yol açarlar. Bu durum, sandviç yapılarda mekanik yorgunluğa (Wool, 2008) ve su emiliminde de artışa neden olur. İstenmeyen böyle etkiler, yüzey tabakası ve çekirdek arasında delaminasyonlara neden olabilir (Moll, Jin, Mangun, White & Sottos, 2013). Poliüretan (Xu & Chen, 2016), epoksi gibi iyileştirici bileşenler polikondenzasyon reaksiyonları oluşturarak çatlakları doldururken, malzemenin fonksiyonlarında iyileşme sağlar. Kendi kendini iyileştiren malzemelerin tasarımında malzeme güvenliği, ürün performansı ve artırılmış yorulma ömrü önemli bir etkiye sahiptir (Wool, 2008).

Yaygın uygulama potansiyeline sahip olan kendi kendini iyileştiren malzemeler, işçilik ve bakımda önemli maliyet tasarrufu sağlar. İçi boş liflerin (White ve ark., 2001) ve küresel kapsüllerin (Rammal ve ark., 2021; Imato ve ark., 2020) kullanıldığı kendi kendine iyileşme sistemleri, mühendislik uygulamalarının birçok alanında kullanılır (Li

ve ark., 1998). İnşaattan havacılığa kadar birçok farklı endüstride ön plana çıkmayı başaran kendi kendine iyileşen yapılar, hasarın küçükken onarılmasını sağlar. Örneğin beton yapı çatlaklarında (Li ve ark., 1998; White ve ark., 2001; (Dong ve ark., 2015; Changa, Kun & Gu, 2019) ve biyomedikal uygulama alanlarında (Xue ve ark., 2017; Demertzi ve ark., 2020) hızlı bir çözüm olarak öne çıkan kendi kendini iyileştiren malzemeler, çok kısa sürede etkili çözümler üretir. Hizmet ömrünü de önemli oranda artıran bu yapılar, oldukça ekonomik bir yöntem olarak dikkat çeker (Fang, Pan & Chen, 2021).

Son yıllarda kendi kendine iyileşme yöntemi için farklı yaklaşımlar ortaya çıkmıştır (Ullah, Azizli, Man, Che Ismail & Khan, 2016; Javierre, 2019; Zhai ve ark., 2019; Menikheim & Lavik, 2020; Wang & Urban, 2020; Lesovik, Fediuk, Amran, Vatin & Timokhin, 2021). Kendi kendine iyileşen yapılar, benzer iyileşme sistematığı çerçevesinde mikro boyuttan makro boyuta kadar birçok yapısal bozukluğu onarır. Literatürde, iyileştirici ajana sahip, amin, epoksi (Jin ve ark., 2012) gibi çeşitli polimer mikro kapsülleri (Dong ve ark., 2015) ve kendi kendine iyileşebilir özellikli poliüretan (Du, Liu, Zheng, Wang, 2013; Xu & Chen, 2018; Changa, Kun & Gu, 2019) sistemleri gibi birçok farklı malzeme kullanılarak çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda, yapılan iyileştirme çalışmaları olumlu sonuçlanmıştır. Kendi kendini iyileştirme özelliği gösteren poliüretan yapılarla ilgili yapılan çalışmalarda (Patrick ve ark., 2012; Aguirresarobe, Nevejans, Reck, Irusta, Sardon, Asua & Balard, 2021), matrisin kendi kendine iyileşme özellikleri tespit edilmiştir. İlgili bir çalışmada (Du ve ark., 2013), yapısal hasarın ardından, malzemenin ısı işlem altında iyileşmesi ve kopma mukavemetinin geri kazanılması incelenmiştir. Bu çalışmalara göre, poliüretan malzemenin belirlenen kendi kendini iyileştirme etkinliğinin %80'lere kadar ulaşılabilir olduğu gözlemlenmiştir. Poliüretan ile yapılan diğer bir çalışmada (Patrick ve ark., 2012) ise kullanılan köpük sisteminin geometrik iyileşmede etkili olduğu gözlemlenmiştir. Geometrik iyileşme ile ilgili literatürde yapılan çalışmalar genellikle mikro yapıdaki hasarların giderilmesi üzerinedir. Yapıların mikro kusurları ve buna bağlı olarak mukavemet kayıpları giderilmiştir. (Ghosh, 2008; Zhong & Post, 2015; Zhang ve ark., 2018).

Polimerik köpükler, hücresel yapı, düşük yoğunluk ve yüksek enerji emme kapasitesi gibi benzersiz özelliklerinden dolayı uçak ve otomotiv bileşenlerinde, darbe emme cihazlarında ve biyomedikal uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Polimerik köpükler içinde en yaygın olarak kullanılan poliüretan (PU) köpükler, toplam pazar büyüklüğünün %50'sinden fazlasını oluşturmaktadır (Ling ve ark., 2012). Yüksek köpürme oranına sahip olan poliüretan köpükler, matris ile mükemmel bir bağ kurarak kısa sürede yapının bütünlüğünü korumaya yardımcı olur. Poliüretan, kırılma yüzeylerinde yeniden bir bağ kurarken, yüksek bir verimlilik de elde edilmesini sağlar.

Guo ve ark. tarafından yapılan çalışmalarda, sandviç yapıların sert köpük çekirdek malzemelerinin esnekliğini artırmak için kendi kendini iyileştiren mikrovasküler polimerik köpük sistemi geliştirilmiştir (Guo ve ark., 2020). Ağ üzerinden yükleme ve ardından çatlak yayılması gözlemlenen bir çalışmada ise (Gaan, Liang, Misprouve, Perler, Naescher & Neisius, 2015), iyileştirici ajanlar serbest bırakılarak çatlak düzleminde yeni bir köpük yapısının oluşumu gözlemlenmiştir. Bu sistemin dikkat çekici bir özelliği, iyileşmeyi sağlayan hacimsel genişlemedir. Bu genişleme, makro ölçekli hasarı onarma yeteneği gösterir. Köpürme reaksiyonu, oda sıcaklığında dakikalar içerisinde meydana gelir ve yerinde hızlı bir iyileşme sağlar. Ayrıca, bir vasküler uygulama tekniği kullanılarak, tutarlı bir şekilde yüksek iyileştirme verimliliklerinde çoklu hasar iyileştirme döngüleri elde edilir. Tekrarlanan mekanik testler ile yapılan iyileşme döngüsüne sahip bir çalışmada (Xu & Chen, 2018), kırılma tokluğunda % 100'ün üzerinde iyileşme elde edilmiştir.

Makro veya nano boyutta geliştirilen kapsüller, yapısal bütünlüğün korunabilmesi için sandviç paneller içerisine hapsedilir. Bu işlem sonucunda elde edilen kompozit sandviç panellerin, malzemelerin iyileşmesine olan etkisi de farklı çalışmalar tarafından incelenmiştir (Çalışkan, 2017; Xing ve ark., 2021). Havacılık, otomotiv, inşaat gibi birçok farklı kullanım alanına sahip olan bu yapılar (Yang ve ark., 2010; Patrick ve ark., 2012; Gaan ve ark., 2015; Guo ve ark., 2020), çeşitli tipte çekirdek yapısı ve çekirdek malzemesiyle öne çıkmaktadır (He & Hu, 2008; Baroiu ve ark., 2021). Çekirdek için uygun bir malzeme olarak bilinen kafes yapılar, düşük yoğunluğu ve yüksek mukavemet

değerleri ile dikkat çeker. Köpük, kafes kirişler ve prizmatik çekirdek yapıları, kafes yapıların bilinen örnekleri arasında yer almaktadır. Prizmatik çekirdekler arasında yer alan bal peteği yapısı araların peteklerine benzemesiyle öne çıkar. Alüminyum, paslanmaz çelik, titanyum, cam elyafı, Nomex, aramid kağıt gibi malzemelerden üretilen bal peteği yapıları genellikle aşırı genişletilmiş, az genişletilmiş ve güçlendirilmiş homojen şekilde dağıtılan altıgen varyasyonları şeklinde oluşturulmuştur (Gaan ve ark., 2015). Bal peteği sandviç yapılar, yüksek yorulma direnci, yüksek bükülme sertliği ve iyi enerji sönümlemesi ile (Sun ve ark., 2018) dikkat çeker.

Belirli bir yükleme aralığında iyi bir performans sergileyen bal peteği sandviç panelleri hücre duvar kalınlığını artırarak, hücre boyutunu küçültür. Böylece, uygulamada kolaylık sağlanmıştır (Liu ve ark., 2017). Yapısal kararlılığı artıran bu panellerde yoğunluğu düşük olan alüminyum malzeme tercih edilmektedir (Xing ve ark., 2021). Literatürde yapılmış bir çalışmada (Liu ve ark., 2017), alüminyum petek yapılı sandviç panellerin enerji absorpsiyonu üzerinde etkisi incelenmiştir. Bu çalışmaya göre, yüzey tabakası kalınlığının enerji absorpsiyonuna etkisinin çekirdek yoğunluğundan daha önemli olduğu incelenmiştir.

Geliştirilen yapılar kullanılan bölgelere göre çeşitli darbelere maruz kalabilmektedir. Bunun sonucunda hasar oluşmaktadır. Hasarlarda meydana gelen iyileşme evresinin tespit edilmesi için mekanik testler arasında yer alan penetrasyon testi uygulanabilir. Hasardan sonra meydana gelen iyileşmeyi gözlemlemeye yardımcı olan bu test yönteminin kullanıldığı bir çalışmada (Kepler & Bull, 2009) yapısal bir bileşendeki ani ve lokalize hasarın etkileri ele alınmıştır. Yapısal elemanlarda ön yük ve yerel etkinin eş zamanlı kombinasyonu, potansiyel olarak kritik bir durumdur. Penetrasyon testinde yapıda bir önyüklemeye meydana gelmemektedir. Bu nedenle yapı klasik kırılma mekaniğinden farklı davranış sergilemektedir. Elastik enerjinin serbest bırakılmasıyla yapıda ani ve lokal hasar meydana gelmektedir. Yapıdaki penetrasyon derinliği ve lokal kırılma enerjisi, lokal enerji absorpsiyonu hakkında bilgi vermektedir.

Hava geçirgenlik testi, otomotiv, tekstil, havacılık sektörleri başta olmak üzere birçok sektörde uygulanan bir test yöntemidir. Bu yöntem, açık hücre içerikli PU köpükler için uygulanan karakterize yöntemlerden biridir (Mills, 2005). Temel olarak, malzeme içerisinden birim alandan birim sürede geçen hava akışını hesaplamaktadır. Poliüretan gibi köpük malzemelerde hava geçirgenliğinin düşük olması istenmektedir.

Hava geçirgenliği ile birlikte sıvı geçirgenliği de poliüretan köpük yapısının gözenekliğini karakterize etmek için oldukça önemlidir. Gözenekli ortamın geçirgenlik değerini tahmin etmek için birkaç teorik model mevcuttur. Bunlardan birçoğu, açık hücreli ve kısmen açık hücreli poliüretan köpükler (Mills, 2007) içinden hava akışını analiz etmek için geliştirilmiş ve bu köpükler yoluyla su akışı tahminleri için de kullanılmıştır. Teorik geçirgenlik modelleri genellikle sıkıştırılmış, tamamen açık hücreli poliüretan köpüklerin ortalama hücre çapının ve gözenekliliğinin bir fonksiyonudur (Gunasekar ve ark., 2015).

Kendi kendini iyileştiren polimerler, herhangi bir manuel müdahaleye ihtiyaç duymadan küçük hasarların otonom olarak onarıldığı, son zamanlarda geliştirilen akıllı malzeme sınıflarından biridir (Yang ve ark., 2017; Zhai ve ark., 2020; Reddy, El-Zein, Airey, Alonso-Marroquin, Schubel & Manalo, 2020; Kontiza, Semitekolos, Milickovic, Pappas, Koutroumanis, Galiotis & Charitidis, 2022). Malzemelerde, kullanım sırasında oluşan gerilmelerden dolayı meydana gelen çatlaklar, yapının mekanik bozulmasına neden olabilir (Li ve ark., 2021). Kendi kendini iyileştiren malzemeler mekanik kullanımdan kaynaklanan hasarı zamanla onarabilme özelliğine sahiptirler (Wang ve ark., 2011). Canlı sistemlerden ilham alan bu malzemeler, yapıdaki bozulmayı azaltma, malzemelerin ömrünü uzatma, güvenliği ve hizmet ömrünü artırma ve ayrıca bakım maliyetlerini düşürmedeki üstün özelliklerinden dolayı oldukça dikkat çekmektedir (Zhu ve ark., 2020; Li ve ark., 2021). Literatürdeki çalışmalarda farklı yaklaşımlar kullanarak hasarlı malzemelerin mekanik özellikleri geri kazanılmıştır (Oehlenschlaeger ve ark., 2014).

Kendi kendini iyileştiren polimerlerin birçok endüstriyel alanda kullanılması, bu polimerlerin büyük gelişme potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Bu yapılarda; polimer sistemine iyileştirici ajanlar, katalizörler ve kendi kendini onaran katkı maddeleri

eklenerek hasar gördüklerinde kendilerini iyileştirebilen bir kompozit yapı oluşturulur (Wen ve ark., 2021). Kendi kendine iyileşme sistemleri üç sınıf altında incelenebilir. İlk yaklaşımda, reaktif kimyasal türler içeren mikro kapsüller, doğal polimer matrisine dahil edilir ve çatlak hasarı meydana geldiğinde iyileştirici ajanlarını üzerine içeriklerini serbest bırakır. Bu sayede, bir iyileşme reaksiyonu gerçekleştirilir. İkinci yaklaşımda, polimer matrisi boyunca içi boş fiber, cam veya plastik boru sistemlerinden oluşan gömülü bir vasküler ağda iyileştirici ajanların depolanmasına dayanır. Üçüncü yaklaşımda ise, termal olarak tersinir reaksiyonlar veya hidrojen bağlarının yeniden oluşumu sağlanarak matris polimerde tersinir bağlanma ile iyileşme gerçekleştirilir (Jin ve ark., 2012). Bu yaklaşımlardan oluşan içsel ve dışsal kaynaklı kendi kendine iyileşme çalışmalarında, mikro kapsüller, içi boş cam fiberler, cam veya plastik borular sistemleri ile iyileşme ajanlarının enkapsülasyon çalışmaları yapılmıştır. Literatüre bağlı olarak yapılan çalışmalarda, yalnızca bir iyileştirici ajanın yeterli olması, kendi kendini iyileştiren uygulamalar için kesinlikle büyük bir avantaj olduğu belirtilmiştir. Tek bir iyileştirici ajanın kullanılması, karıştırma sorunlarını veya katalizör kullanımını ortadan kaldırmıştır (Hillewaere & Du Prez, 2015).

Termoset polimerler, işleme kolaylığı, düşük maliyeti ve iyi ıslanabilirliği nedeniyle yapısal uygulamalardaki kompozitlerin matris yapısında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca metallere ve diğer mühendislik malzemelerine kıyasla iyi mekanik özelliklerin yanı sıra iyi korozyon direnci de sunarlar. Hizmet ömürleri boyunca farklı stres türlerine maruz kalırlar. Stres yüklemelerinde, metallere kıyasla benzersiz birkaç arıza mekanizmasına sahiptirler. Fakat, bu tür malzemelerde çatlak tespiti ve onarımı zordur. Termoset polimerlerin bu sınırlamanın üstesinden gelmek için çeşitli şekillerde kendi kendini iyileştirme teknikleri araştırılmıştır (M. Q. Zhang & Rong, 2011; Murphy & Wudl, 2010; Chowdhury ve ark., 2015).

Epoksi reçineler, mükemmel kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerinden dolayı endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan termoset polimerlerdir. Bu reçineler, maliyet ve iyileştirme verimliliği açısından ve birçok uygulamaya uyarlanabilir olmasından dolayı kendi kendini iyileştiren kompozitlerde matris malzemesi olarak

kullanılmaktadır. Literatürde kendi kendine iyileşme ile ilgili yapılmış bir çalışmada epoksi reçinesine kapsül vb. gibi partikül dolgu maddelerinin eklenmesi, malzemenin mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olabileceği sonucuna varılmıştır (Blaiszik ve ark., 2008). Parçacık dolgu maddeleri, bunlarla sınırlı olmamak üzere, çatlağı sabitleme (Anderson, 2017), çatlağı köprüleme (Lee & Yee, t.y.), mikro çatlama (Tvergaard, 1992) ve çatlak sapması (Faber & Evans, 1983; Kinloch & Taylor, 2006) dahil olmak üzere birçok olayla kırılma tokluğu artışlarına yol açabilmektedir. Her türlü durumda, toklaştırma dolgusunun özellikleri, dolgunun hacim oranı ve dolgunun matrise yapışması toklaşma seviyesinin belirlenmesinde önemli parametrelerdir. Termoset reçinelerde partikül kaynaklı sertleşme örnekleri, içi boş cam cenospheres (Cardoso ve ark., 2002), silika nanopartikülleri (Kinloch ve ark., 2005; Rosso ve ark., 2006), çok katmanlı kauçuksu nanopartikülleri (Day ve ark., 1997) ve Al₂O₃ nanokompozitleri (Naous ve ark., 2006) için rapor edilmiştir. Ayrıca, çapları belirli bir mikron 50 µm ile 460 µm arasında değişen Dikloropentadien (DCPD) dolgulu mikro kapsüllerin değişen konsantrasyonları epoksi matrisinin kırılma tokluğunda ve mukavemetinde önemli artışlar gösterdiği bildirilmiştir (Sharma ve ark., 2018; Romero-Sabat ve ark., 2021; Vintila ve ark., 2021).

İyileşme çalışmalarının etkinliğinde kapsüllerin boyutu ve kapsül kabuklarının kalınlığı, yırtılmayı ve iyileşme reaksiyonlarının tetiklenmesini doğrudan etkilemektedir. Daha büyük kapsül boyutları ile daha fazla iyileştirici madde bulunduğundan dolayı daha büyük çatlakları iyileştirilebilmesi mümkündür. Dolayısı ile genel olarak değerlendirildiğinde, başarılı bir iyileşme sürecini güvence altına almak için kapsül kabuğu ince ve pürüzlü olmalı ve boyutu yeterli iyileştirici ajanlar sağlamak için uygun büyüklükte olmaması istenmektedir (Yuan, 2008). Literatürdeki bir çalışmada, kendi kendine iyileşme sürecinin etkinliği çatlak genişliği ile beraber iyileştirici maddenin viskozitesine de bağlı olduğu bildirilmiştir. Viskozite ne kadar düşük olursa potansiyel onarılan alanın o kadar büyük olacağı rapor edilmiştir (Wang ve ark., 2015). Verimli bir iyileşme değerlendirmesi yapısal verimlilik, maliyet ve güvenliğin önemli olduğu havacılık, otomotiv, gemi, inşaat, uzay ve savunma sanayi uygulamalarında önem göstermektedir (Motoku ve ark., 1999). İyileşme ajanlarının verimliliğinin incelendiği bir

çalışmada (Wu ve ark., 2008) , epoksi ve siyanoakrilat bazlı iyileştirici ajanlarının, dokuma E cam kumaşla güçlendirilmiş kendi kendini iyileştiren epoksi matrisinde etkisi araştırılmıştır. İyileşme üzerine yapılan testlerin sonuçlarına göre, sırasıyla epoksi iyileştirici ajan için %12 ve siyanoakrilat iyileştirici ajan için %122'lik ortalama iyileştirme verimlilikleri gösterdiği rapor edilmiştir. Bu sonuçlar ile, literatürde yapılan çalışmalarda(Brown ve ark., 2004) (Rule ve ark., 2005) katalizör temelli iyileşme özelliğine sahip dikloropentadien (DCPD) dolgulu mikro kapsül bazlı kendi kendine iyileştirme sistemi iyileşme verimlilik sonuçları karşılaştırılmıştır. Buna göre, DCPD esaslı iyileştirme sistemlerinin epoksi ve siyanoakrilat iyileştirme ajanları arasında bir yerde bulunduğu sonucuna varılmıştır (Kessler & White, 2001).

Siyanoakrilatlar olağanüstü yapışma özellikleri ile beraber çoğunlukla süper yapıştırıcılarda kullanımı ile bilinirler. Siyanoakrilatlar, bağlanma kabiliyetine ve çok düşük viskozitelere (<10 santipoz (cPs) sahip asidik yapılarıdır (Van Tittelboom & De Belie, 2013) (Gardner ve ark., 2014). Sahip oldukları bu viskozitleri sayesinde 100 mikrondan daha az genişlikteki çatlakları iyileştirme yeteneğine sahiplerdir (Van Tittelboom & De Belie, 2013). Süper yapıştırıcılardaki alkil siyanoakrilatlar, oda sıcaklığında saniyelerden dakikalara varan sürelerde yapışma gösterirler, ancak tam güçlerine ancak neme bağlı olarak birkaç saat sonra ulaşırlar (Hillewaere & Du Prez, 2015). Siyanoakrilat kullanarak tamamen kürlenmiş bir bağ elde etmek için 24 saat oda sıcaklığında kürlenme ve ardından 90oC'de 24 saat kürlenme gerektiği belirtilmiştir (Slattery ve ark., 2016). Siyanoakrilat monomerleri oldukça reaktif bileşiklerdir ve anyonik ve/veya serbest radikal mekanizmalar yoluyla polimerize olurlar. Anyonik reaksiyon yolu çok baskındır ve su gibi küçük miktarlarda zayıf bir baz ile bile başlatılabilir. Peroksitlerin varlığında uzun süreli yüksek sıcaklıklara, ultraviyole ışığa veya ısıya maruz kalma, serbest radikal polimerizasyonunun başlamasına neden olabilir (Coover ve ark., 1990). Başlatıcılar kullanılarak siyanoakrilatların polimerizasyon reaksiyonları üzerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır (Johnston & Pepper, 2003; Stefanov ve ark., 2016). Siyanoakrilatların polimerizasyon reaksiyonu, serbest radikaller veya nükleofiller ya da nötr bazlar veya su molekülleri gibi iyonik başlatıcılar tarafından başlatılır (Stefanov, Ryan, Ivankovic & Murphy, 2016). Güçlü bir asit ve serbest radikal

inhibitörlerinin eklenmesiyle stabilize edilir (Coover, Dreifus & O'connor, 1990) (Stefanov ve ark., 2016). Polimerizasyon, nem dahil yüzeyde eser miktarda zayıf bazik veya nükleofilik türlerin varlığı ile tetiklenir. Reaksiyon ile birlikte siyanoakrilatlar, düşük viskoziteli bir sıvıdan, birbirine bağlanacak iki yüzey arasında güçlü bağlar oluşturmaya yeterli, bir katıya anında değişim gösterir. Bu katılaşma ile birlikte, yüksek gerilme mukavemetine ve mekanik özelliklere sahip yüksek moleküler ağırlıklı bir polimerik katı yapı elde edilir (Woods, 2003).

Literatürde tek parçalı siyanoakrilatın kendi kendine iyileşme ile ilgili ilk çalışma Dry tarafından akıllı polimer matris kompoziti geliştirmek için yapılmıştır (Dry, 1996) . Bu çalışmada içi boş cam fiberler siyanoakrilat sıvısı ile doldurulup, epoksi matrisine eklenmiştir. Bu malzemenin kırılması üzerine siyanoakrilatın hava ile teması sonucunda hızlı bir anyonik homopolimerizasyon başlamıştır. Polimer matrisi hasar gördüğünde, içi boş cam elyaflar çatlağın uzamasıyla kırılmış ve siyanoakrilat dışarı akmıştır. İyileştirici ajanın hava ile teması sonucunda çatlağı doldurmak için kırılma yüzeyinde hızlı bir anyonik homopolimerizasyon ile polimerleşme gerçekleştiği rapor edilmiştir (Hillewaere & Du Prez, 2015) (Wen ve ark., 2021).

Dry tarafından yapılan diğer bir çalışmada, betondaki çatlakları iyileştirmek için siyanoakrilat ile doldurulmuş silindirik cam kapsüller kullanmış ve beton yapı içinden geçirgenliğin azalması üzerine bir inceleme gerçekleştirilmiştir (Dry, 2000).

Yapılan diğer bir çalışmada (Joseph ve ark., 2007), dış çapı 4 cm iç çapı 3 cm olan plastik bükülmüş sistem içine siyanoakrilat doldurularak vasküler bir iyileşme gerçekleştirilmiştir. Bu tür dışsal iyileşmeye sahip sistemin oldukça verimli bir kendi kendine iyileşme ile sonuçlanmıştır. Hasarlı bölgenin iyileşmesini ile sağlamlık ve sünekliğin de önemli ölçüde iyileştiği bildirilmiştir. Çalışmadaki incelemeler sırasında ve sonrasında elde edilen bulgular, bir yapıştırıcı olarak alkil siyanoakrilatın yerçekimi ve kılcal emme etkileri nedeniyle yırtılmış yüzeylerin daha geniş bir bölgesine sızabileceğini ortaya çıkarmıştır (Luhar ve ark., 2021).

Siyanoakrilat ile yapılan diğerk bir çalışmada ise (Bleay ve ark., 2001) 6,5 mm kalınlığında içi boş cam fiber içeren 24 katlı S2 cam elyaf kompozit içinde siyanoakrilatları birleştirmeyi denemiştir. Dış ve i çapı 15 ve 5 µm olan içi boş cam elyaflar, muhtemelen uçlarının kürlenmiş siyanoakrilat tarafından bloke edilmesinden dolayı, vakum destekli sıvı infiltrasyon tekniği ile doldurulamamıştır. Bu nedenle, siyanoakrilat iyileştirici maddeler bu yöntemle daha fazla test edilmemiştir.

Yapılan diğerk bir çalışmada (Fifo, Ryan & Basu, 2014), fiber takviyeli kompozitlerde yarı-statik kırılma hasarının siyanoakrilat iyileşmesi incelenmiştir. E-cam elyaf takviyeli doymamış polyester kompozitler kullanılan çalışmada, siyanoakrilat kendi kendini iyileştirme sistemini tam olarak karakterize edilmiştir. 10 katlı fiber takviyeli bir kompozitte, orta katlar arasına gömülen naylon kordlarla mikrovasküler kanallar oluşturulmuştur. Daha sonra vasküler kanallara kauçukla sertleştirilmiş bir katkı maddesi içeren düşük viskoziteli bir siyanoakrilat yapıştırıcı enjekte edilmiştir. Üç noktalı eğilme testleri kullanılarak, üç numune kırılmaya kadar test edilmiştir. Bu teste, farklı derecelerde delaminasyon ve eğilme hatası gözlenmiştir. İki numunede oda sıcaklığında bir günlük iyileşmeden sonra, maksimum yük ve eğilme sertliği sırasıyla %46 ve %85 oranında geri kazanılmıştır. Bir numunede ise, orijinal yükün %94'ne kadar ve eğilme sertliğinin %97'sine kadar geri kazanılmıştır. Diğerk iki numunedeki daha düşük iyileşme verimliliği, takviye edici liflerin kırılmasına bağlanmıştır. İki numune, muhtemelen erken polimerizasyon veya iyileştirici maddenin çatlaktan sızmasından dolayı kanalların tıkanması nedeniyle önemli ölçüde daha düşük geri kazanımlara sahip olduğu grlmştir.

Bu çalışmada literatürde yer alan mikro ve nano çatlaklarda kendi kendine iyileşmeden farklı olarak makro boyutta meydana gelen hasarların onarılması amacıyla kendi kendine iyileşen yapılar geliştirilmiştir. Geliştirilen yapılar üç temel niteliğe sahiptir. Bunlar kendi kendine zamana bağlı olarak iyileşebilen epoksi bazlı sandviç panel geliştirilmesi, poliüretan bazlı kendi kendine geometrik olarak iyileşebilen sandviç panel geliştirilmesi ve kendi kendine ultra hızlı iyileşebilen yapılardır.

İlk olarak makro küreler geliştirilmiştir. Makro kürelerin üretiminde polistiren köpük taneleri kullanılmıştır. Bu taneciklerin etrafı epoksi ile kaplanarak kabuk yapılar oluşturulmuştur. Oluşturulan kabuk yapı gözenekli halde üretilmiştir. Bu gözenekler yardımıyla kabuğun içerisinde var olan polistren köpüklerin eritilmesi sağlanmıştır. Polistren köpüğü eritmek için aseton kullanılmıştır. Köpüğün erimesiyle mevcut epoksi kabuk yapının rijitliği azalmıştır. Makro bayutlarda elde edilen kürenin yapısal rijitliğini artırmak amacıyla epoksi ile ikinci kaplama yapılmıştır. İkinci kaplamada gözeneklere yer verilmemiştir. Elde edilen makro kürelerin içerisine epoksi ve kürleştirici ilave edilmiştir. İçeri iyileşme ajanları ile doldurulan makro küreler Alüminyum bal peteği sandviç panel içerisine doldurulmuştur. Sandviç panel içerisine mikrokürelerden arta kalan boş hacim epoksi reçine ile doldurulmuştur. Statik bası deneyleri ve high strain rate split hopkinson impact deneyleri için numuneler hazırlanmıştır. Test verileri deneysel olarak ve kesit görselleri ile gözlemlenmiştir. Yapı içerisine ilave edilen makro kürelerin yapıda oluşturduğu iyileşme, yapının mekanik değerlerine ve enerji sönümlemesine katkısı incelenmiştir.

İkinci çalışmada ise kendi kendine geometrik olarak iyileşme vasfına sahip yapılar geliştirilmiştir. İlk çalışmada geliştirilen makrokürelerin çleri poliüretan iyileşme ajanlarıyla 1:1 oranında doldurulmuş ve sandviç panellerin içerisine yerleştirilmiştir. Sandviç panel içerisine makro küreler dışında kalan boş hacim epoksi reçine ile doldurulmuştur. Elde edilen sandviç yapılar, statik bası deneyi (50mm x 50mm) ve penetrasyon testi (150mm x 150mm) için hazırlanmıştır. Meydana gelen geometrik iyileşmenin mekanik etkisi statik bası deneyi ile tespit edilmiştir. Penetrasyon testinde oluşturulan hasar neticesinde makro kapsüller kırılmıştır. Kırılan makro kapsüller içerisindeki iyileşme ajanları hasar bölgesine dağılmıştır. Hasar, 120 saniye içinde tamamen giderilmiştir. Yapıda meydana gelen poliüretan köpük oluşumu ve bu oluşumun sıvı ve hava geçirgenliği, kullanım alanlarına doğrudan etki edecektir parametrelerdir. Bu nedenle hava ve sıvı geçirgenlik testlerine de tabii tutulmuştur. Sıvı geçirgenliğinde zamana bağlı olarak akışkanın basıncı artmıştır. Nihayetinde herhangi bir sıvı geçirgenliği gözlemlenmemiştir. Hava geçirgenliği testi ile basınç arttıkça hava geçirgenliğinin arttığı gözlemlenmiştir. Geliştirilen poliüretan dolgulu makro

kapsüllerden oluşan sandviç yapıların yapının denizaltı boru hatlarında, deniz altlarında, gemilerde ve yakıt tanklarında kullanılması öngörülmektedir.

Literatürde yer alan çalışmalarda kendi kendine iyileşmeler zamana bağlı olarak meydana gelmektedir. Yakıt tankları gibi anlık iyileşmenin beklendiği yapılarda ise mevcut kendi kendine iyileşme yapıları beklenen görevi görmemektedir. Bu nedenle ultra hızlı yani anlık iyileşme vasfına sahip yapıların geliştirilmesi endüstriyel açıdan önem teşkil etmektedir. Bu çalışmada ilk iki çalışmada geliştirilen makro kürelerin üretiminde değişikliğe gidilmiştir. Çünkü iyileşme ajanı olarak kullanılan siyonakrilat hava nemi ve basıncı gibi dış etkenler ile anlık reaksiyona girmekte ve iyileşme vasfını yitirmektedir. Bu nedenle geliştirilen makro küreler daha rijit ve sızdırmaz hale getirilmiştir. Ardından iyileşme ajanlar yapı içerisine enjektör ile ilave edilerek enjektör delikleri derhal kapatılmıştır. Böylece içleri iyileşme ajanı ile dolu ola makro küreler numune hazırlığına uygun hale getirilmiştir. Çalışmada siyonakrilatın aktivatörü olarak literatürde yer alan pentan olarak isimlendirilen yapılardan farklı olarak toz aktivatör (sodyum bi karbonat) kullanılmıştır. Toz aktivatör makro kürelerin ilave edildiği numunenin boş hacimlerini dolduran epoksi içerisine homojen oranda ilave edilmiştir. Bu oran deneysel tasarım yöntemi ile belirlenmiştir. Ayrıca yapısal bütünlüğün korunması ve yüzey pürüzlülüğünün sağlanması amacıyla hazırlanan numunenin dış yüzeyi iki katmanlı silikon ile kaplanmıştır. Hasar sonrası kırılan makro kürelerin içlerindeki iyileşme ajanlarından etrafa dağılması muhtemel siyonakrilatların önüne geçilmesi ve numunede iyileşmenin eksiksiz olarak tamamlanması için ilk kaplama içerisine toz aktivatör ilave edilmiştir. Toz aktivatörün silikon kaplamada olası kayma mukavemeti düşüklüğünü giderebilmek amacıyla ikinci kaplama saf silikon ile tamamlanmıştır. Böylece numune hazırlığı tamamlanmıştır. Geliştirilen numune üzerinde statik bası deneyleri ve high strain rate impact deneyleri gerçekleştirilmiştir. Mekanik olarak iyileşme performansı gözlemlenmiştir. Ayrıca deneyde çatlaklara dağılan siyonakrilatın toz aktivatör ile reaksiyonunda ortaya çıkan yüksek ısı temal kamera ile gözlemlenmiştir. Sonuç olarak 3 farklı amaçla geliştirilen kendi kendine iyileşme vasfına sahip yapıların birkaç farklı yöntem ile iyileşme vasıfları ortaya konulmuştur.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Tez çalışmasında, makro boyutta kendi kendine iyileşme vasfına sahip yapılar geliştirilmiştir. Bu yapılar farklı niteliklerde olup endüstriyel uygulamalar için ön görülmektedir. Literatürde yer almayan üretim sistemi geliştirilmiştir. Bu sistem ile makro boyuttaki hasarlar, geometrik olarak hasara uğrayan yapılar veya büyük delikler, hızlı iyileşmenin önem arz ettiği yapılar, otonom olarak iyileştirilebilmektedir.

3.1. Epoksi Bazlı Kendi Kendine İyileşebilen Makro Küre Üretimi, Sandviç Yapı Geliştirilmesi ve Karakterizasyon

3.1.1. Üretim süreci

Geliştirilen kendi kendine iyileşen yapı, kapsül yöntemi içerisinde gösterilebilir. Çalışmada, uygulamada geniş kullanım alanı bulunan polistiren köpük taneciklerinin geometrisi kullanılarak kapsül oluşturulmuştur. Bu tanecikler, kendi kendine iyileşen yapının çekirdek malzemesi olarak seçilmiştir.



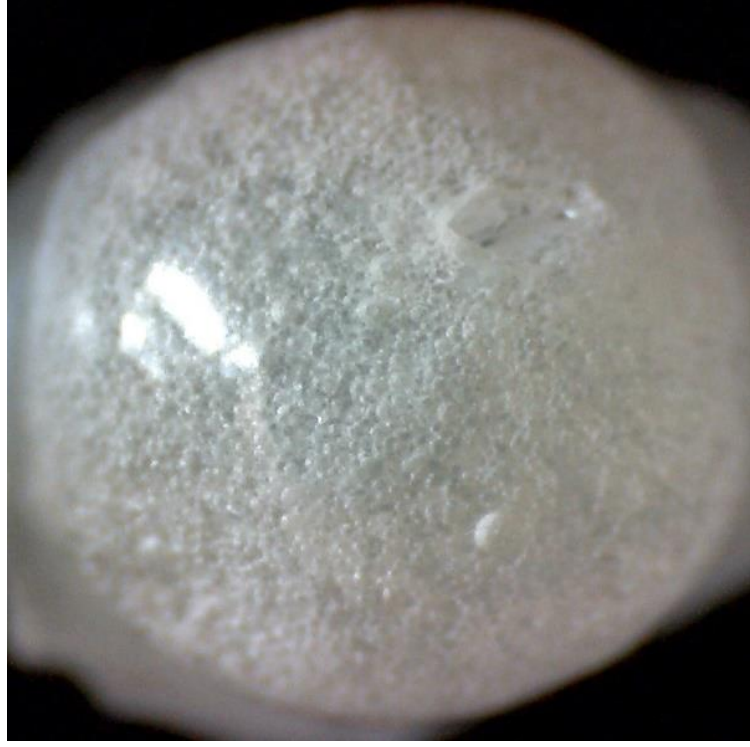
Şekil 3. 1. Polistren köpük.

Şekil 3.1’ de gösterilen polistren taneleri ile kabuk oluşturma işleminde epoksi reçine, epoksi sertleştirici ve sodyum bikarbonat (Na_2CO_3) kullanılmıştır. Ecomar R15 epoksi reçinesi ve sertleştiricisi ağırlıkça 2:1 oranında kullanılarak, homojen bir karışım sağlanmıştır. Sonrasında, sodyum bikarbonat (NaHCO_3) eklenerek karıştırmaya devam edilmiştir. Karışıma ilave edilen polistiren küreler (şekil 3.2), kabuk oluşumu için 48 saat bekletilmiştir.



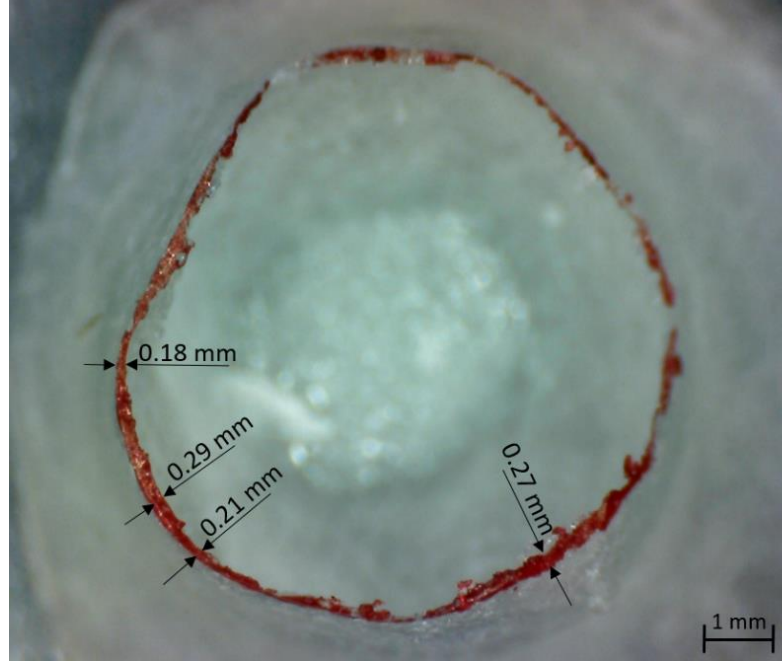
Şekil 3. 2. Polistren tanesinin epoksi ve NaHCO_3 ile kaplanması.

İçi boş makro kapsül oluşumu için, öncelikle üzerinde kabuk oluşan PS küreler, 50 °C’deki suda 5 dakika karıştırılmıştır. Böylece kabuk içerisinde bulunan Na_2CO_3 ’ler çözünerek gözenekli bir yapı elde edilmesi sağlanmıştır. Elde edilen gözenekli yapıdan polistiren çekirdeği aseton ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$) kullanılarak uzaklaştırılmıştır. Böylelikle Şekil 3.3’ de gösterilen kabuk yapısı elde edilmiştir.



Şekil 3. 3. Gözenekli kapsül yapısı.

Yapısındaki NaHCO_3 'ün uzaklaştırılması sonucunda ince bir cidara sahip olan kabuk yapısının rijitliği azalmış ve kolay kırılabilir hale gelmiştir. Yapının daha rijit hale getirilmesi ve iyileştirici ajanın gözenekli yapıdan dışarı sızmasının önlenmesi gerekmektedir. Bunun için, gözenekli kabuk yapısı epoksi reçine ve sertleştiricisinin karışımı ile ikinci kez kaplanmıştır. Böylece yapısal rijitlik sağlanmıştır. Elde edilen kapsüllerin er kalınlıkları (0.22 ± 0.4 mm) dijital mikroskop ile ölçülmüştür (Şekil 3.4).



Şekil 3. 4. Kapsül duvar kalınlığı.

Elde edilen iki katmanlı kabuk yapının içerisine ayrı ayrı olmak üzere epoksi reçine ve sertleştiricisi enjektör ile doldurulmuştur (şekil 3.5).



Şekil 3. 5. Epoksi reçine ve aktivatör enjekte edilmiş makro kapsüller.

Elde edilen iyileştirici küre ajanlardan sızma olmaması için şekil 3.6' da gösterilen enjektör delikleri siyanoakrilat ve pentan ile kapatılmıştır.



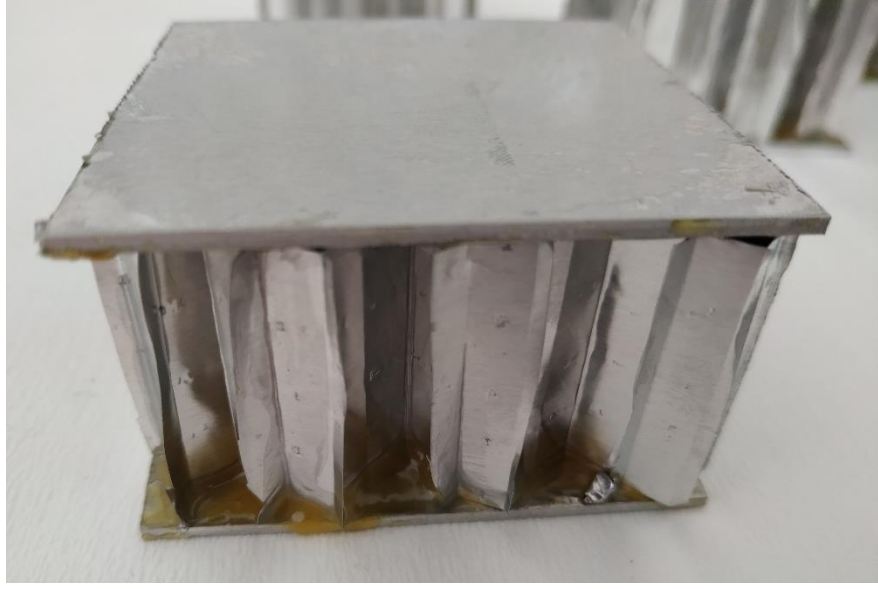
Şekil 3. 6. Enjektör deliklerinin kapatılması.

Hazır hale getirilen makro kapsüller şekil 3.7’ de gösterilen alüminyum sandviç panel içerisine 2:1 oranında yerleştirilmiştir.



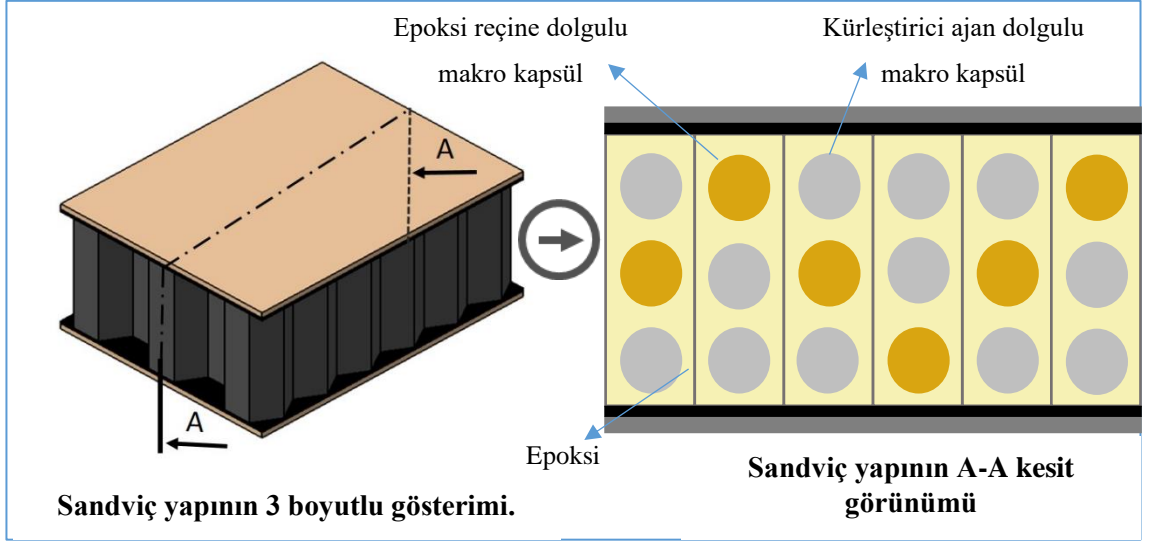
Şekil 3. 7. Makro kapsüllerin Al bal peteği hücrelerine yerleştirilmesi.

Sandviç yapının içerisinde kalan boşluklara epoksi reçine ve sertleştirici karışımı doldurulmuştur. Elde edilen sandviç yapı 4 saat 60 °C’ de bekletilmiştir. Son olarak, yapıların teste hazır hale gelmesi için üst yüzeyi 1,5 mm kalınlığında alüminyum plaka ile kapatılmıştır (şekil 3.8).



Şekil 3. 8. Teste hazır Al bal peteği sandviç yapı.

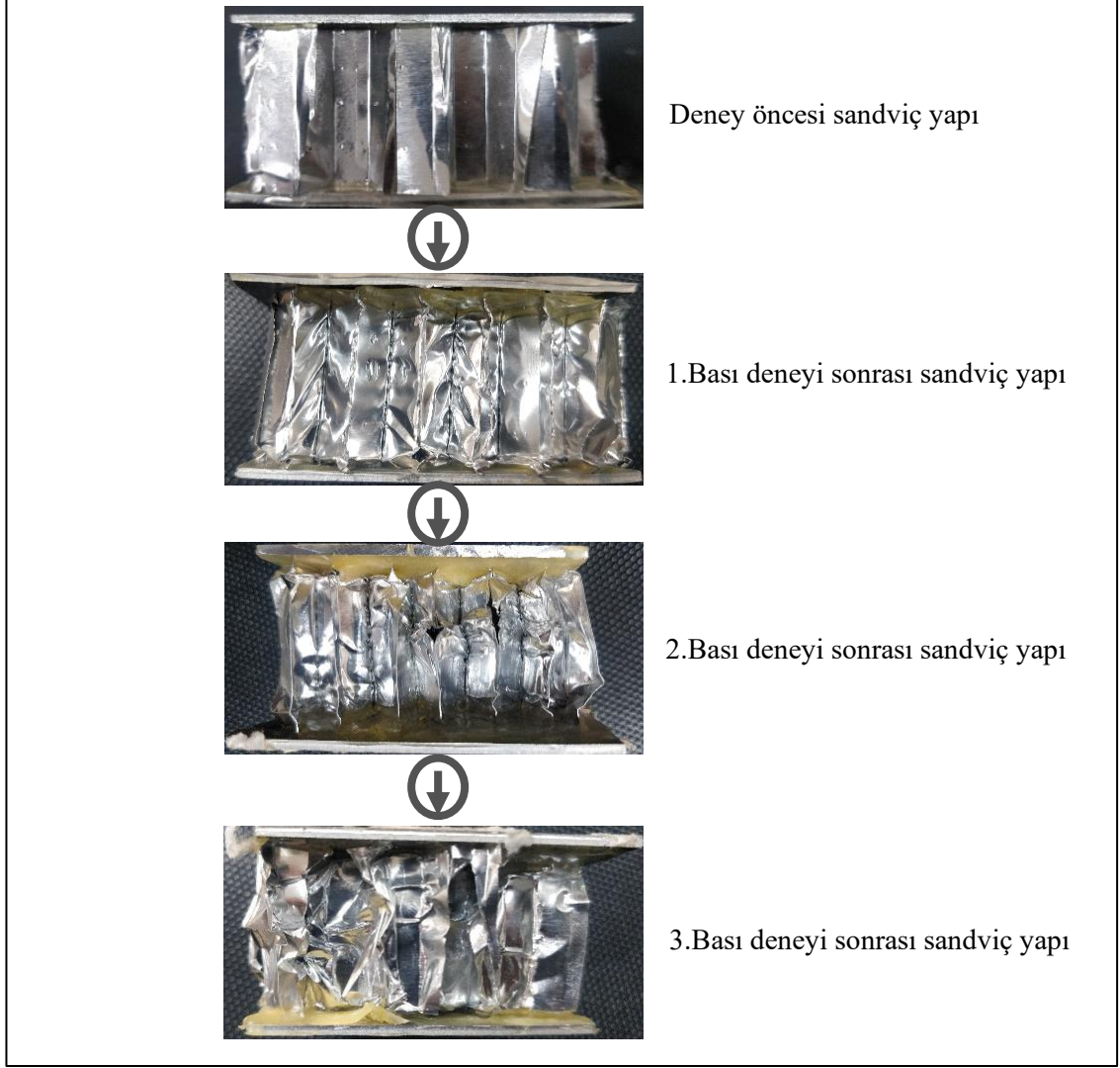
Geliştirilen yapıya ait şema şekil 3.9’ da gösterilmiştir.



Şekil 3. 9. Geliştirilen kendi kendine iyileşebilen sandviç yapı ve kesit görünümü.

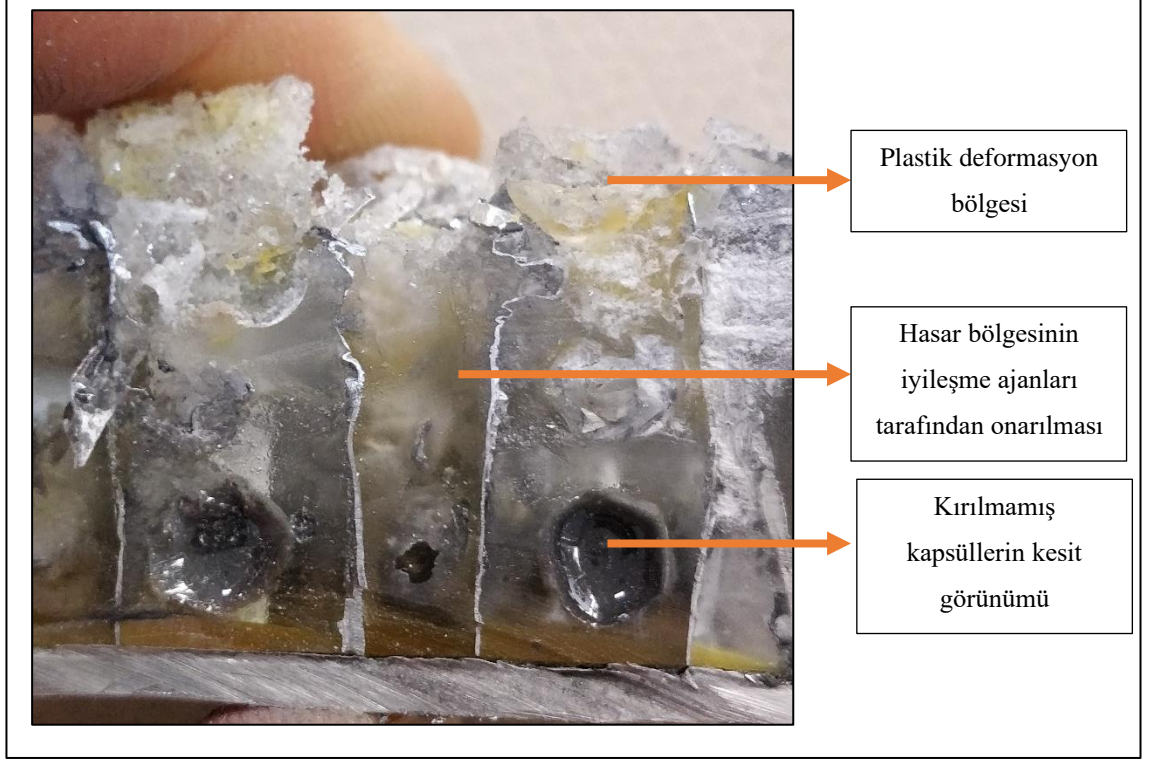
3.1.2. Bası deneyleri

ASTM C 365-94 standartlarına göre hazırlanan test numuneleri 50 mm x 50 mm genişlik ve 30 mm yüksekliğe sahiptir. 10 mm/dk sabit hızda basma testleri yapılmıştır. Şekil 3.10' da gösterilen numuneler her adımda 5 mm yer değiştirmeye maruz kalıp 3 adımda gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. 10. Tekrarlı yüklemelere maruz kalan bası deney numunesi.

Her test adımından sonra kırılan kapsüllerdeki Epoxy A ve Epoxy B 4 saat 80°C’de kürlenmeye bırakılmıştır. Deneylerin 3 aşamalı gerçekleştirilmesinin sebebi tekrarlı yüklemeler esnasında kırılmadan kalan kapsüllerin hasara uğraması ve hasarlı bölgelere yeni ajanların yönlendirilmesidir. Şekil 3.11’ de ilk yüklemenin ardından kırılan ve kırılmayan kapsüllerin kesit görünümü yer almaktadır.



Şekil 3. 11. İlk yüklemenin ardından kısmi hasara uğramış numunenin kesit görünümü.

3.1.3. Darbe deneyleri

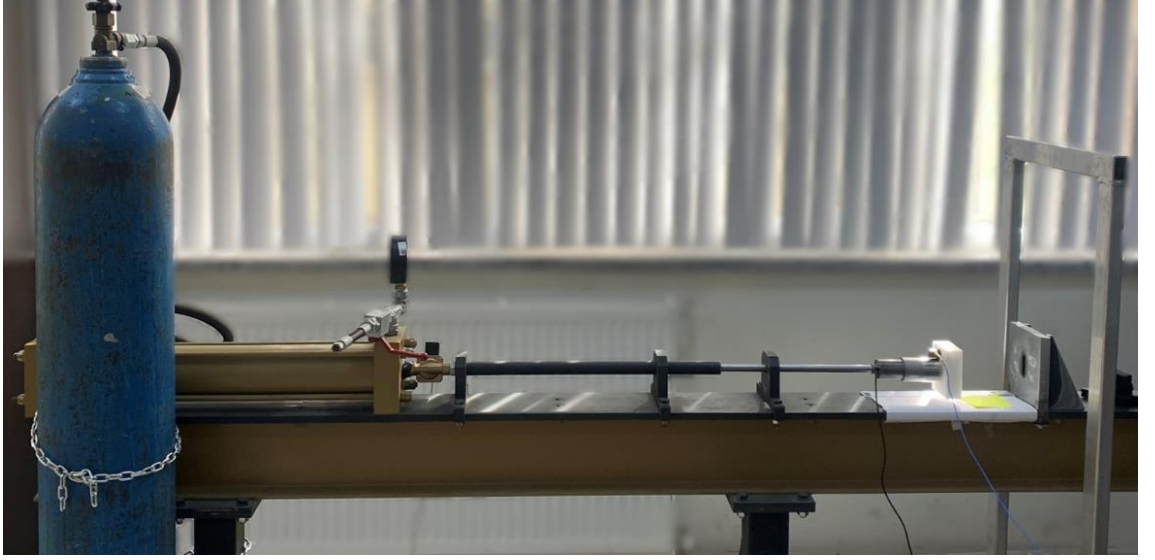
50x50x30 mm boyutundaki numuneler Şekil 3.12’ de gösterilen impact testi için hazırlanmıştır. Darbe çenesi (3,5 kg) numuneye 8,16 m/s hızla çarpmıştır. Meydana gelen çarpma deney numunesi üzerinde 272 s^{-1} şekil değiştirme hızı ($\dot{\epsilon}$) oluşturmaktadır. Şekil değiştirme hızı gerininin (ϵ)’ nin zamana (t) göre türevi olarak tanımlanmaktadır (denklem 3.1).

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} \quad (3.1)$$

ϵ bir mühendislik gerinimidir ve denklem 3.1 denklem 3.2’ de verildiği gibi basitleştirilebilir.

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{1}{L_0} \frac{dL}{dt} = \frac{V}{L_0} \quad (3.2)$$

Burada L malzemenin ilk boyu, L_0 malzemenin son boyu ve V malzemenin deforme olma hızıdır.

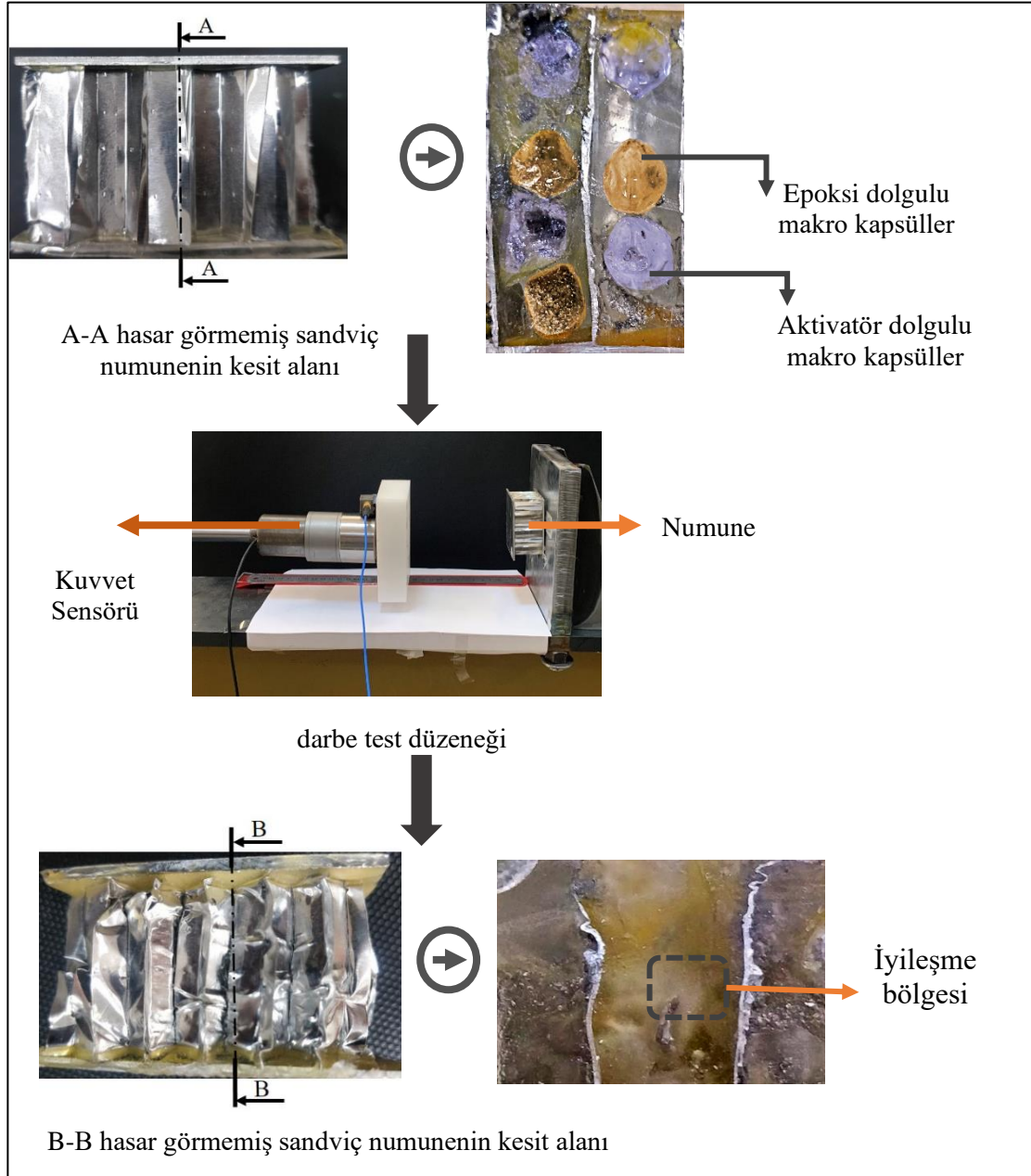


Şekil 3. 12. Darbe test düzeneği.

Darbe yüklemesinden sonra, sandviç yapı çekirdek hücrelerinin içindeki kendi kendini onaran makro kapsüller zarar görmüş ve hasarlı makro kapsüllerden reçine ve kürleştirici çatlak ve hasarlı bölgelere sızarak orada karışırlar. Bu epoksi reçine ve aktivatör karışımı kürlenmeye başlar ve ayrıca hasarlı sandviç hücreyi iyileştirir. Reçine ve kürleştiriciler, her sandviç çekirdek hücresinde lokal alanlarda otonom iyileşme sağlar. Bu darbe yükleme aşaması üç kez tekrarlanmış ve her darbeden sonra numuneler, her biri hasarlı makro kapsüllerden sızan epoksi reçine ve sertleştirici karışımlarının kürlenmesi için 4 saat boyunca 80°C 'de tutulmuştur. 3 aşamalı deneylerin her aşaması aynı hızda gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3.13'de impact testine maruz kalan, mavi renkli kapsüllerin epoksi reçine ile doldurulduğunu ve 120ari renkli kürelerin sertleştirici madde ile doldurulduğunu göstermektedir. Üçüncü testten sonra numunenin kesit görünümü incelenmiştir. Petek

duvarlardaki kırışıklıklar ve çökmeler darbe yüklemesinden sonra elde edilmiştir. Duvarlar arasındaki iyileşme alanında kapsüllerin tamamen hasar gördüğü ve iyileşmenin gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 3. 13. Darbe testine maruz kalan numunenin kesit görünümüleri.

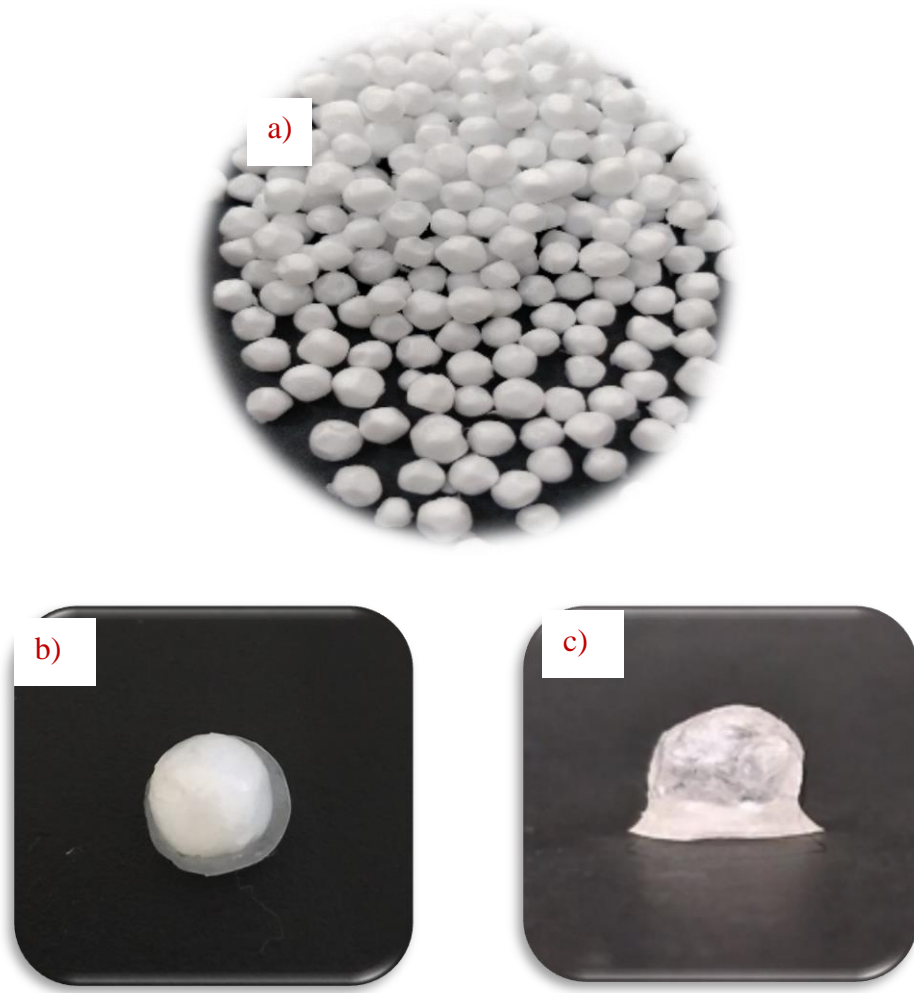
3.2. Geometrik Olarak Kendi Kendine İyileşebilen Sandviç Yapı Geliştirilmesi ve Karakterizasyon

Literatürde geometrik olarak kendi kendine iyileşme mikro çatlakların giderilmesiyle sınırlı kalmıştır. Bu çalışmada ise elde edilen kapsüllerin içleri hacimce 17 kat genişleme kapasitesine sahip poliüretan köpük ile doldurularak geometrik iyileşme hedeflenmiştir. Büyük delikler oluşturularak boşluğun zamana bağlı olarak dolumu gözlemlenmiş, mekanik deneyler ve spesifik karakterizasyonlar ile özellikleri belirlenmiştir.

Bu çalışmada Ecomar R15 epoksi reçine, aseton, 17 kat köpürme oranına sahip Smooth-on Foam-iT! 3 Pourable Rigid Foam poliüretan kullanılarak polistiren makro kapsül üretimi gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte en dış kabukta bir bütünlük oluşturmak amacıyla MemoLOC MAY 800 siyanoakrilat yapıştırıcı ve pentan kullanılmıştır.

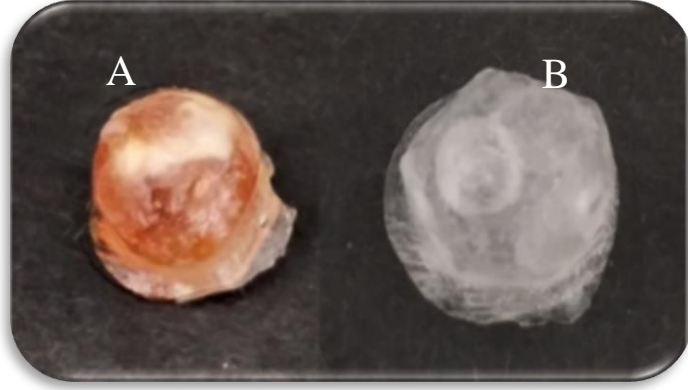
Geometrik olarak kendi kendine iyileşme kabiliyetine sahip makro kapsüller epoksi dolgulu iyileşme ajanlarına sahip makro kapsüller ile benzer sürece sahip olsa da belirli farklılıklara sahiptir. Bu nedenle kapsül oluşumu farklı niteliklere sahip kendi kendine iyileşen yapılar için yeniden ifade edilmelidir. Aşağıda geometrik olarak iyileşebilen makro kapsül üretim süreci verilmiştir.

İyileştirici ajana sahip kapsül oluşumu için, endüstrinin çeşitli alanlarında sıklıkla kullanılan polistiren köpük tanecikleri tercih edilmiştir. Çekirdek malzemesi olarak kullanılan polistirenin etrafındaki kabuk yapısı epoksi reçine ve epoksi sertleştirici karışımı ile oluşturulmuştur. Ağırlıkça 2:1 oranında kullanılan epoksi reçinesi, 24 saat sonunda tamamen kürleşerek kabuk katmanları elde edilmiştir. Polistiren köpük etrafında 24 saat arayla 3 kez epoksi reçinesinin kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.14' de gösterilen bu işlem sonucunda 3 katmanlı rijit bir kabuk yapısı elde edilmiştir. Önceki çalışmada kapsülün 2 katmandan oluştuğuna dikkat edilmelidir. Bu fark poliüretan reçinenin havanın neminden ve basıncından etkilenebildiğinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 3. 14. 3 katmanlı kapsül yapısının elde edilmesi.

İçi boş kabuk elde etmek için kaplanan katmanların içinde kalan polistiren köpük aseton yardımıyla yapı içerisinden uzaklaştırılmıştır. Bunun için, rijit kabuk yapısına sahip olan makro küreler delinerek içerisine aseton emdirilmiştir. Bu sayede köpük yapının tamamı eritilerek makro kürelerin içerisi boşaltılmıştır. Elde edilen kapsüllerin içerisi şekil 3.15’ de gösterildiği gibi poliüretan ve poliüretan sertleştiricisinden oluşan iyileştirici ajanlarla doldurulmuştur. Böylece yapısal hasarlar neticesinde geometrik bir iyileşme için gerekli ajanlar hazırlanmıştır.



Şekil 3. 15. Geometrik olarak iyileşme kabiliyetine sahip ajanların kapsül içerisinde görünümü.

İyileştirici ajanlarla doldurulan makro küreler, alüminyum sandviç yapıların içerisine ağırlıkça 1:1 oranında yerleştirilmiştir. Endüstriyel tipteki polistiren köpüklerin farklı boyutlara sahip olmasından dolayı kapsül boyutları çeşitlilik göstermektedir. Bu çeşitlilik ağırlıkça aynı oranda PU ve PU aktivatör kullanılarak tolere edilmiştir. Elde edilen kapsüller şekil 3.16’ da gösterildiği gibi homojen olarak her bir bal peteği hücrelerine yerleştirilmiştir.



Şekil 3. 16. Kapsüllerin bal peteği hücrelerine yerleştirilmesi.

Bal peteğinde kapsüllerden arta kalan boşluklar şekil 3.17’ de gösterildiği gibi epoksi reçine ile doldurulmuştur. 50 C ‘de 4 saat bekletilen numuneler teste hazır hale getirilmiştir.

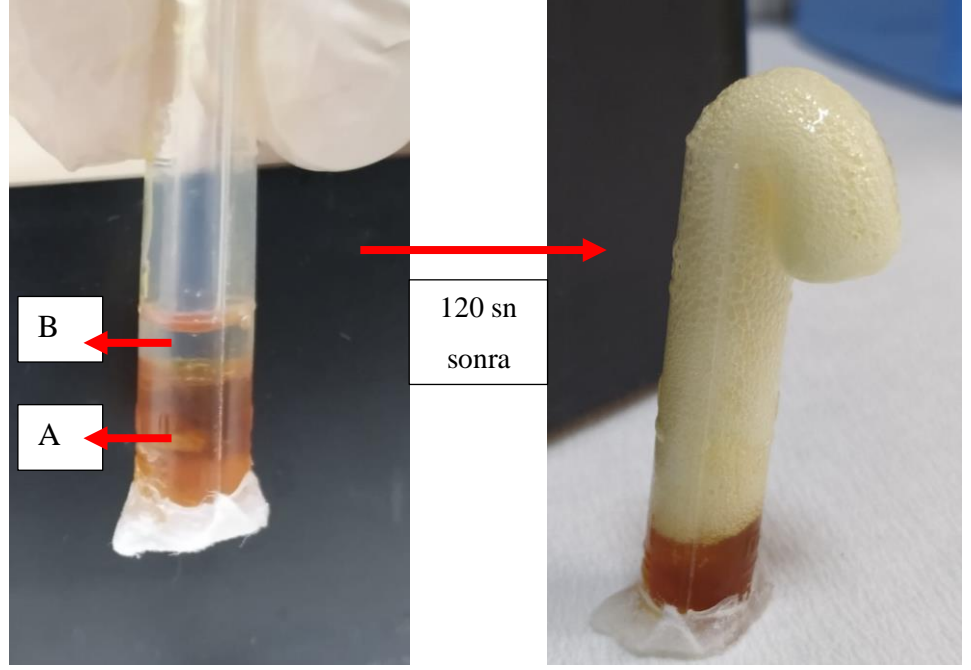


Şekil 3. 17. Boş bal peteği hacimlerinin epoksi ile doldurulması.

Şekil 3. 17’ de gösterilen numuneni üst yüzeyinin de Al plaka ile kapatılmasının ardından numuneler teste hazır hale getirilmiştir.

3.2.1. Köpük oluşum süreci

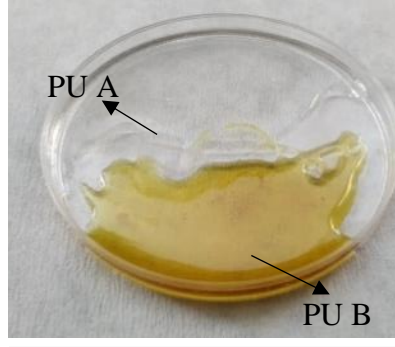
Geometrik olarak kendi kendine iyileşen malzemeler hacimce genişleme kabiliyetine sahip polimerler ile sağlanmaktadır. Endüstriyel alanlarda karışma dış etkenleri etkisiyle meydana gelmektedir. Bu çalışmada ise sadece hasar esnasındaki dış etken vardır. Bu nedenle ek bir karışım olmadan köpürmenin olup olmayacağı oldukça önemlidir. Şekil 3.18’ de önce poliüretan reçine sonra ise üzerine aktivatörü yerleştirilip zamana bağlı iyileşmesi gözlemlenmiştir. Aktivatörün yoğunluk farkından dolayı reçine içerisine nüfuz ettiği, böylelikle köpürmenin tetiklendiği görülmektedir.



Şekil 3. 18. Dış etken olmadan poliüretan köpürmesi.

Poliüretanın dış etken ile karıştırılması ile meydana gelen köpürme ise şekil 3.19’ da gösterilmiştir. Şekil 3.18’ den farklı olarak dibe çöken poliüretan reçine görülmemiştir. Bir başka ifadeyle genişleme verimliliği daha fazladır. Her iki karışım sonrasında da hacimce genişleme vasfını tamamlayan poliüretan köpük 20 dakikalık bekleme sürecinin ardından katılarak vasfını tamamlamaktadır.

Karışmadan hemen
önce PU A and PU B



45 Saniye Sonra



70 Saniye Sonra



90 Saniye Sonra

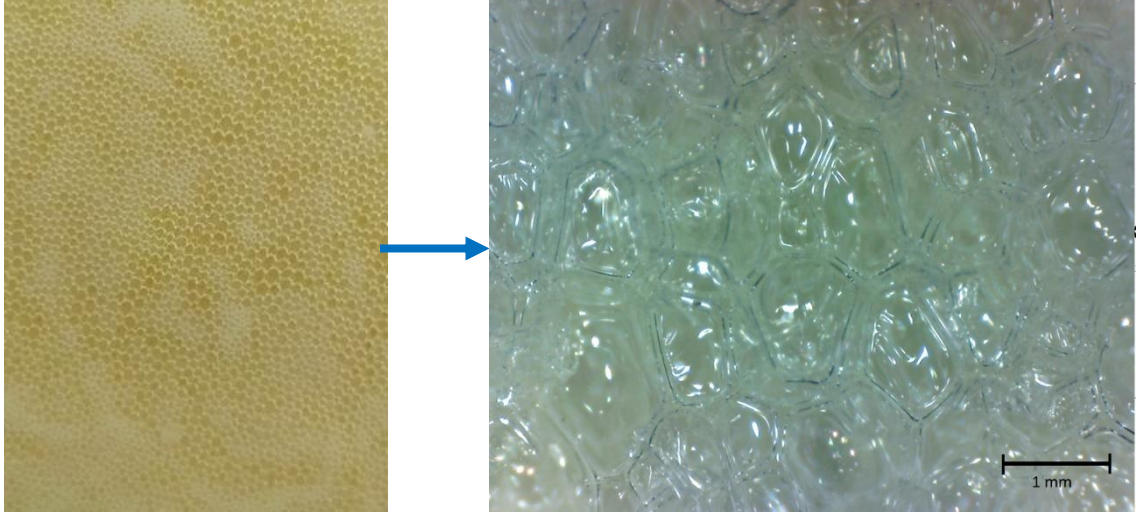


120 Saniye Sonra



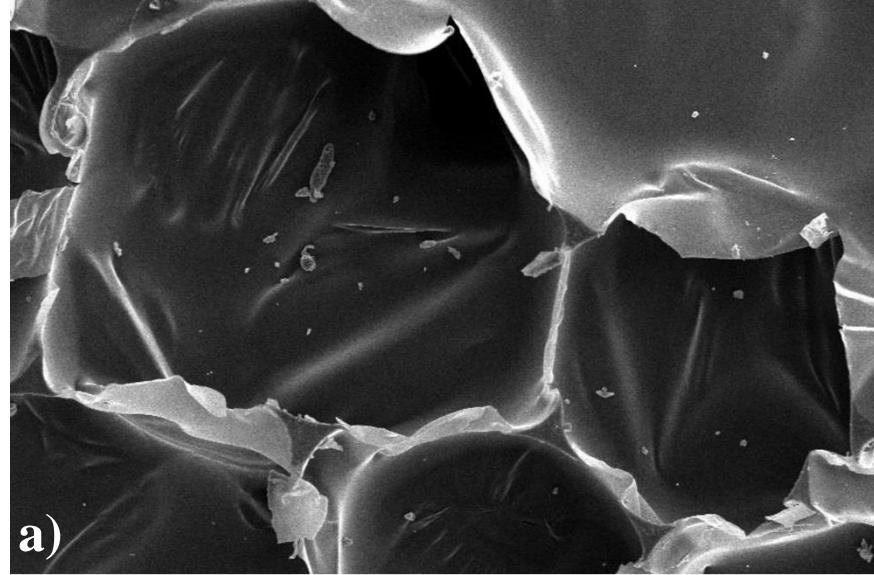
Şekil 3. 19. Dış etken sonrası poliüretan köpürmesi.

İyileşme vasfını tamamlamış poliüretan köpük yapının dijital mikroskop görüntüleri şekil 3.20’ de gösterilmiştir. Köpük hücrelerinin geometrik yapısı ve cidarları görülmektedir. Ayrıca köpük hücrelerinin kapalı hücre yapısına sahip olduğu görülmektedir. Böylece köpük yapının sıvı ve hava geçirgenliği için istenilen özelliklere sahip olduğu ön görülmüştür.

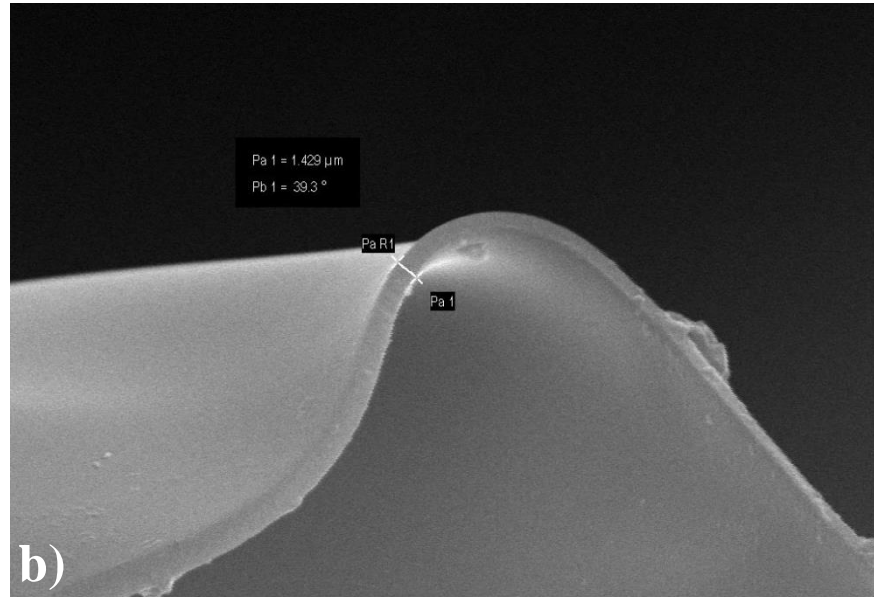


Şekil 3. 20. Poliüretan köpük dijital mikroskop görüntüsü.

Poliüretan köpüğün hücre morfolojisinin daha detaylı analiz edilmesi gerçekleştirilecek spesifik karakterizasyonlar için oldukça önemlidir. Bu nedenle şekil 3.21’de gösterilen SEM görüntüleri ile daha detaylı analiz etmek mümkündür. Görüntülerde hücre cidarlarının tam elastik olmayan davranış sergilediği bu nedenle hücre cidarlarının hasar sonrasında kırışık görünümde kaldığı görülmektedir. Hücreler ise yaklaşık 200 mikrometre çapında olup cidar kalınlıkları ise yaklaşık 1,5 mikrometre boyutlarındadır.



200 μ m Mag = 160 X I Probe = 223 pA Date : 2 Nov 2021
WD = 33.5 mm EHT = 20.00 kV Signal A = SE1

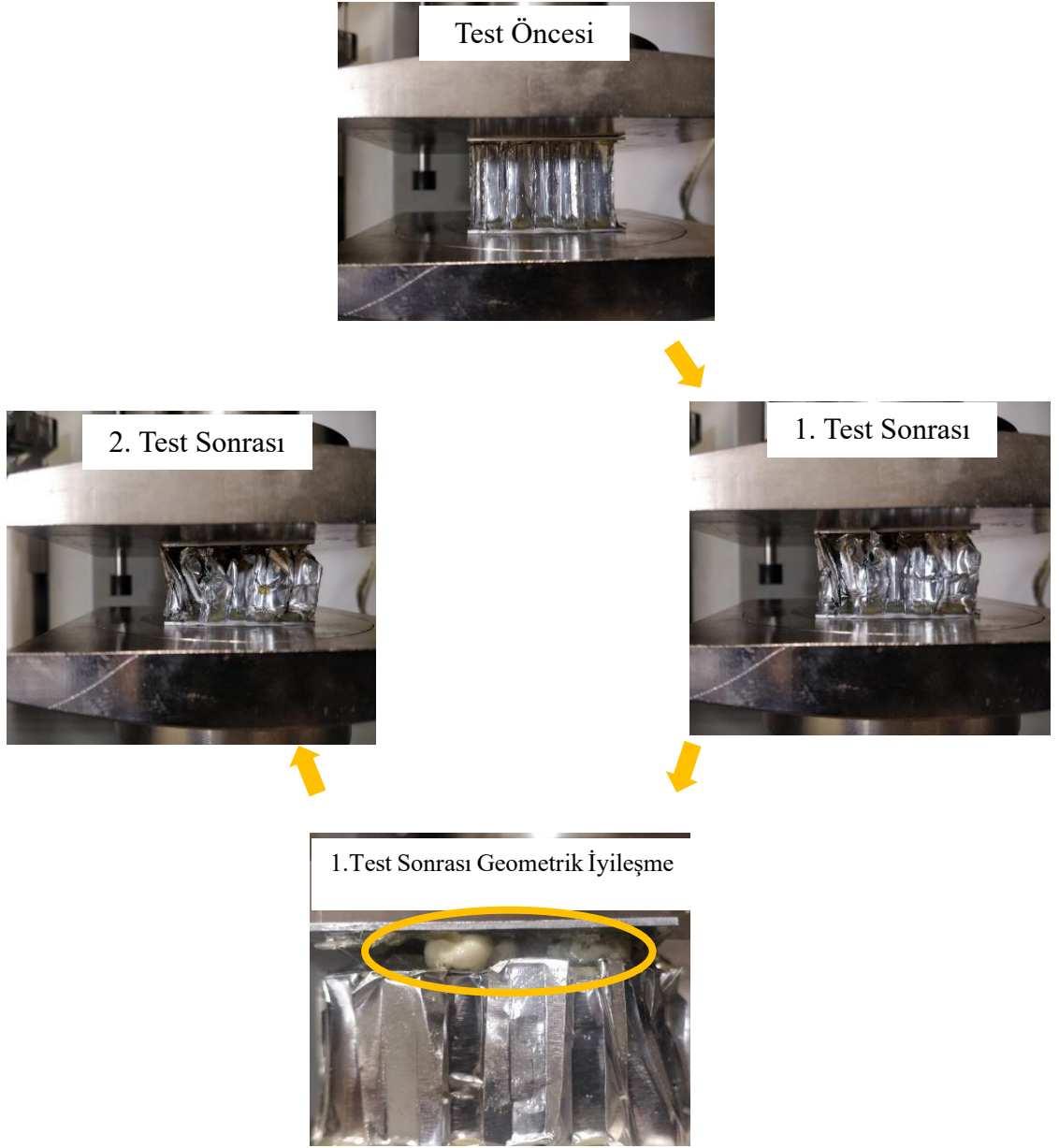


2 μ m Mag = 5.05 K X I Probe = 223 pA Date : 2 Nov 2021
WD = 33.0 mm EHT = 20.00 kV Signal A = SE1

Şekil 3. 21. Poliüretan köpük SEM görüntüsü.

3.2.2.Bası deneyleri

ASTM C 365-94 standartlarına göre hazırlanan deney numuneleri 50 mm x 50 mm genişliğe, 30 mm yüksekliğe sahip Alüminyum bal peteğinden geliştirildi. Bası deneyleri 5 mm/dk sabit hızla gerçekleştirilmiştir. Statik olarak gerçekleştirilen testte ilk deneylerde kapsüller hasara uğramıştır. Kırılan kapsüllerden sızan iyileşme ajanları çatlak bölgelerinde onarım sağlamıştır. PU hacimce 17 kat köpürme mekanizmasına sahip olduğundan numune üzerine doğru genişlemiştir. İlk deney sonrasında 120 sn. içerisinde hacimsel iyileşme tamamlanmıştır. Tam kürlenme için 20 dk. beklenmiştir. Ardından Şekil 2.22'de numune üzerine taşan PU köpük kesilerek çıkarılmış ve Al üst plaka yeniden yapıştırılmıştır. Onarımı tamamlanan deney numunesi üzerinde aynı deney koşullarında ikinci test gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. 22. Bası deney aşamaları ve geometrik iyileşme.

Deney sonrası üst plakanın kesilmesiyle bal peteği hücrelerinin üst kısmı incelenmiştir. Hücrelerde meydana gelen hasarlı bölgelerde meydana gelen köpürme şekil 3.23’ de gösterilmiştir.



Şekil 3. 23. 1. Deney sonrası bası numunesinde meydana gelen iyileşme görüntüsü.

3.2.3. Penetrasyon deneyleri

Penetrasyon testi ile, numunedeki yer değiştirme, gerilme ve enerji emilimi gibi yapısal mukavemet analizleri hakkında analitik bilgiler elde edilmektedir.

Penetrasyon ucu, darbe üzerine kuvveti ölçen bir kuvvet dönüştürücü içerir. Kuvvetin zamana bağlı değişiminin elde edildiği bu durum, darbe tarafından emilen enerjinin bir ölçümünü sağlar (denklem 3.3). Kuvvet/zaman eğrisi ilk olarak, eğrinin altındaki alanı (A_{total}) vermek için entegre edilir.

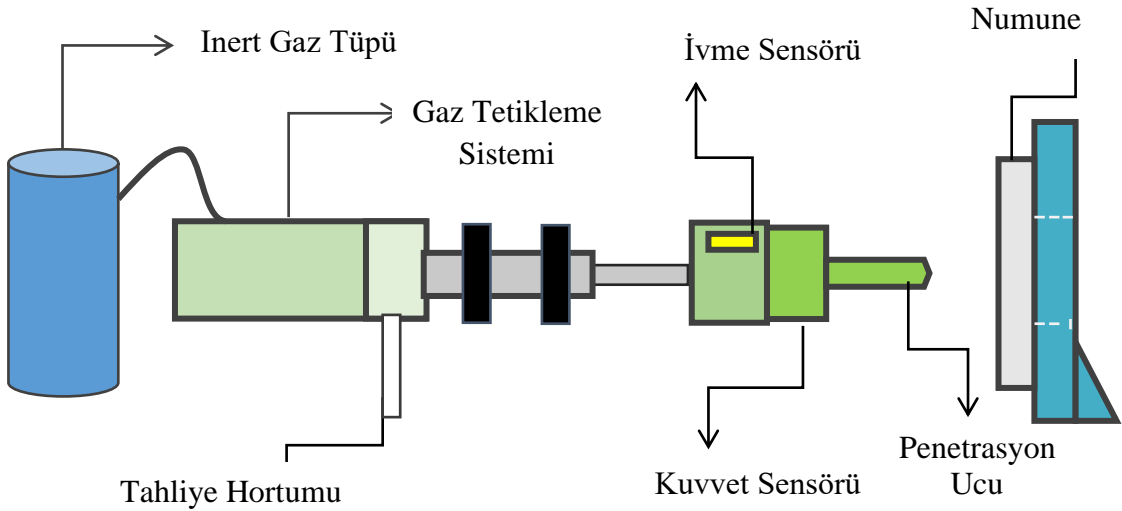
$$A_{total} = \int_0^{\infty} F(t)dt \quad (3.3)$$

Darbe tarafından emilen enerji de (E_{total}) denklem 3.4' deki gibi hesaplanabilir:

$$E_{total} = \vartheta_0 x A_{total} \left(1 - \frac{\vartheta_0 A_{total}}{4E_s} \right) \quad (3.4)$$

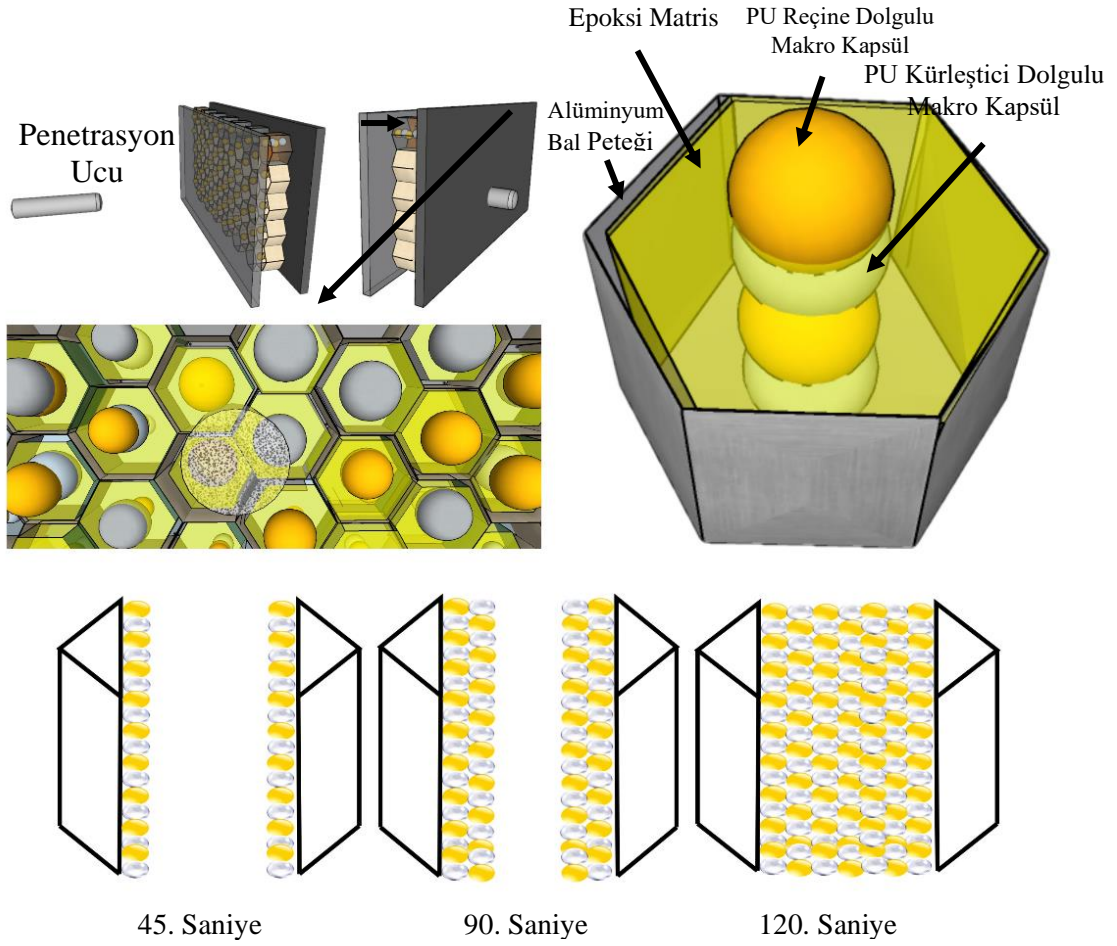
Burada E_{total} = toplam çarpma enerjisi, ϑ_0 = çarpma hızı, A_{total} = kuvvet/zaman eğrisi altındaki alan ve E_s = vurucunun enerjisidir. Penetrasyon darbe testlerinde, ölçüm doğruluğunu artırmak için ilk enerji her zaman penetrasyonda emilen enerjinin en az iki katıdır [49] (geometrik iyileşme makalesi 49).

Bu çalışmada ASTM D6264 standartlarında 120 derece konik penetrasyon ucu kullanılmıştır. Konik uç 150 mm uzunluğunda ve 12 mm genişliğindedir. Şekil 3.24' de görülen yatay bir sistem ile test düzeneği hazırlanmıştır. Bu test sistemi için 150x150 mm boyutundaki Al bal peteği sandviç numune hazırlandı. Numune üzerindeki penetrasyon testi 441 strain rate ve 12,9 m/s hız değerlerinde gerçekleştirildi.



Şekil 3. 24. Penetrasyon test düzenek şeması.

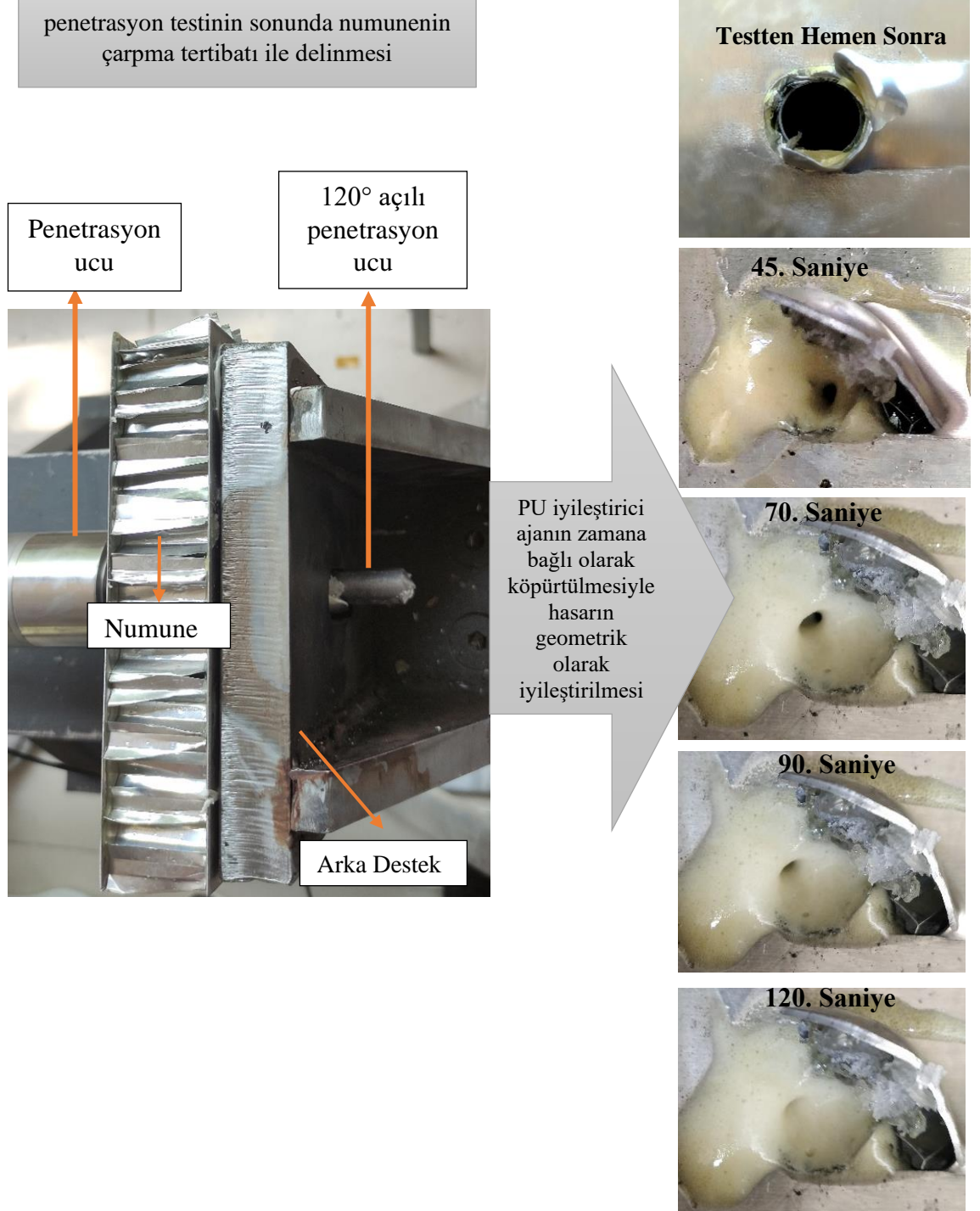
Sandviç yapı içerisinde içleri poliüretan köpük ve sertleştiricisinin dolu olduğu makro küreler, penetrasyon testi sonucunda hasara uğramaktadır. Hasar mekanizması Şekil 3.25’de gösterilmiştir. Penetrasyon çubuğunun numunenin ortasında meydana getirdiği boşluk yaklaşım 120 sn. içerisinde tamamen dolmakta ve hiçbir boşluk kalmamaktadır.



Şekil 3. 25. Penetrasyon test düzenek şeması.

2 kez tekrarlanarak gerçekleştirilen bu testin her aşaması aynı şartlarda gerçekleşmiştir. 1. Adımda kırılan makro kürelerden sızan iyileşme ajanlarının yapıda oluşturduğu geometrik iyileşmenin deney esnasındaki zamana bağlı olarak değişimi Şekil 3.26’da görülmektedir. 120 sn. sonunda 12 mm çapındaki delikte kapanma meydana gelmektedir.

Deligin kapanmasının ardından kürlenme için 20 dakika beklenmiştir. Ardından 2. Deney gerçekleştirilmiştir.

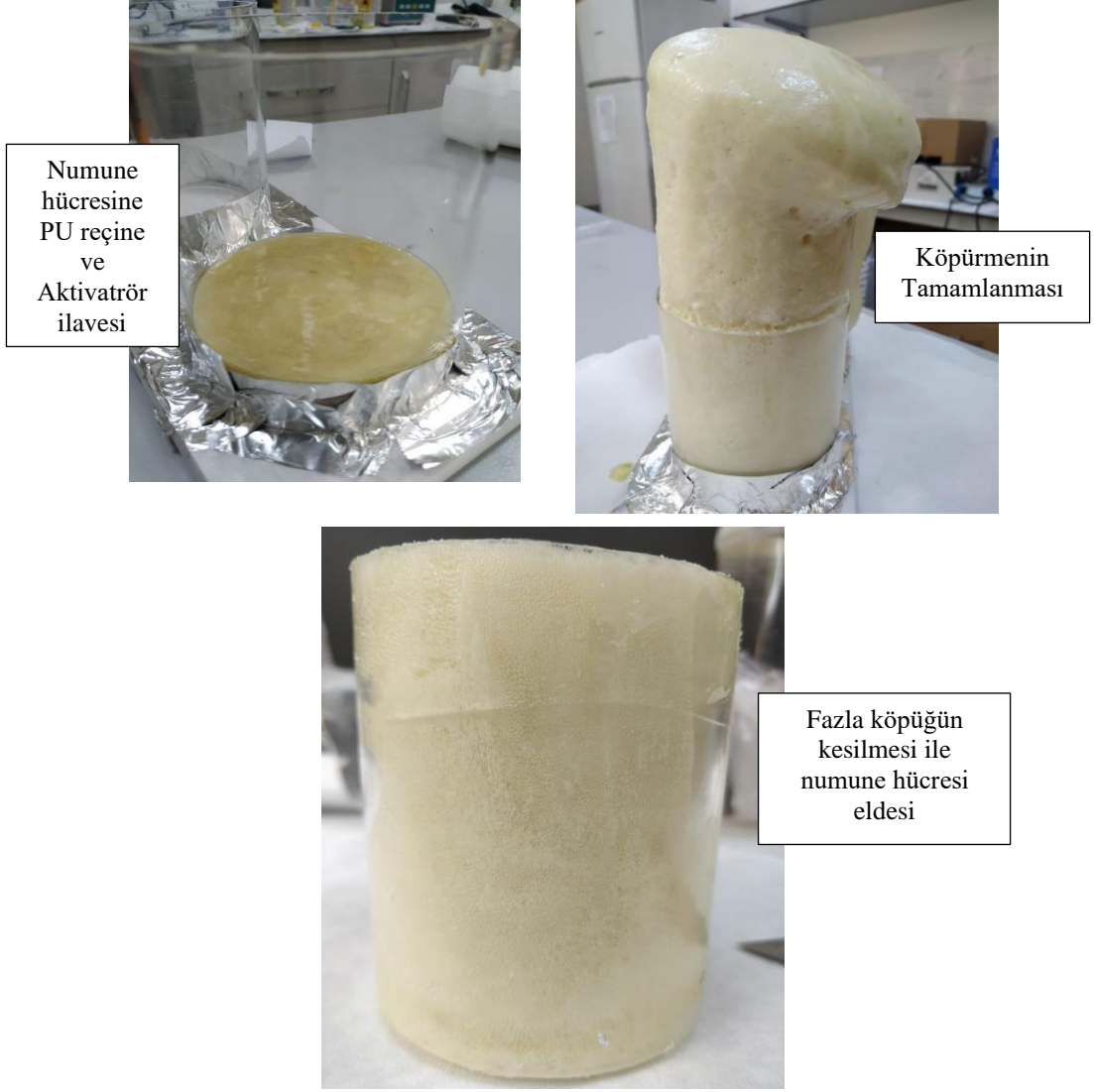


Şekil 3. 26. Penetrasyon testi sonrası hasarlı bölgede zamana bağlı geometrik iyileşme.

3.3.4. Sıvı geçirgenlik testi (Falling-head permeameter)

Sıvı geçirgenlik testi, gözenekli yapıda sıvı akışının analiz edildiği bir yöntemdir. Yapının sıvı basıncı altındaki hücresel karakterizasyonu için önemlidir. Bu çalışmada kullanılan poliüretan köpüklerin geçirgenliği (K), literatürde kullanılan falling-head permeameter sistemi kullanılarak belirlenmiştir.

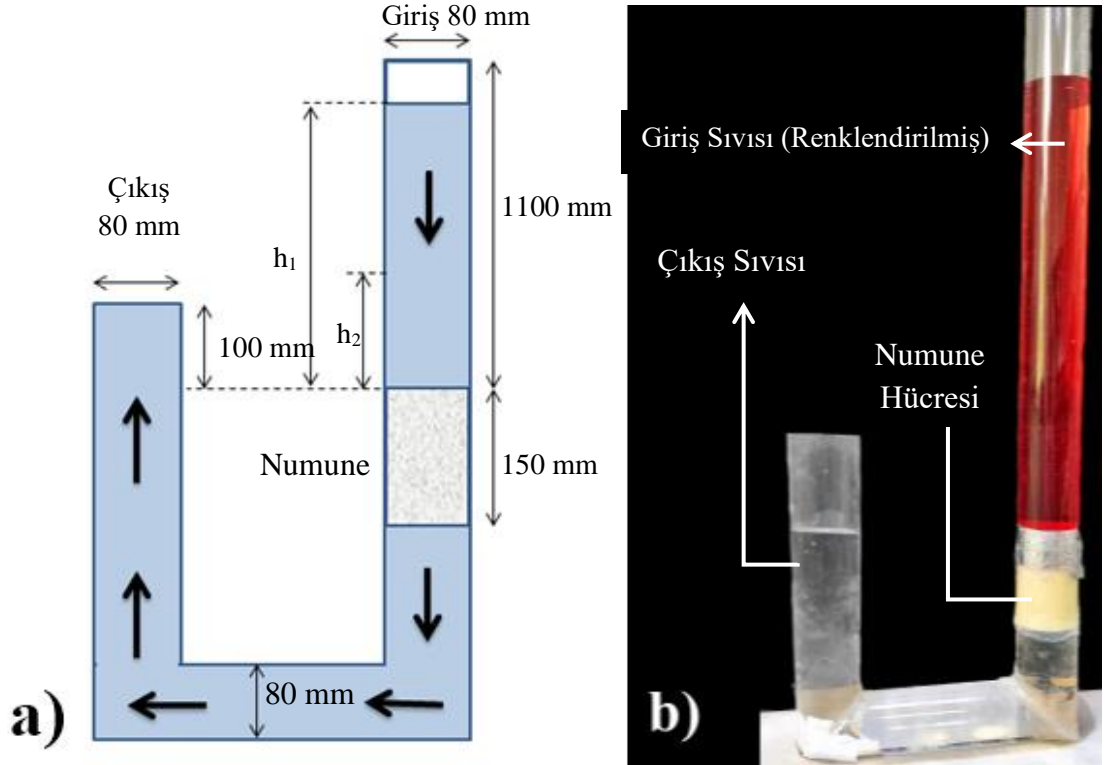
Bu test sisteminde geliştirilen malzemenin geçirgenlik değerinin belirlenmesi için şekil 3.27' de gösterilen hücre bölümünde üretim gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. 27. Sıvı geçirgenlik deneyinde numune hücresi geliştirilmesi.

Köpük numunelerin geçirgenliğini belirlemek için Şekil 3.28’ de gösterilen silindirik boru test sistemi kullanılmıştır. Sistemde 150 mm’ lik bir numune hücresi ve alta bir çıkış borusu bulunmaktadır. Silindirik borunun içinde numune hücresi bölümü bulunmaktadır. Numune hücresi içerisinde poliüretan köpük üretilmiştir. Sonrasında, borunun numune olan kolonu maksimum su yüksekliğine kadar kademeli olarak doldurulmuştur. Her bir kademede meydana gelen basınç etkisinde numunedeki sıvı geçirgenliği gözle muayene edilmiştir. Numuneye temas eden sıvı kırmızı renklidir. Olası geçirgenlik durumunda beyaz renkli sıvıda renk değişimi meydana gelecektir. Ayrıca

çıkış borusunda sıvı miktarındaki yükselmenin zamana bağlı değişimi sıvı geçirgenlik değeri hakkında bilgi verecektir.



Şekil 3. 28. Sıvı geçirgenlik testi (Falling Head Permeameter Test) a) şematik diyagram b) gerçek test düzeneği.

h_1 ve h_2 yüksekliklerine ve zamana bağlı olarak, geçirgenlik katsayısı K denklem 3.5' e göre belirlenmektedir.

$$K = \frac{\mu \cdot \alpha \cdot L}{\rho \cdot g \cdot A \cdot t} \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad (3.5)$$

Burada μ dinamik viskozite (Ns/m^2), ρ su yoğunluğu (kg/m^3), g yerçekimi ivmesi (m/s^2), α silindirik borunun (m^2) kesit alanı, A köpük numunesinin kesit alanı (m^2), L köpük numunesinin uzunluğu (m), h_1 su kolonunun ilk yüksekliği (m), h_2 su kolonunun son yüksekliği (m) ve t akış zamanıdır (s).

Geliştirilmiş kendi kendini onaran sandviç yapısı endüstriyel uygulamalarda kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Denizaltı boru hatları ve denizaltı araçları gibi sıvı basıncına maruz kalan uygulama alanlarında kullanımını değerlendirmek için basınç hesabı yapılmıştır. Sıvı geçirgenlik testi, dereceli sıvı basıncına bağlı olarak denklem 3.6' ya göre değerlendirildi:

$$P = h \cdot \rho \cdot g \quad (3.6)$$

Burada P sıvı basıncıdır (kg/ms^2), h sıvı yüksekliğidir (m), ρ sıvı yoğunluğudur (kg/m^3) ve g yerçekimi ivmesidir (m/s^2).

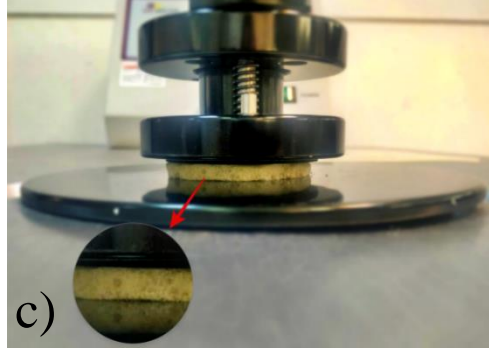
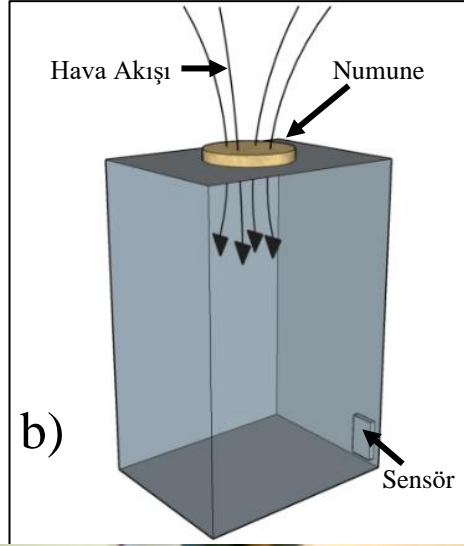
Deneyde, sıvı basıncı kademeli olarak artırıldı. Sırasıyla 40 cm, 70 cm ve 100 cm sıvı yüksekliklerinde 3,92 kPa, 6,86 kPa ve 9,81 kPa basınçlar uygulanmıştır.

3.3.5. Hava geçirgenlik testi

Hava geçirgenlik testi, gözenekli bir malzemeden geçen hava akışını ölçme sistemine dayanır. Şekil 29a'da kullanılan test cihazı, Şekil 29b' de hava üfleyen probu gösterilmektedir. Şekil 29c' de ise 5mm kalınlığında ve 30 mm çapında test alanına sahip numune hava akış test cihazına yerleştirilmiştir. Numune' de saniyede 5 mm lik alandan geçen hava miktarı litre cinsinden ölçülmektedir. Numuneden 4 farklı basınçta geçen hava miktarı ölçülmüştür.



Hava Akış Probu



Şekil 3. 29. Hava geçirgenlik testi a) Hava akış test cihazı. b) Cihaz çalışma prensibi. c) Hava probu altında deney numunesi.

Hava geçirgenliği, bir akışkanın gözenekli bir yapıdan çıkan akış hızını açıklar. Bu durumu açıklayan matematiksel ifade denklem 3.7' de belirtilmiştir.

$$q = \frac{Q}{At} \quad (3.7)$$

Burada q akış hızıdır (m/s), Q numuneden geçen sıvının akış hacmi (m^3), A numunenin kesit alanı (m^2) ve t zamandır (s).

Poliüretan köpükler üzerinde yapılan bir hava geçirgenlik testinde bu test yönteminin en doğru sonuçları verdiği görülmüştür. Testin gerçekleştirildiği numunede değişen basınç değerleri altında hava akış miktarı ölçülmüştür. Bu ölçümler sonucunda basınç arttıkça artan hava akış miktarı elde edilmiştir.

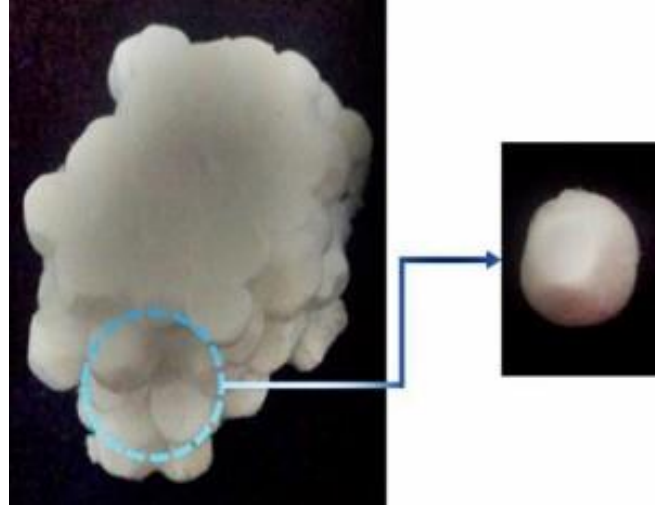
3.3. Ultra hızlı şekilde kendi kendine iyileşebilen kompozit malzemeler

3.3.1. Ultra hızlı kendi kendine iyileşen malzemelerin üretim süreci

Çalışmada matris malzemesi olarak epoksi kullanılmıştır. Sertleştirici ajan olarak Akkim alkil-siyanoakrilat yapıştırıcısı seçilmiştir. Sertleştirici ajanın hızlı kürleşmesi için ise toz aktivatör vasfına sahip endüstriyel alanda sıklıkla kullanılan sodyum bi karbonat ($NaHCO_3$) kullanılmıştır. Siyanoakrilat iyileşme ajanı geliştirilen makro kapsüller içerisine hapsedilmiştir. Hasar gören kapsüllerden dışarı sızan iyileşme ajanı matris malzemeleri içerisinde homojen dağılmış $NaHCO_3$ ile temas etmesi ile anlık iyileşme meydana gelir. Bu esnada meydana gelen kimyasal tepkime sonucunda yüksek ısı açığa çıkmaktadır. Siyanoakrilatın yapıdan dışarı taşması durumuna karşı geliştirilen numunelerin yüzeyleri silikon malzeme ile kaplanmıştır. Silikon ile siyanoakrilatın temas etme ihtimaline karşılık silikon içerisinde homojen olacak şekilde $NaHCO_3$ ilave edilmiştir. Böylece hem yüzeyde yapısal kusurlar giderilmiş hem yüzey pürüzlülüğü

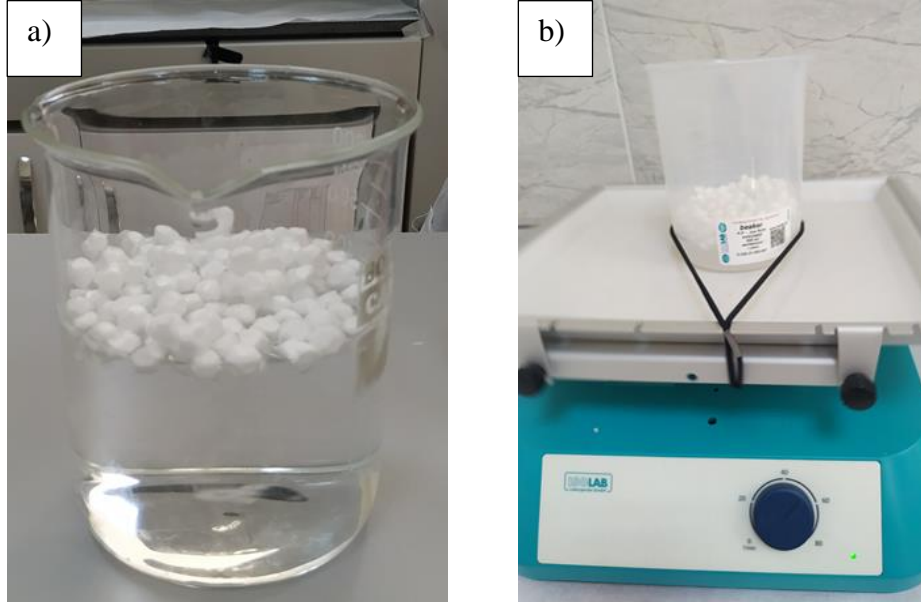
korunmuş hem de kimyasal ve fiziksel tehditlere karşı yapı korunmuştur. Görsel analiz, mekanik deneyler ve termal görüntüler ile iyileşmeler incelenmiştir.

Anlık olarak kendi kendine iyileşmelerin meydana geldiği bu çalışmada, önceki bölümlerdeki gibi polistren köpük üzeri epoksi ile kaplanmıştır. Bu aşamadan sonra polistren uzaklaştırılarak kapsül elde edilmiştir (Şekil 3.30).



Şekil 3. 30. Ultra hızlı iyileşen kapsül geliştirilmesinde kullanılan polistren köpük.

Çalışma da önceki çalışmalardan farklı olarak, kapsül cidarlarında NaHCO_3 kullanılmamıştır. Çünkü kapsül içerisine doldurulacak siyanoakrilat ile NaHCO_3 ile aktive olmaktadır. Ayrıca önceki çalışmalarda polistrenin kapsül içerisinden uzaklaştırılması NAHCO_3 ile oluşturulan gözenekler ile sağlanırken bu çalışmada ise enjektör ile kapsül delinip içerisine aseton çözeltisi emdirilmektedir. Bu işlem çalkalayıcı yardımıyla gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.31).



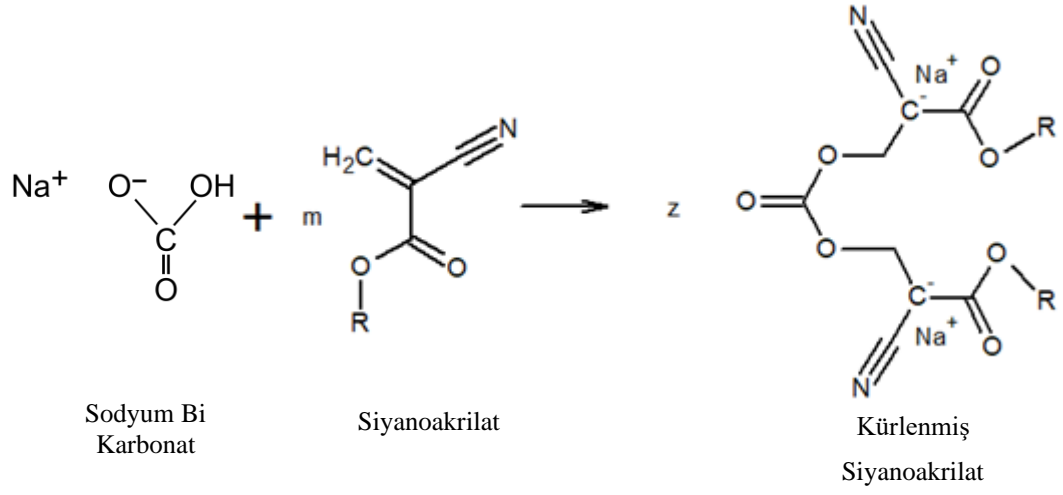
Şekil 3. 31. Epoksi kaplı polistiren köpüğün yapı içerisinden uzaklaştırılması.

Tek katmanlı epoksi ile kaplanan polistren köpük yapıdan uzaklaştırıldığında yapısal olarak oldukça hassas bir kabuk yapısı elde edilmiştir. Bu sebeple 2 kez daha epoksi ile kaplanan kapsüller rijit form kazanmıştır (şekil 3.32). Ayrıca yapısında olması muhtemel kılcal çatlaklar ve yüzey kusurları ortadan kaldırılmıştır.



Şekil 3. 32. Üç katmanlı epoksi makro kapsül.

Bu çalışmada, siyanoakrilatların anyonik kürlenmesi, baz esaslı katalizöre bağlı olarak ilerlemektedir. Alkil-2-siyanoakrilatlar, ortam sıcaklıklarında zayıf bazların varlığında anyonik mekanizma ile hızla polimerleşir. Reaksiyon oldukça ekzotermiktir. Anyonik polimerizasyon reaksiyonlarında normal şartlarda sonlanma tepkimeleri gözlenmez. Bu yüzden siyanoakrilatın sertleşme reaksiyonu ortamdaki monomer molekülleri tamamen harcanana kadar devam eder. Sodyum karbonatın elektron yüklü aktif uçlu oksijeni, R—CN yapısındaki CN grubunun elektron çekici özelliği sayesinde alkil yapıdaki çift bağ ile reaksiyona girer. Sodyum karbonatın iki tane elektron yüklü oksijeni olması sertleşme reaksiyonunun hızlı olmasını sağlar (Şekil 3.33).



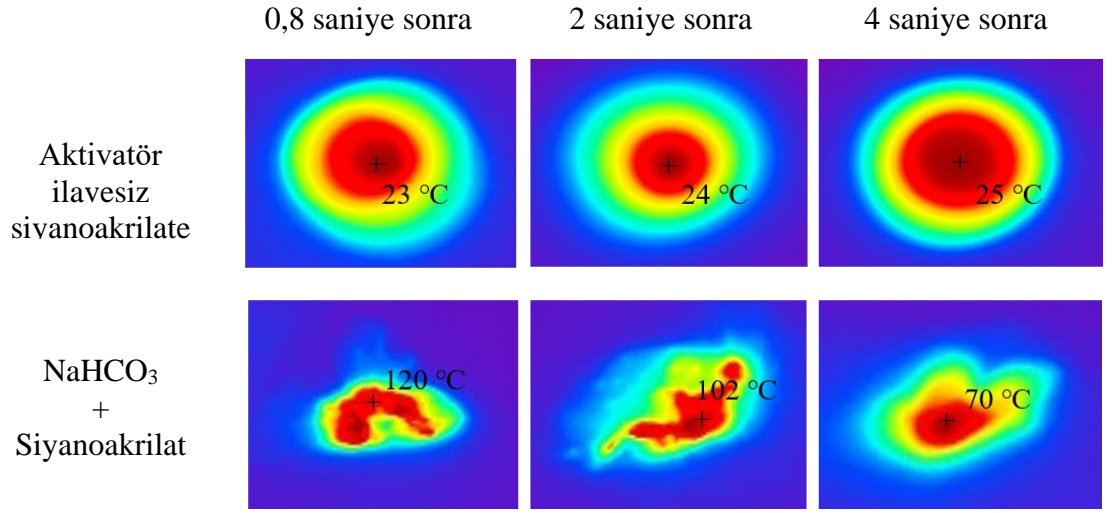
Şekil 3. 33. Siyanoakrilat ile Sodyum bi karbonat kimyasal reaksiyonu.

Şekil 3.33’ de gösterilen kimyasal reaksiyon esnasında yüksek ısı açığa çıkmaktadır. Bu ısı iyileşmenin termal ispatı anlamına gelmektedir. Bu nedenle şekil 3.34’ de gösterilen Testo 885 markalı termal kamera ile reaksiyon esnasında meydana gelen ısı değerleri ölçülmüştür.



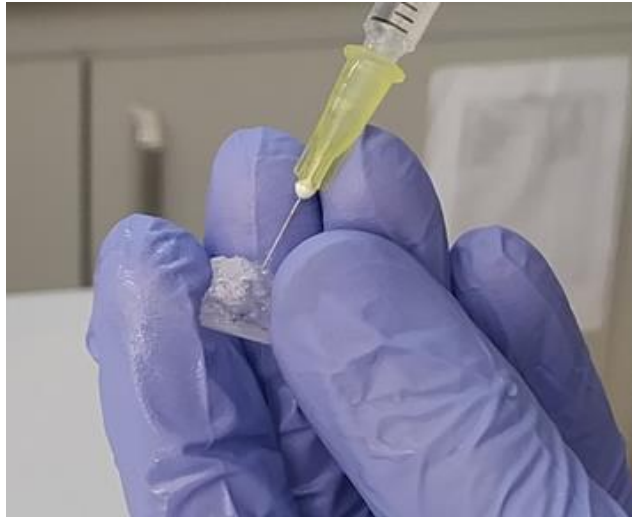
Şekil 3. 34. Tepkime esnasında meydana gelen ısı değerlerinin termal kamera ile ölçümü.

Meydana gelen ısı değerlerinin siyanoakrilatın herhangi bir aktivatör kullanmaksızın meydana gelip gelmeyeceği ortaya atılan hipotezin ispatı açısından önemlidir. Şekil 3.35’de gösterilen termal kamera görüntülerinde aktivatör ilave edilmemiş siyanoakrilatın yaklaşık 4 dakikalık zaman süresince katılaştığı ve bu esnada oda sıcaklığı civarında ısının korunduğu görülmektedir. Toz aktivatör olarak kullanılan NaHCO_3 ise siyanoakrilat ile temas ettikten hemen sonra yaklaşık $120\text{ }^\circ\text{C}$ ’lik bir ısı açığa çıkmaktadır. Bu ısı şekil 3.33’ de gösterilen tepkimenin sonucudur.



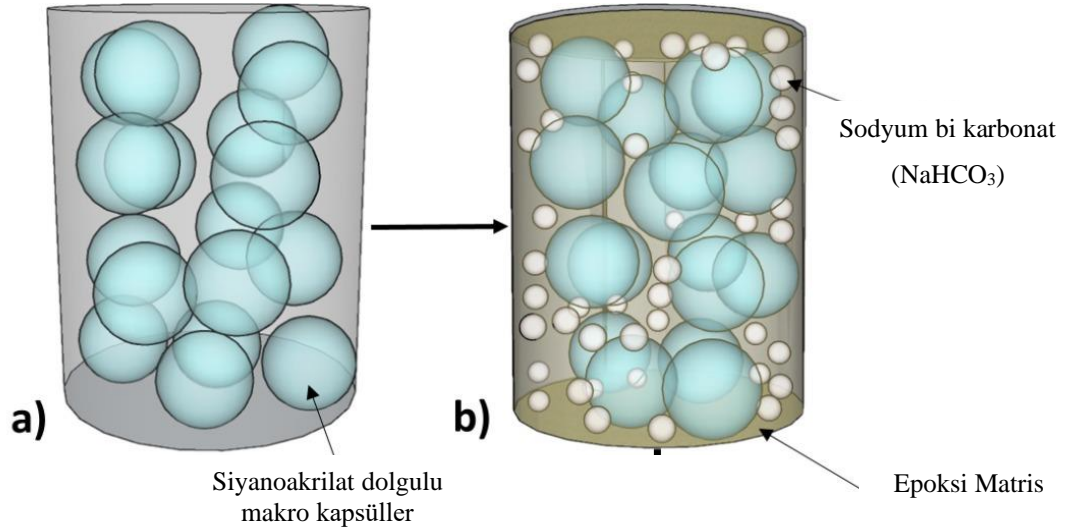
Şekil 3. 35. Toz aktivatör ile sivanoakrilat tepkimesi esnasında açığa çıkan anlık ısı.

Geliştirilen kapsüllerin içleri enjektör yardımıyla şekil 3.36' da gösterilen sivanoakrilat ile doldurulmuştur. Sivanoakrilat havanın nemi ve basıncı altında oldukça hızlı şekilde kürlenme yeteneğine sahiptir. Bu nedenle doldudulan kapsüllerin enjektör delikleri daha viskoz yapıya sahip sivanoakrilat ile doldurulmuştur. Böylece iyileşme kapsülleri elde edilmiştir.



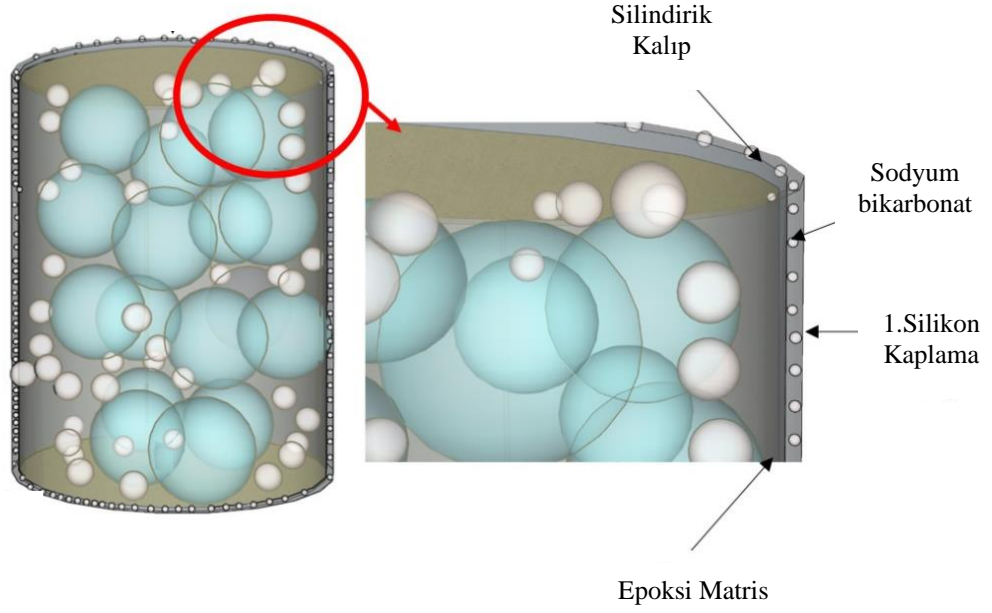
Şekil 3. 36. İyileşme ajanlarının kapsül içerisine doldurulması.

Geliştirilen kapsüller 15mm çapında ve 30 mm yüksekliğinde kalıplar içerisinde doldurulmuştur. Kapsüllerden arta kalan boşluklar epoksi matris ile doldurulmuştur. Şekil 3.37’ de gösterilen epoksi matris içerisinde ise dolgu malzemesi olarak homojen dağılmış NaHCO_3 yer almaktadır. İlave edilen toz aktivatör vasıflı NaHCO_3 oranları deneysel tasarım yöntemi ile belirlenmiştir.



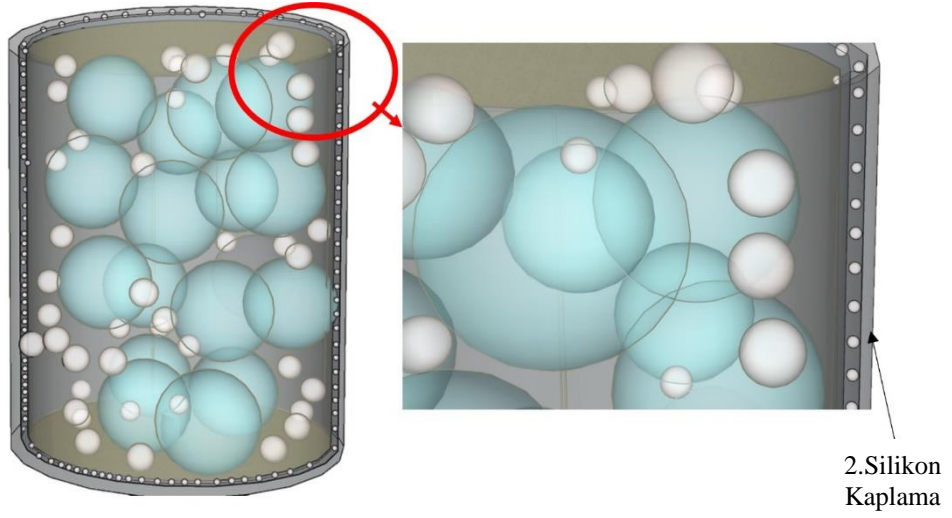
Şekil 3. 37. Siyanoakrilat dolgulu iyileşme kapsüllerinden numune üretilmesi. a) Kalıp içerisinde kapsüllerin ilavesi. b) boş hacmin NaHCO_3 dolgulu epoksi ile doldurulması.

İyileşme ajanları ile kürelerin NaHCO_3 dolgulu epoksi içerisinde hapsedilmesiyle elde edilen numunelerde meydana gelebilecek hasarlar sonrası siyanoakrilat ajanının numuneden taşma ihtimali göz önünde bulundurulmuştur. Çünkü kullanılan siyanoakrilat düşük viskoziteye sahiptir. Bu nedenle yüzey silikon ile kaplanmıştır. Ayrıca Şekil 3.38’ de gösterildiği gibi akışkan halde yüzeye temas eden ajanların aktive olması amacıyla silikon içerisinde karbonat dolgusu ilave edilmiştir.



Şekil 3. 38. Silindirik kendi kendine iyileşen numune yüzeyinin NaHCO_3 dolgulu silikon ile kaplanması.

Gerçekleştirilen ilk kaplamanın ardından numune yüzeyleri pürüzsüz hale getirilip kırılan kapsüllerden sızan ajanların muhtemel dışarı sızması engellenmiştir. Fakat, NaHCO_3 dolgusu ile silikon kaplamasının kesme ve eğilme kuvvetlerine karşı direnci zayıflamaktadır. Bu nedenle Şekil 3.39’ da gösterilen ikinci bir kaplama ile yüzey mukavemeti artırılmıştır.



Şekil 3. 39. Silindirik kendi kendine iyileşen numune yüzeyinin saf silikon ile (ikinci kez) kaplanması.

Bası deneylerinin etkisinde numuneler plastik deformasyona uğramaktadır. Bu deformasyonların etkisinde iyileşme ajanlarını barındıran kapsüller hasara uğramakta ve ajanlar kusurlu bölgelere dağılmaktadır. Şekil 3.40' da hasar öncesi numune görseli ve hasar sonrası kesiti alınmış numune gösterilmiştir. Şekilde hasar gören ve hasar germemiş kapsül görülmektedir. Hasar sonrası çatlak bölgelerine ilerlerken toz aktivatör ile test sonucu iyileşme vasfını sergileyen siyanoakrilat ajan kalıntıları görülmektedir.

Hasara uğratılan numune.



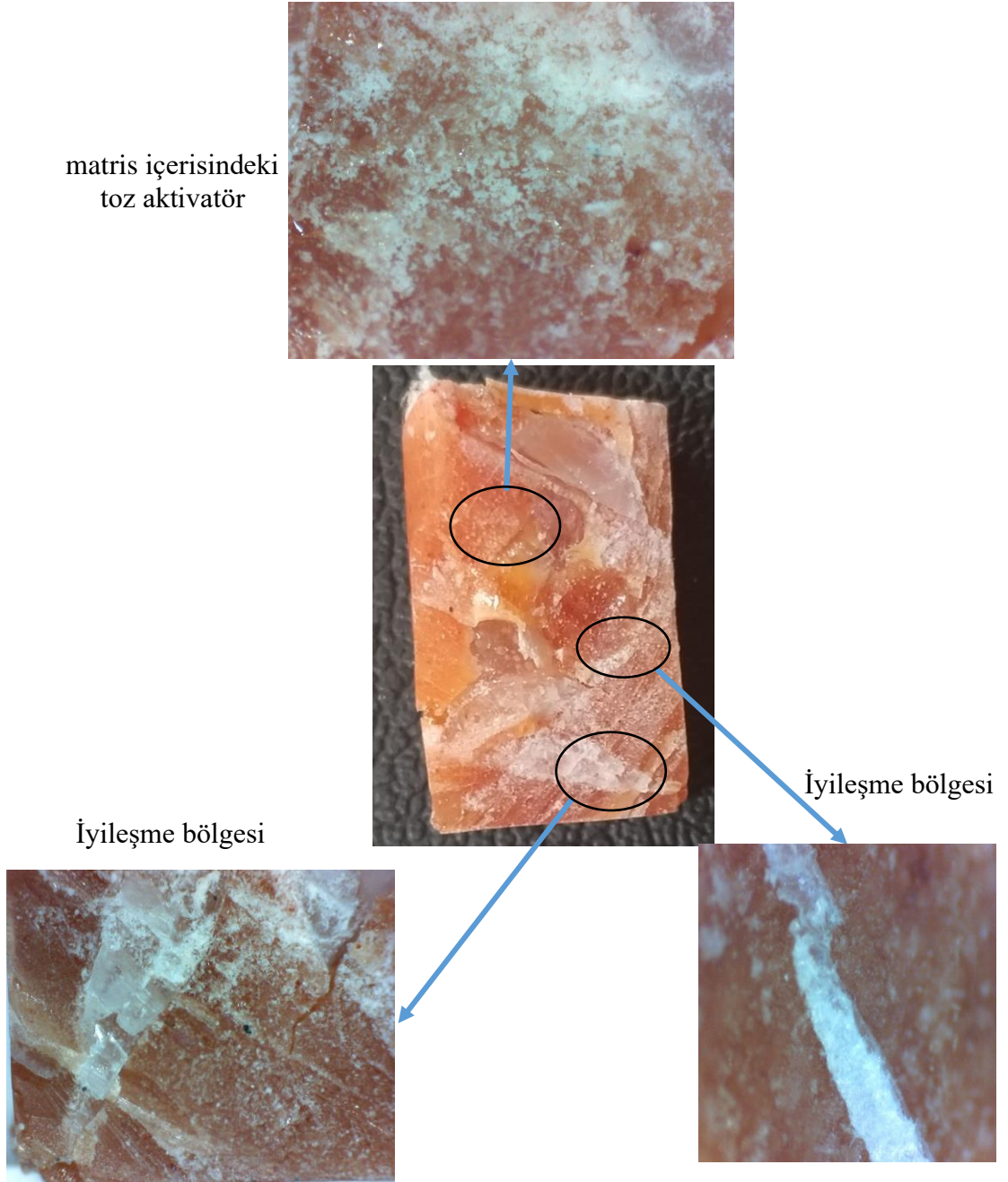
Anlık olarak iyileşmiş çatlak bölgeleri



Hasar görmemiş kapsül

Şekil 3. 40. Kesiti alınmış numune.

Matris malzemesi gıda boyası ile turuncu rengi boyanmıştır. Böylece matris içerisindeki toz aktivatör daha net görülecektir. Toz aktivatörler, hasar bölgelerinde meydana gelen iyileşmeler şekil 3.41' de gösterilmiştir.



Şekil 3. 41. İyileşme bölgelerinin mikroskop görüntüleri.

3.3.2. Deneysel tasarım analizi

➤ Ultra hızlı kendi kendine iyileşebilen kompozit malzeme hazırlanması ve optimizasyonu için deneysel tasarım

Ultra hızlı kendi kendine iyileşebilen kompozit malzeme üretimi sırasında kullanılan epoksi matris ve sodyum bikarbonat yüzde bileşenlerinin sayısal optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Epoksi matris içerisinde bulunan kürleştirici özellik gösteren sodyum bikarbonat yüzde 5-15 arası olacak şekilde seçilmiştir. Bunun nedeni %20'lik sodyum bikarbonatın epoksi matrise ilavesi ile epoksi viskozitesini arttırmaktadır. Bu durum üretim aşamasında zorluklara neden olmaktadır. Deneysel tasarımında iki faktör (sodyum bikarbonat ve epoksi matris) için belirlenen sayısal limitlerde karışım tasarımı yapılmıştır. Bu tasarım Design Expert 11 programında oluşturulmuştur. İstatistiksel olarak anlamlı sonuçlar için 3 tekrarlı 2 orta noktalı 10 tane deney belirlenmiştir. Deneysel tasarımı sonucu olarak malzemenin enerji absorpsiyon değerleri dikkate alınmıştır.

➤ Deneysel tasarım yönteminde karışım tasarımı

Karışım tasarımları optimizasyonu yapılacak malzemenin çıktıları üzerinde faktörlerin oranlarının bir fonksiyonu olarak değiştiğinde kullanılmaktadır. Çalışma esnasında kullanılan ölçü birimleri aynı olmalıdır. Bununla beraber bu tasarımda faktörlerin toplamı sabit bir değeri göstermektedir. Faktörlerin değişen alt ve üst limit değerleri vardır.

Bu çalışmada oluşturulan karışım tasarımı çizelge 3.1' de verilmiştir. Sodyum bikarbonat ve epoksi matris faktörlerine ağırlıkça yüzde olarak değer verilmiştir. Deneysel sıralaması, örneklemede rassallık olması için rastgele dizilmiştir. Faktörler 3 tekrarlı ve 2 orta noktalı olacak şekilde hazırlanmıştır.

Çizelge 3. 1. Ultra hızlı kendi kendine iyileşebilen kompozit malzeme için deneysel tasarım.

| Standart Sıra | Çalışma | Değişken 1 A: Sodyum bikarbonat wt% | Değişken 2 B: Epoksi matris wt% |
|----------------------|----------------|--|--|
| 1 | 8 | 15 | 85 |
| 2 | 3 | 5 | 95 |
| 3 | 4 | 10 | 90 |
| 4 | 6 | 12,5 | 87,5 |
| 5 | 5 | 7,5 | 92,5 |
| 6 | 1 | 15 | 85 |
| 7 | 10 | 5 | 95 |
| 8 | 2 | 10 | 90 |
| 9 | 9 | 15 | 85 |
| 10 | 7 | 5 | 95 |

Karışım tasarımı varyans analizi

Varyans analizi, faktörler arasındaki farkları veya farkın rastgele olup olmadığını ortaya koymaktadır. Bu anlamda P-değeri önem kazanmaktadır. Eğer p değeri 0.05'ten küçük ise oluşturulan deney tasarımının istatistiksel olarak anlamlı olduğu sonucuna varılmaktadır. Bu durum, faktörlerin karelerinin ortalaması arasında 0.05 değerinden küçük bir fark olduğunu çıkartmaktadır.

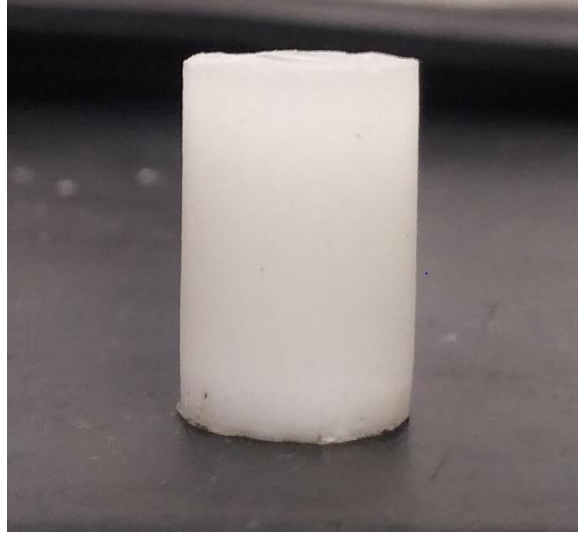
➤ Deneysel tasarımda sayısal analiz ile optimizasyon

Ultra hızlı kendi kendine iyileşebilen kompozit malzeme Deney tasarımı sonrası sonuçların ANOVA analizi gerçekleştirilir. Bu analiz sonucu faktörler arası etkileşimler yorumlanmıştır. Deney tasarımı çıktı olarak malzemenin absorbe ettiği enerji yer almaktadır. Bu çıktı malzeme üzerinde darbe sonrası iyileşmenin belirgin bir göstergesidir. Bu yüzden absorpsiyon enerji değerinin maksimum olması istenmektedir. Design expert programı içerisinde yer alan sayısal analiz optimizasyonu sayesinde Ultra hızlı kendi kendine iyileşebilen kompozit malzeme numunesi istenilen koşullarda optimize edilmiştir.

3.3.3. Bası deneyleri

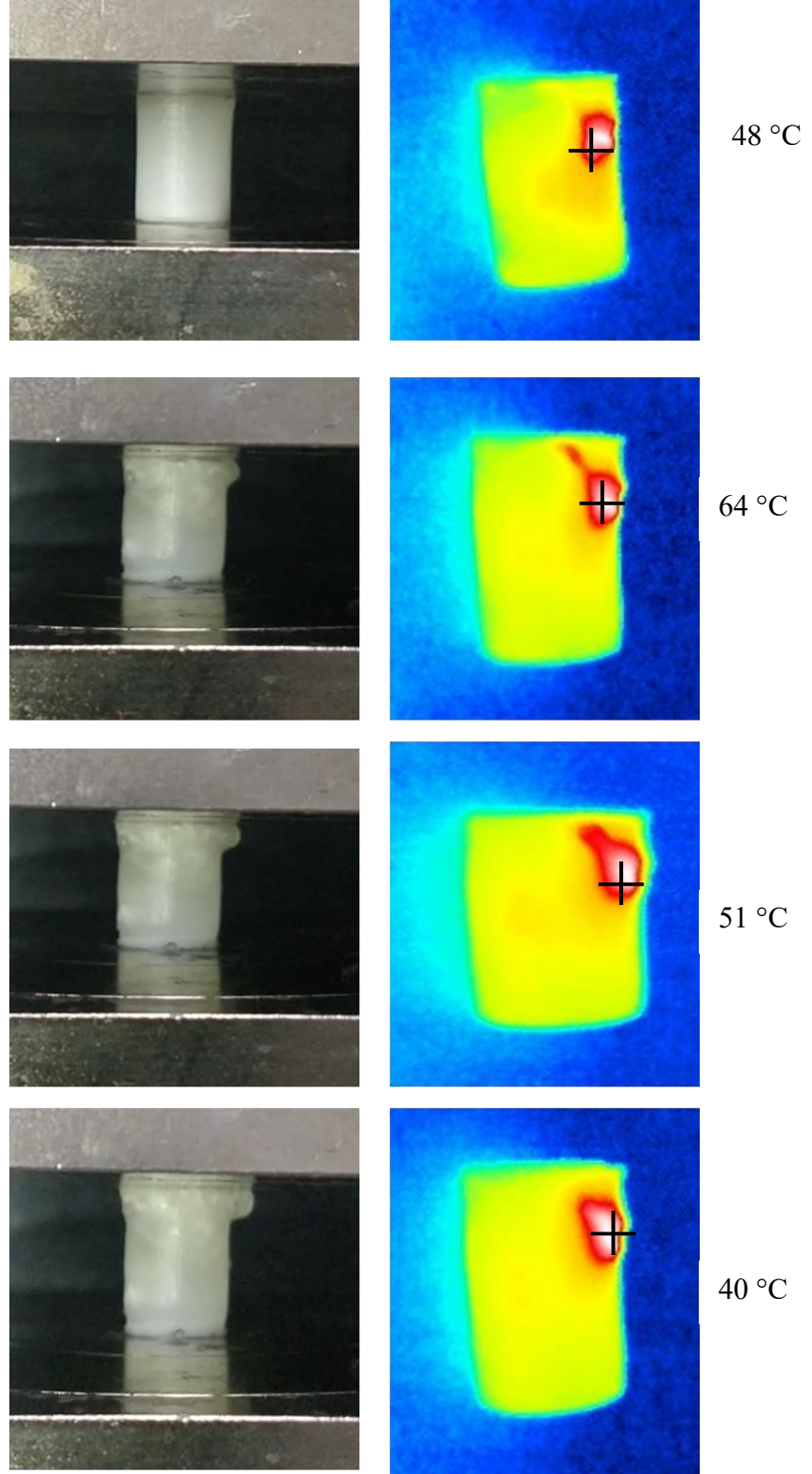
Geliştirilen bası testi numuneleri ASTM D695-15 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Numune boyutları 25.4 mm boyunda ve 12.7 mm çapında silindirik olarak hazırlanmıştır. Test hızı dakikada 3 mm olarak ayarlanmıştır.

Geliştirilen bası numunelerinin son hali şekil 3.42' de gösterilmiştir.



Şekil 3. 42. Silindirik bası ve darbe deney numunesi.

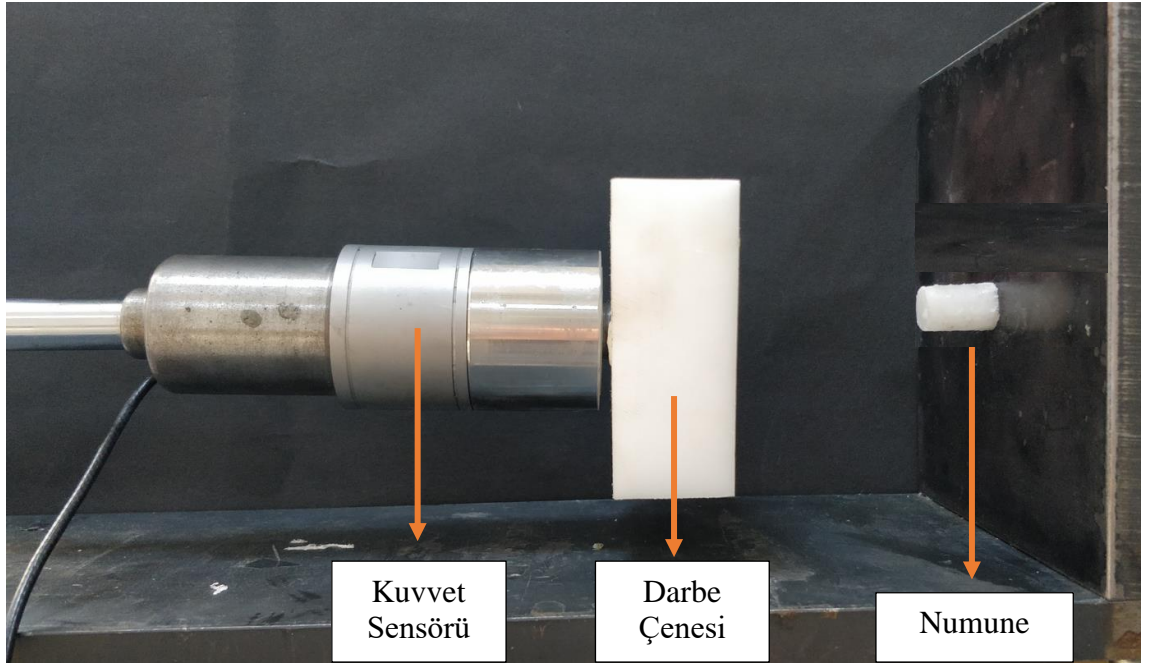
Şekil 3.43' de gösterilen bası deneyleri altındaki numunelerin şekil değişimleri görülmektedir. Bu esnada termal kamera görüntüleri de alınmıştır. Kapsüllerden sızan siyanoakrilatın NaHCO_3 dolgusu ile temasının ardından açığa çıkan ısının kendi kendine iyileşmeyi göstereceği şekil 3.34' de termal kamera görüntüleri ile gösterilmiştir. Böylece kusur bölgeleri ve ardından hasarın giderilmesi açıkça görülmektedir.



Şekil 3. 43. Bası deneyleri esnasında kendi kendine iyileşmenin ısı değişim miktarı.

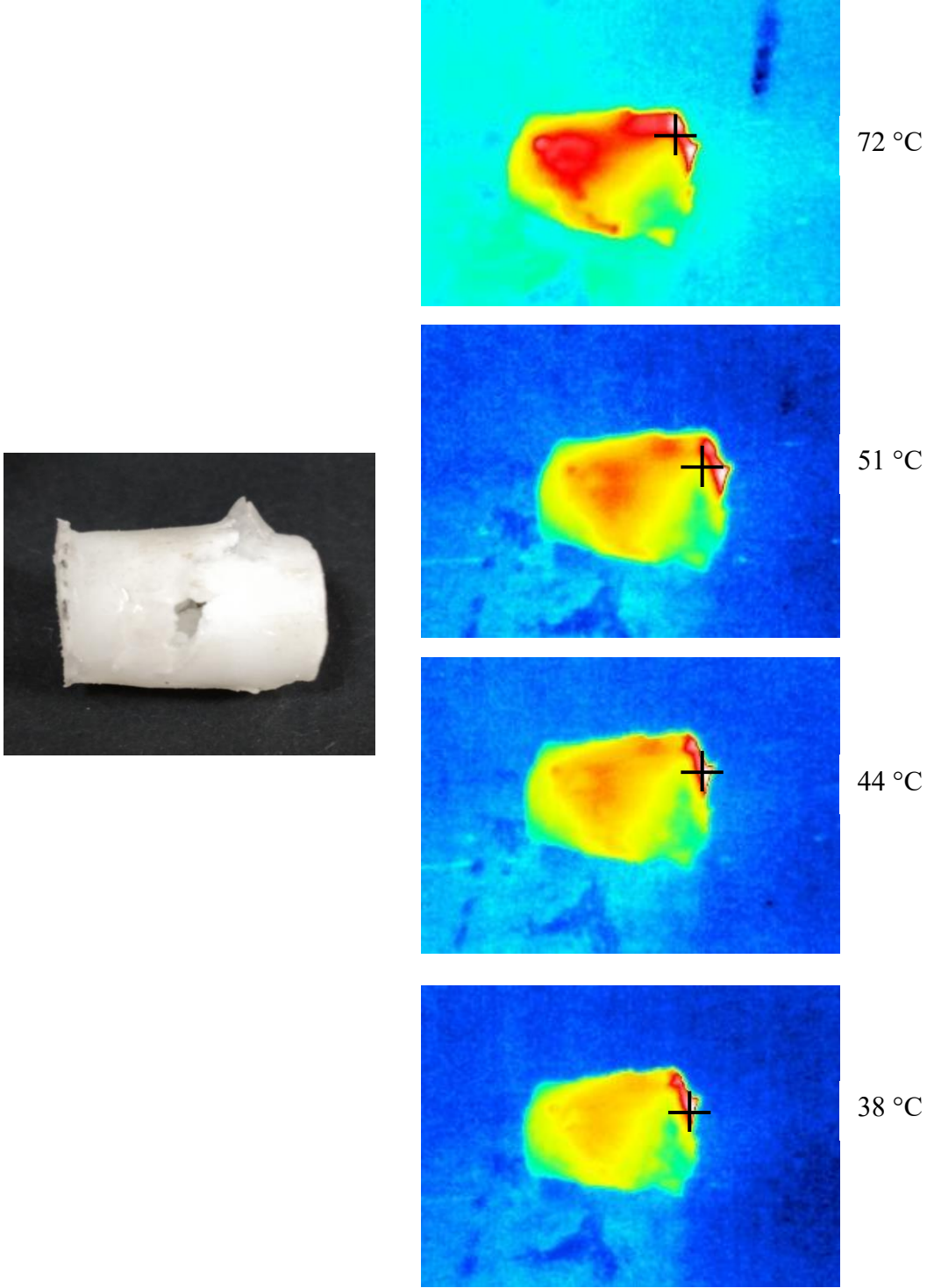
3.3.4. Darbe deneyleri

Geliştirilen darbe testi numuneleri ASTM D695-15 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Numune boyutları 25.4 mm boyunda ve 12.7 mm çapında silindirik olarak hazırlanmıştır. Bası deneylerinden farklı olarak test hızı 8 m/s olarak hesaplanmıştır. Gerçekleştirilen test Bursa Uludağ Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü Darbe Cihazında gerçekleştirilmiştir. Test cihazı şekil 3.44' de gösterilmiştir.



Şekil 3. 44. Darbe test cihazı.

Darbe deneyleri ile numunede meydana gelen plastik deformasyon ve termal değişimler şekil 3.45' de gösterilmiştir. Darbe ile numune içerisindeki kapsüllerdeki kırılmalar ile kapsül içerisindeki iyileşme ajanlarının dağılımı görülmektedir. NaHCO_3 ile temas eden siyanoakrilatın anlık kürlenme ile hasarı giderdiği görülmektedir. Bası deneylerinde açığa çıkan ısı ile karşılaştırıldığında, darbe deneylerinde daha fazla ısı açığa çıkmaktadır. Bunun nedeni olarak darbe ile yapıda var olan neredeyse tüm kapsüller kırılmış ve daha fazla siyanoakrilat ile sodyum bikarbonatın temas etmesi ifade edilebilir.

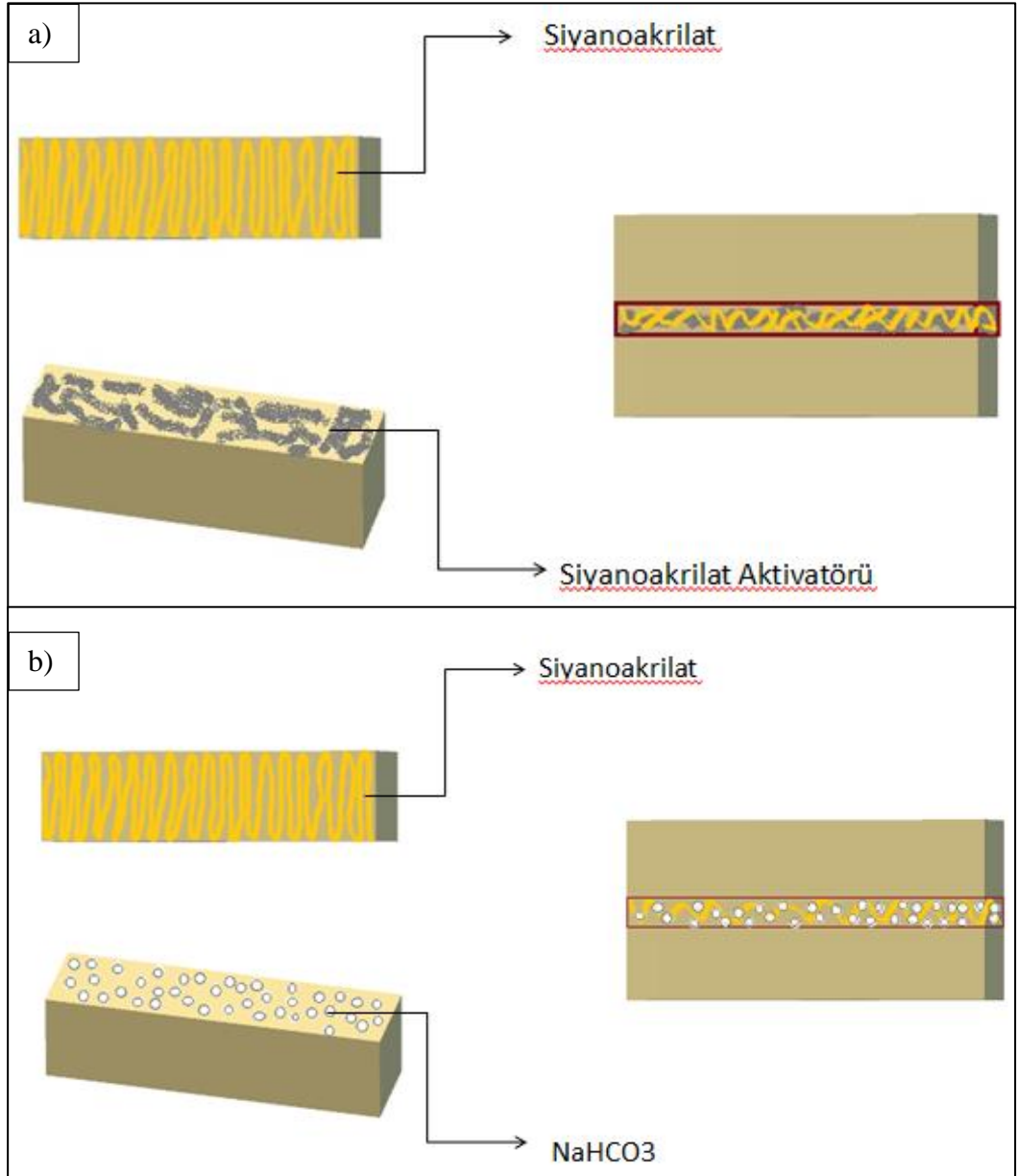


Şekil 3. 45. Darbe deneyleri esnasında kendi kendine iyileşmenin ısı değişim miktarı.

3.3.5. Tek nokta bindirme testi (SLJ testi)

Tek nokta bindirme testi yapıştırıcının kayma mukavemetini belirlemek için gerçekleştirilir. Elde edilen mekanik özellikler üst üste bindirme uzunluğu, malzeme mekanik değerleri ve malzeme kalınlığına bağlıdır.

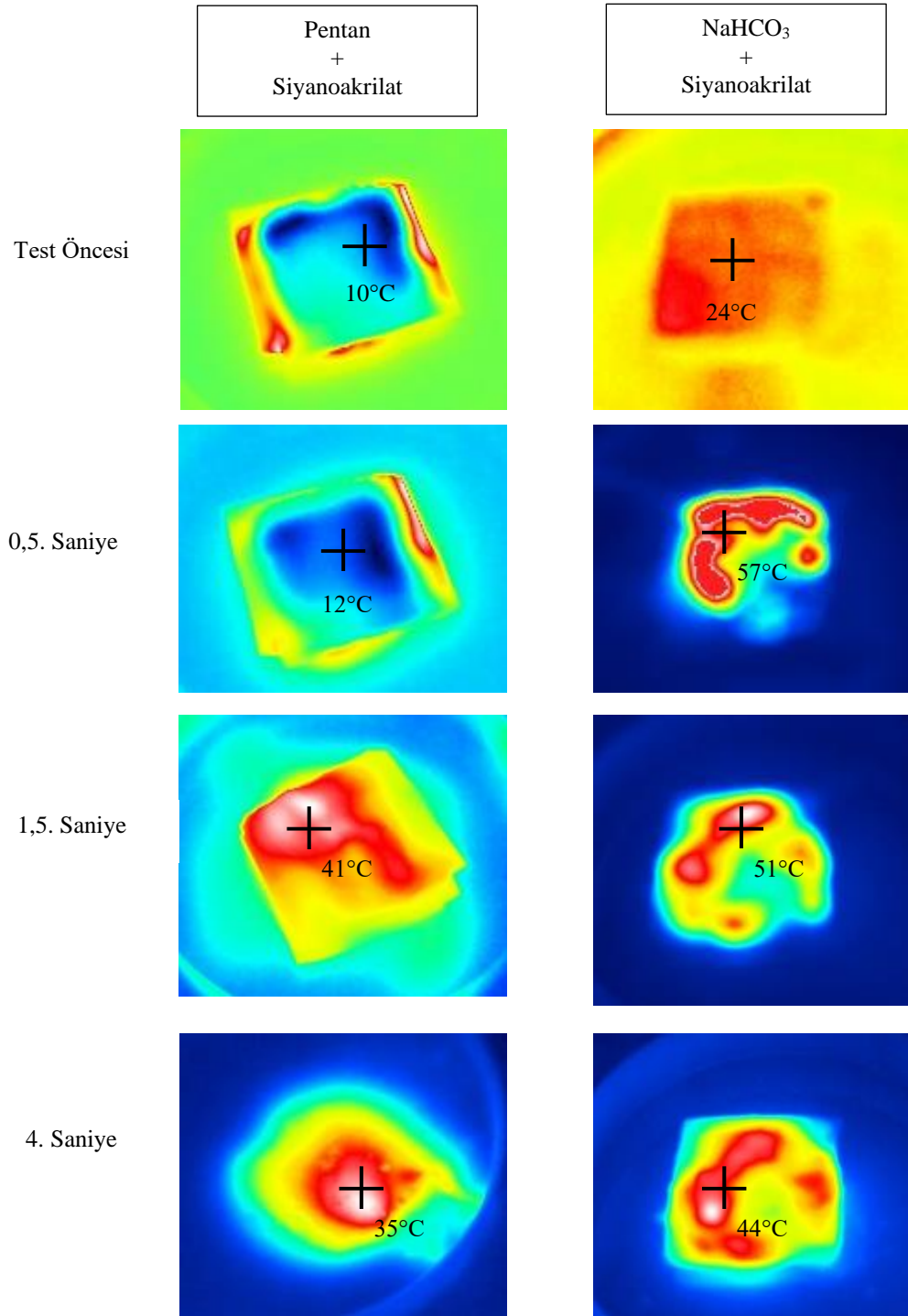
Deneylerin gerçekleştirilme amacı şekil 3.46' de üretim şeması verilen siyanoakrilat aktivatörü olarak kullanılan pentan, toz aktivatör olarak bu çalışmada kullanılan NaHCO_3 ile aktivatör kullanmadan hava basıncı ve nemiyle aktive olan yapıştırıcının birbirleri ile karşılaştırılmasıdır. Epoksi matris malzemeleri ile siyanoakrilat yapıştırıcının ara yüzey uyumu da oldukça önemlidir. Uyum olmayan yapıştırıcılarla gerçekleştirilecek kendi kendine iyileşme yapısal kusurun onarılmasına katkı sağlayamamaktadır.



Şekil 3. 46. Farklı aktivatörler ile yapışma sağlayan siyanoakrilat ile epoksi ara yüzeyleri.

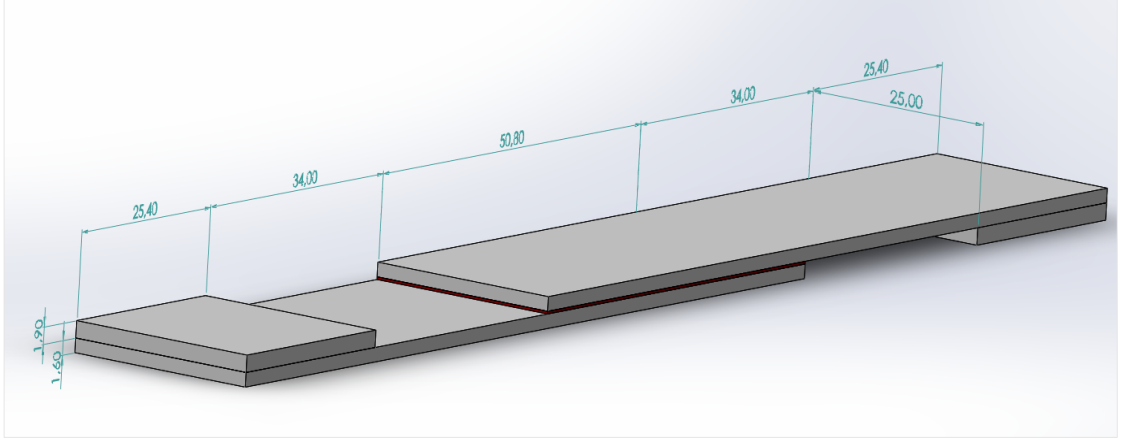
Ultra hızlı yapışmalarda ara yüzey uyumlarının belirlenmesinde farklı yöntemler mevcuttur. Bu esnada açığa çıkan ısının tespiti bu yöntemlerden biridir. Bu sebeple siyanoakrilat ile aktivatörlerinin teması esnasında termal kamera ile görüntüler alınmıştır (Şekil 3.47). Bu görüntülerden anlaşılacağı üzere NaHCO_3 ile yapıştırıcı tepkimesinde anlık yüksek ısı açığa çıkmakta ve yüksek rijitliğe sahip yapışma bölgesi oluşacaktır.

Endüstride sıklıkla kullanılan pentan kullanıldığından pentanın kimyasal karakteristiği gereği ilk başta düşük ısıl değerı görölmektedir. 1,5 saniye sonra ise anlık ısı ağığa çıkmıştır.



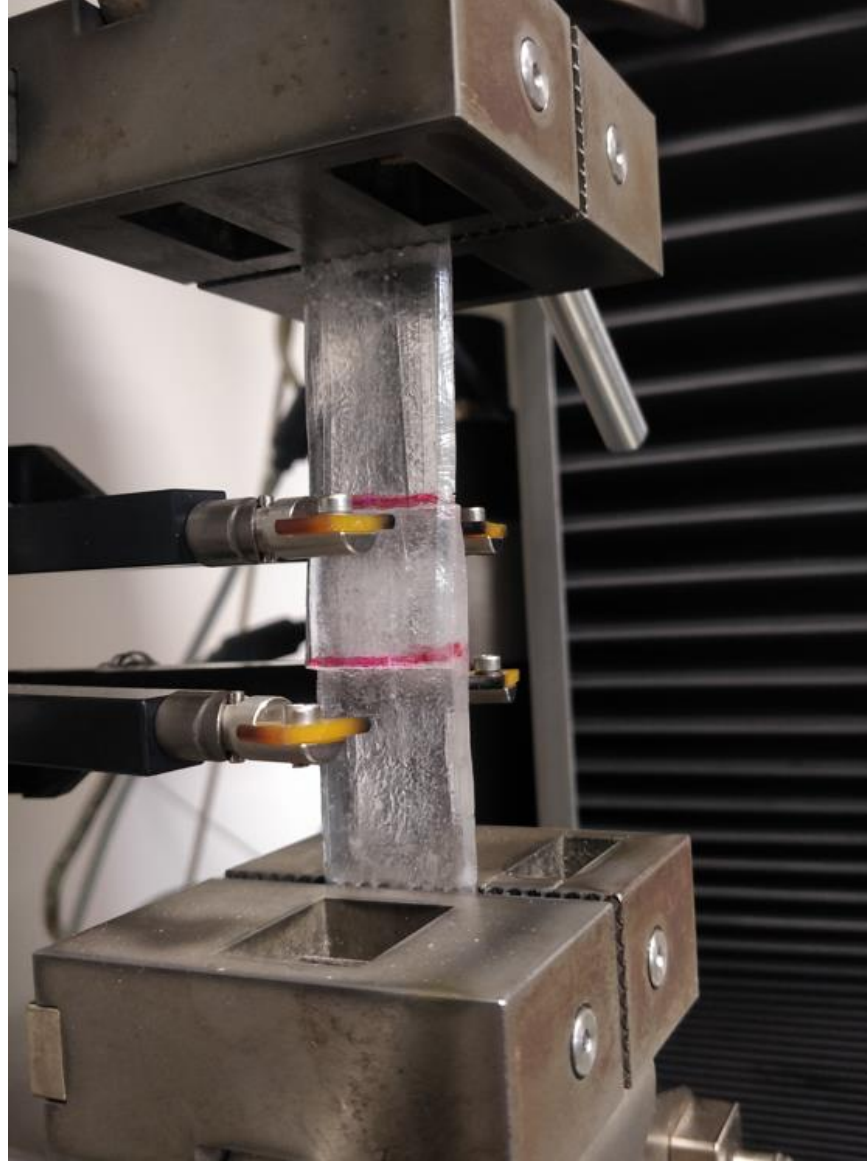
Şekil 3. 47. Siyanoakrilatın farklı aktivatörler ile yapışma yüzeylerinde zamana bağlı açığa çıkan ısı değerleri.

Termal kamera görüntüleri ile ara yüzey varlığının tespit edilmesi sonrası SLJ testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testler için hazırlanan numunenin şema görünümü şekil 3.48’ de gösterilmiştir.



Şekil 3. 48. ASTM D1002 standardına göre hazırlanmış SLJ numuneleri (Hayırkuş, 2021)

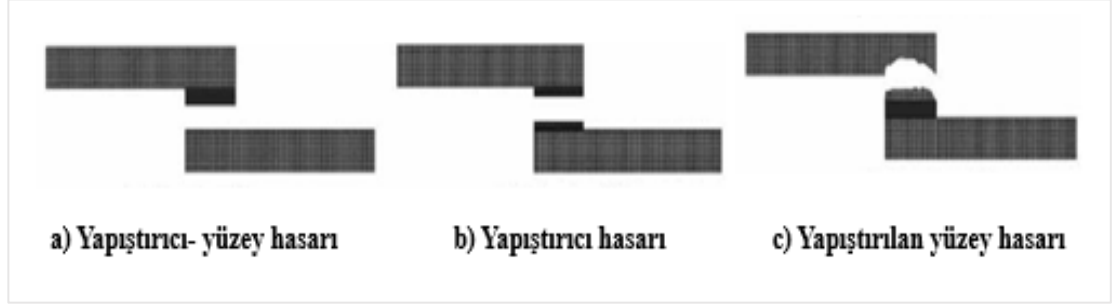
ASTM D1002 standardı kullanılarak hazırlanan numuneler çekme cihazına bağlanır. Test sonucunda kuvvet- deplasman grafikleri elde edilir. Çekme çenelerine bağlanan numuneler şekil 3.49’ da gösterilmiştir.



Şekil 3. 49. Çekme çenelerine bağlanmış SLJ test numunesi.

Tek nokta bindirme testi sonrası karşılaşılabilecek hasar tipleri bazıları Şekil 3.50' de verilmiştir. Test sonucunda hasarlar incelendiğinde ayrılma yapıştırıcı ve malzeme arasından gerçekleşmiş ise yapışmanın iyi olmadığı sonucu çıkarılır (Şekil 3.50.a). Ayrılma yapıştırıcıdan olmuşsa malzeme-yapıştırıcı arasındaki yapışma mukavemetinin yapıştırıcının mukavemetinden daha yüksek olduğu şeklinde bir yorum yapılabilir (Şekil

3.50.b). Veya yapıştırıcıda hiçbir ayrılma olmadan malzeme hasara uğramışsa bu yapışmanın mükemmel olduğu anlamına gelir (Şekil 3.50.c).



Şekil 3. 50. Yapıştırıcı hasar incelenmesi (Hayırkuş, 2021).

Test sonrası kayma gerilmesi denklem 3.8'deki gibi hesaplanır:

$$\tau_{av} = \frac{P_{max}}{l.b} \quad (3.8)$$

τ_{av} : Ortalama Kayma Gerilmesi

P_{max} : Numuneye Uygulanan Maksimum Yük

l : Yapıştırıcı Boyu

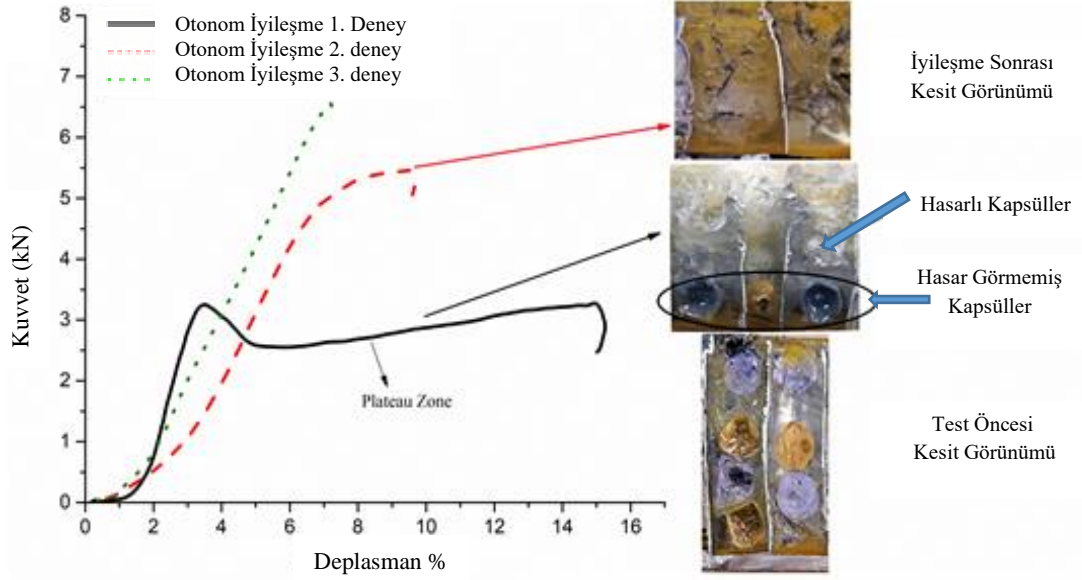
b : Yapıştırıcı Genişliği (Aslıhan Tez)

4. BULGULAR

4.1. Epoksi Bazlı Kendi Kendine İyileşebilen Sandviç Yapı Karakterizasyon Sonuçları

4.1.1. Bası Deney Sonuçları

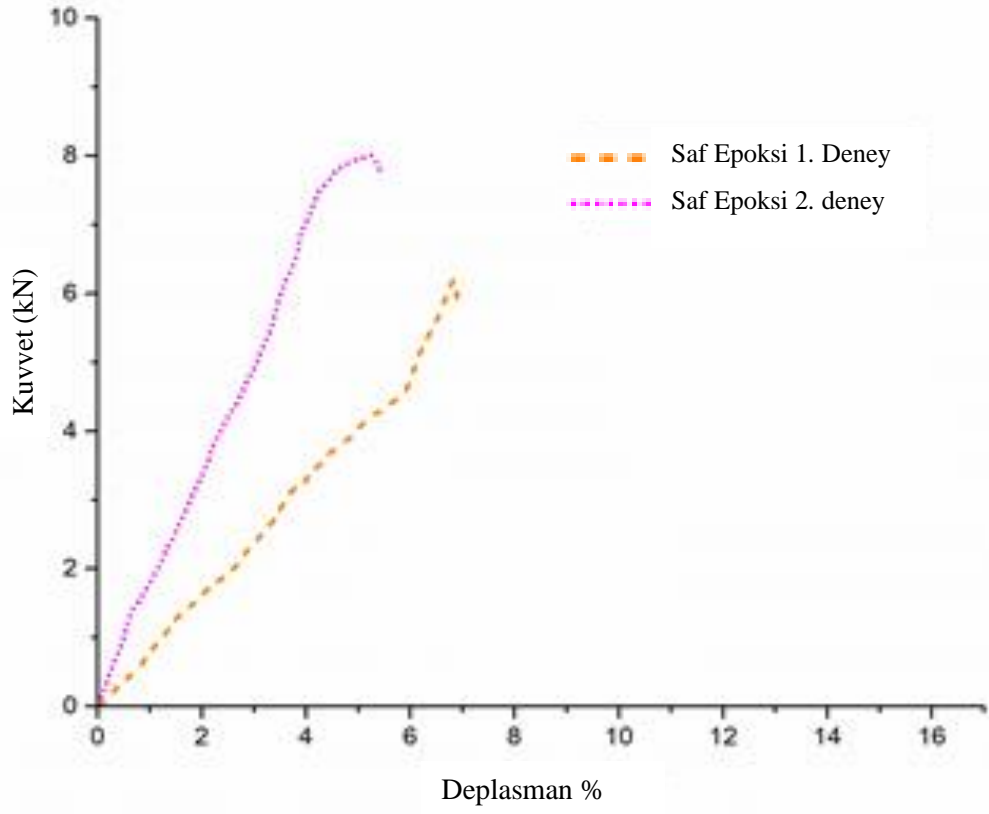
Kendi kendini iyileştiren kapsüller, alüminyum petek içerisine dolduruldu ve tekrarlanan bası deneylerine tabi tutuldu. Her testten sonra, numunelerin kendi kendine iyileşmelerini tamamlaması için dört saat boyunca 80 °C'de tutuldu. Kuvvet-deplasman eğrileri, statik bası deneyleri ile elde edilmiştir. Sonuçlar şekil 4.1' de verilmiştir. Elde edilen deney verilerinde, iyileştirici ajanlar içeren kendi kendini iyileştiren sandviç numunelerin tekrarlanan yüklemeler altındaki davranışları karşılaştırılmıştır. İlk kendi kendini iyileştirme deneyinin eğrisi, çekirdek hücrelerin içindeki makrokapsüllerin hücre duvarlarının burkulma direncini arttırdığını ve taşınan yükün lineer olarak 3.4 kN'a kadar arttığını gösterdi. Bu yükten sonra çekirdek hücre duvarı burkulmaya başlamış ve sandviç çekirdeğin herhangi bir yük artışı olmaksızın ezilmesini tetiklemiştir. Bu davranış, yük-deplasman eğrisi üzerinde plato bölgesinde ortaya çıkmıştır. İlk testte ikinci ve üçüncü testlerde plastik deformasyon kabiliyeti aktarılması için deplasman % 15' te durduruldu. İlk testten sonra test edilen sandviç numunelerin kesit görünümüne göre, çekirdeğin içinde kırılmamış bazı kapsüller vardı. Bu, iyileştirme yeteneğinin hala var olduğu anlamına gelir. Sandviç çekirdek hücrelerinin içindeki kırık kapsüller nedeniyle sızan iyileştirici ajanlar ve sertleştiriciler reaksiyona girdi. Bu aşamada çekirdek hücreler, katı epoksi ve kırılmamış kapsüller içinde hibrit bir dolgu oluşturuldu.



Şekil 4. 1. Üç adımda incelenen kendi kendine iyileşen sandviç numune bası deneyleri.

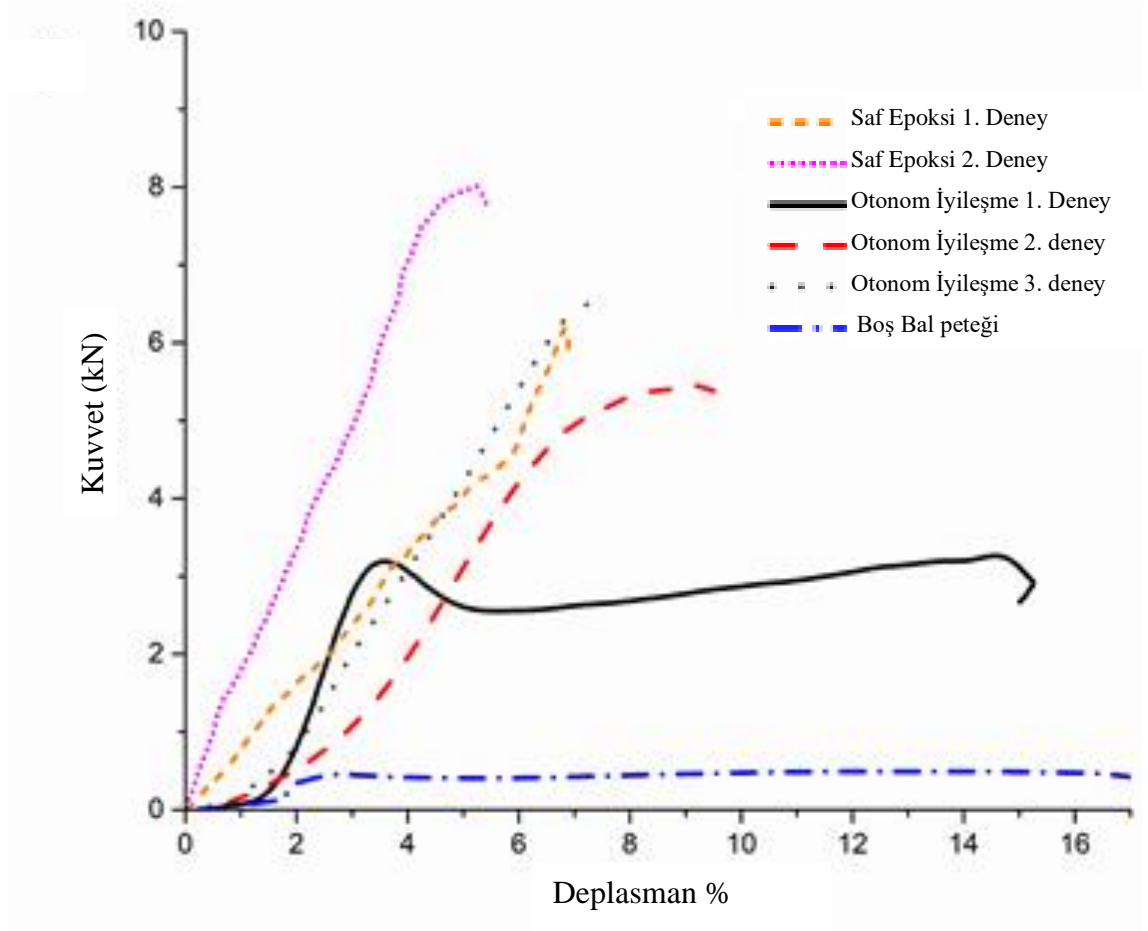
Aynı işlem ilk deneyde olduğu gibi bir kez daha uygulanmıştır. İyileşme süreci beklendikten sonra ikinci bası testi sonuçları alındı. Yer değiştirme değerlerindeki azalma ve tepki kuvvetinin artması, hasarlı alanlarda iyileşmenin varlığını göstermiştir. Üçüncü deney sonuçları ile karşılaştırıldığında, daha önce zarar görmemiş bazı makrokapsüllerin zarar gördüğü gözlemlendi. Makrokapsüllerin tamamen hasar görmesi nedeniyle kuvvet ve yer değiştirme değerlerinin düzgün epoksi eğrisine yakın seviyelerde meydana geldiği gözlemlendi.

Şekil 4.2' de saf epoksi dolgulu sandviç yapıların statik basınç değerleri incelenmiştir. Epoksi matris malzemesinin bası deneyleri sonucunda, reaktif bağların güçlenmesi ile reaksiyon kuvvetinde hafif bir artış meydana gelmiştir. Bu reaktif bağların güçlenmesi tepki kuvvetlerinde artış doğururken plastik deformasyon olanağını azaltmaktadır. Bu nedenle deplasman değerlerinde azalmalar meydana gelmiştir.



Şekil 4. 2. Saf epoksi 1. ve 2. bası deney sonuçları.

Şekil 4.3' de kendi kendine iyileşen sandviç yapılar, saf epoksi dolgulu sandviç yapılar ve boş Al bal peteği üzerine uygulanan bası deney sonuçları görülmektedir. Deney verilerinde 3. Otonom iyileşme eğrisi ile 1. Saf epoksi eğrisinin benzer olması kapsül dolgulu sandviç numunenin ilk deney sonucunda iyileşme vasfını tamamladığı ve içerisinde yer alan epoksinin hasarları tamir ettiği anlamına gelmektedir. Eğer kırılan kapsüller içerisindeki ajanlar ve aktivatörlerde karışım sağlanmasaydı bu eğrilerin yüksek benzerlikte olması beklenmez yapısal kusurların giderilmediği gözlemlenirdi.

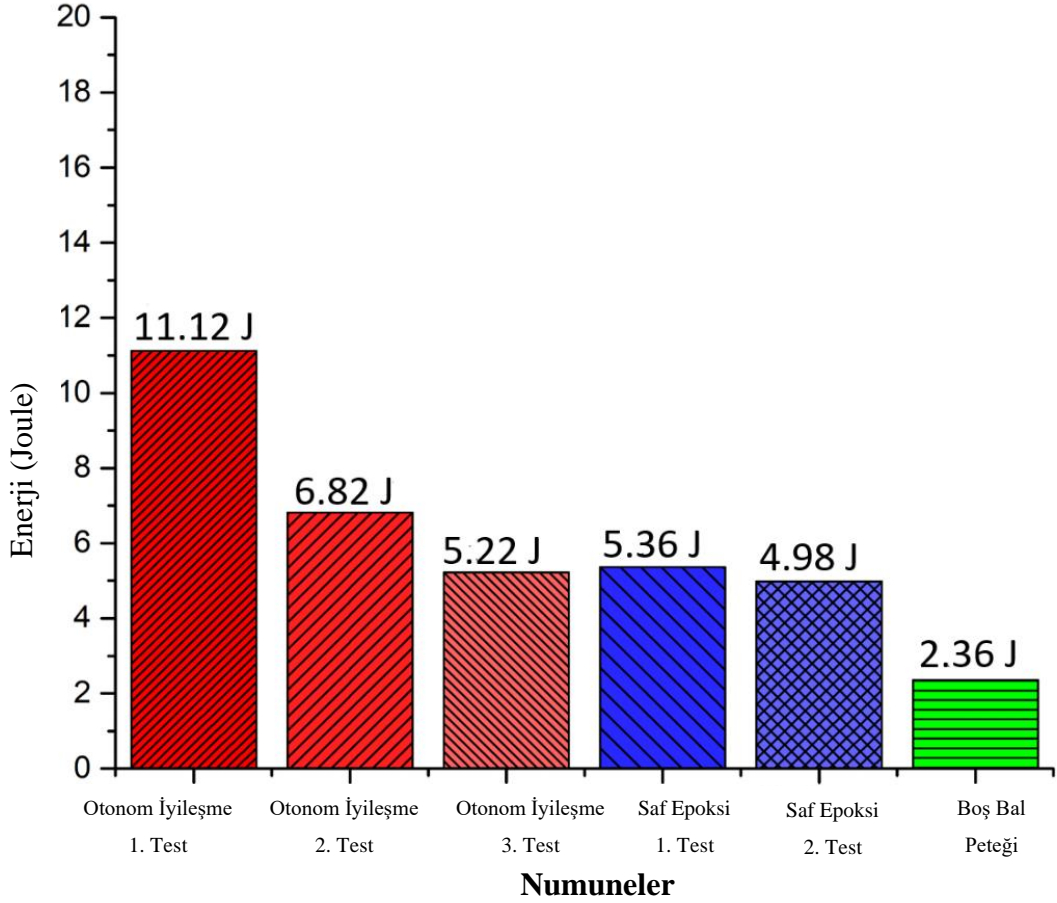


Şekil 4. 3. Kendi kendine iyileşen, saf epoksi dolgulu ve dolgusuz sandviç numunenin bası deney sonuçları.

Deney sırasında kırılan makro kapsüllerdeki iyileştirici ajanlar hasarlı bölgelere sızdı. Böylece yapıda bölgesel iyileştirmeler getirdiler. Bu arada sıkıştırma etkisinden kaynaklanan enerji kırılma enerjisine dönüştürülerek 11.12 joule enerji absorpsiyonu elde edilmiştir (boş alüminyum sandviç panelden yaklaşık 4,7 kat daha fazla). Tekrarlanan deneylerde, sağlam makro kapsül sayısının azalmasıyla beraber deplasman değerlerinde azalmalar gözlemlendi. Bu nedenle emilen enerji değerlerinde azalmalar meydana gelmiştir. Tekrarlanan bası deneylerinden kaynaklanan kendi kendini iyileştiren numuneler tarafından emilen enerji değerleri Şekil 4.4.' de gösterilmektedir.

Absorbe edilen enerjiyi belirlemek için deneylerden elde edilen kuvvet-deplasman eğrilerinin altında kalan alan hesaplanmıştır. Alan hesaplamasında sayısal çoklu entegrasyon yöntemleri (Denklem 4.1) kullanılmıştır.

$$I = \int_c^d \int_a^b f(x,y) dx dy \cong \int_c^d (\sum_{i=1}^n f(x_i, y) \cdot \Delta x) dy = \int_c^d g(y) dy = \sum_{j=1}^m g(y_j) \cdot \Delta y \quad (4.1)$$



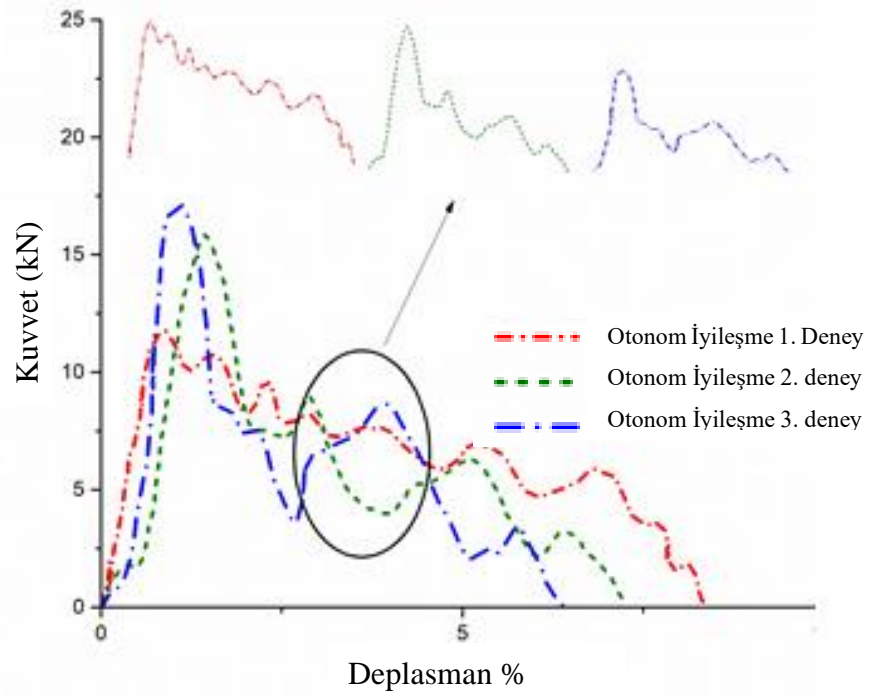
Şekil 4. 4. Kendi kendine iyileşen, saf epoksi dolgulu ve dolgusuz sandviç numunenin bası deneyi altındaki enerji absorpsiyon verileri.

Bal peteklerinin çekirdek hücrelerini dolduran ajan dolu kapsüller çarpma sırasında hasara uğramıştır. Bu esnada, enerji formu değişime maruz kalarak enerji sönmülmüştür. Şekil 4.1’ de gösterildiği gibi, iyileştirici kapsül dolu sandviç numunede yüksek yer değiştirmeler görülmüştür. Şekil 4.2’ de gösterilen saf epoksi dolgulu

numunelerin sertliği nedeniyle düşük yer değiştirmeler görülmüştür. Eğrilerin altındaki alan emilen enerji miktarını verdiğinden, kapsül dolgulu sandviç yapılarda yüksek enerji absorpsiyonu görülmüştür.

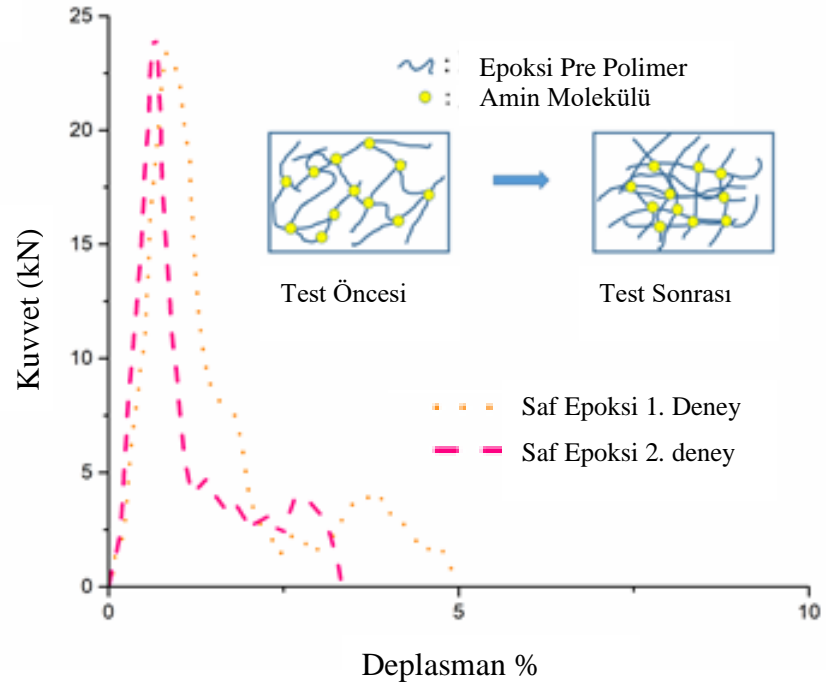
4.1.2. Darbe deneyi sonuçları

Darbe testi sonuçları Şekil 4.5' de gösterilmiştir. Testler, kendi kendine iyileşmenin gözlemlenmesi için üç tekrarlı yükleme durumunu geręekleřtirilmiřtir. Ayrıca, boş bir alüminyum sandviç panel ve saf epoksi dolgulu sandviç panel test edilmiştir. Şekil 4.5' de, kendi kendini iyileştiren makro kapsüllerle doldurulmuş sandviç yapıların eğrilerini göstermektedir. Her aşamada elde edilen eğriler, makro kapsüllerin iyileştirme varlığı ve hasar analizi hakkında bilgi verir. Yüksek gerinim oranları ile yapılan testlerde eğrilerde dalgalanmalar oluşmuştur. Bu dalgalanmalar, anlık hasar sırasında deşarja atıfta bulunur. Daha sonraki kuvvet artışı, yerel hasarın aşıldığı ve yeni engellerle karşılaşıldığı anlamına gelir. Her bir kapsül hasarı ve Al bal peteği cidarlarındaki burkulmalar dalgalanma olarak karşımıza çıkmaktadır. İkinci ve üçüncü tekrarlı deney eğrilerinde ise hasar görmemiş kürelerin azalmasına paralel olarak dalgalanmalar azalmıştır.



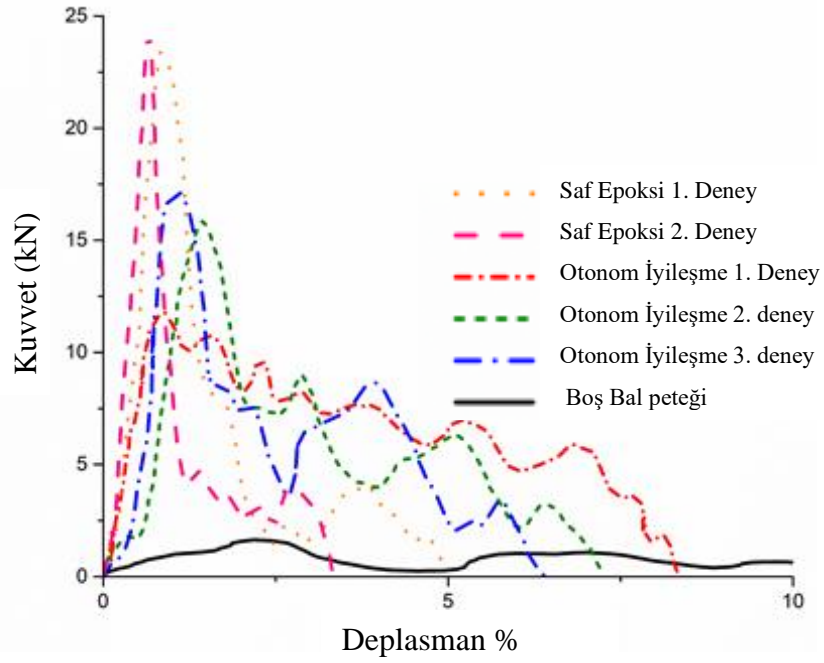
Şekil 4. 5. Kendi kendine iyileşen sandviç numunelerin darbe deney sonuçları.

Bal peteği hücrelerinin sadece epoksi ile doldurulması ve iyileştirici ajanların kullanılmaması sonucunda yapı çok rijit davranış sergilemiştir. Sonuçta deplasman değerlerinde bir azalma meydana gelmiştir. Şekil 4.6' da saf epoksi testleri karşılaştırıldığında, birinci ve ikinci testler arasında yer değiştirme farklılıkları ortaya çıkmıştır. Bu, polimer malzemelerin bası testleri sırasında olduğu gibi, serbest hacmin azalmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 4. 6. Saf epoksi 1. ve 2. darbe deney sonuçları.

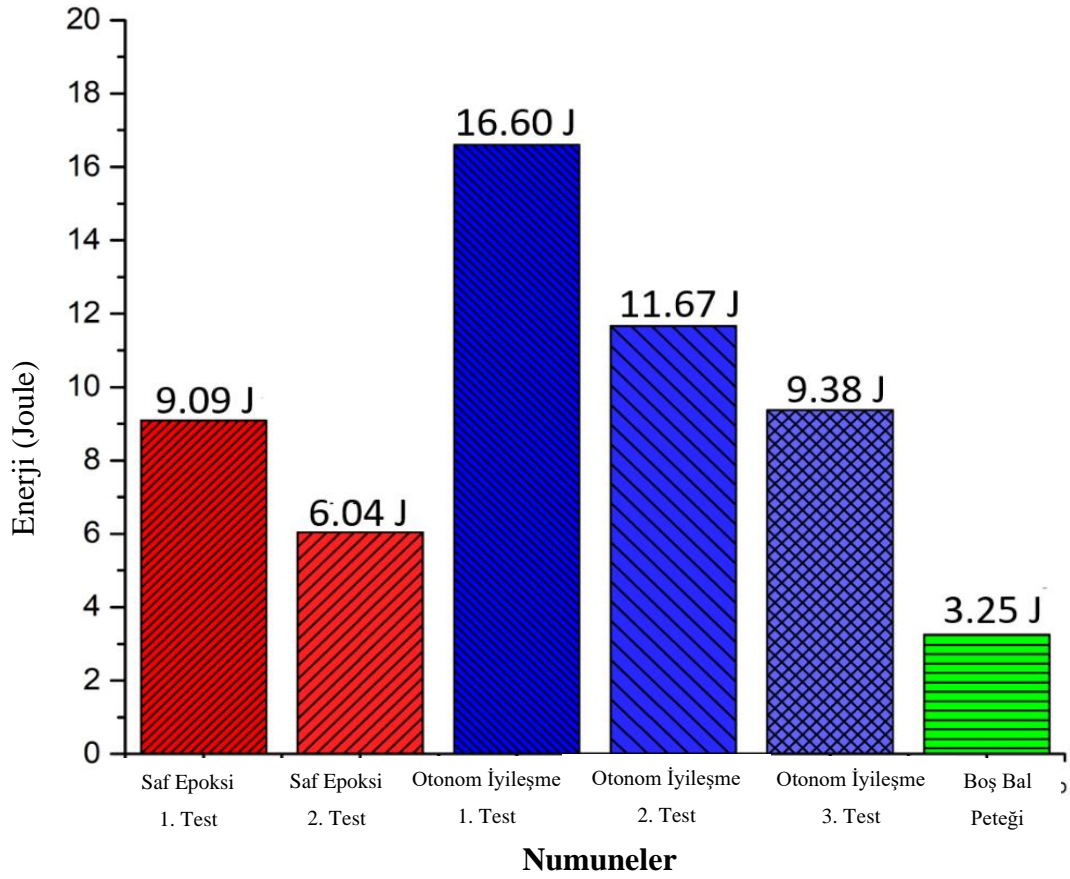
Darbe esnasında sandviç yapı içerisinde meydana gelen plastik deformasyonlar sonucunda kapsüller, epoksi matris ve bal peteği hücrelerinin her birinde belirli oranda şekil değiştirmeler görülmektedir. Şekil 4.7' de tüm deney verileri bir arada verilmiş olup Al bal peteğinde de burkulma olarak karşımıza çıkan plastik deformasyonlar ile beraber tepki kuvveti karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca kapsül dolgulu sandviç panelin tekrarlı deney sonuçları ile beraber saf epoksi eğrilerine yaklaşan verilere dikkat edilmelidir.



Şekil 4. 7. Kendi kendine iyileşen, saf epoksi dolgululu ve dolgusuz sandviç numunenin darbe deney sonuçları.

Darbe deneyleri sırasında elde edilen kuvvet-deplasman eğrilerinin altındaki alan, emilen enerji miktarını vermektedir. Bası testinde olduğu gibi, yüksek gerinime neden olan makro kapsüller, yapının enerji emme kapasitesini artırmaktadır. Boş alüminyum petek sandviç panelin 3.25 j enerji absorpsiyon kapasitesine sahip olduğu, makro kapsül dolgululu sandviç panelde 16.6 j enerji absorbe edebildiği ve bu değer boş bir petek panele göre 5,1 kat daha fazla olduğu hesaplanmıştır (Şekil 4.8). Bu gelişmenin, makro kapsüller ve diğer dolgu maddelerinin sandviç panele dahil edilmesiyle darbe enerjisinin kapsül kırılmalarına vb. enerjide form değiştirmesi ensasında meydana geldiği görülmektedir. Ayrıca kırılan kapsüllerden aniden fıskıran dolgu sıvılarının viskoz sönümlenme davranışı sergilediği gözlemlenmiştir. Tekrarlanan kendi kendini iyileştirme testlerinde hasar gören makro kapsüllerde iyileşmeler meydana gelmiştir. Böylece sandviç malzemedeki yapısal rijitlik korunmuştur. Kapsüllerin zarar görmesi sonucunda kendi kendini iyileştiren numunelerde ikinci ve üçüncü tekrarlar deneylerinde kademeli enerji düşüşleri gözlemlenmiştir.

Soğurulan enerji verilerine göre saf epoksi dolduğu sandviç numunenin birinci ve kapsüllerdeki epoksinin hasarı onarmasıyla saf epoksi davranışı sergilemesi beklenen üçüncü kendi kendini iyileştirme testleri birbirleriyle karşılaştırıldığında benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bu benzerlik, üçüncü kendi kendini iyileştirme deneyinden önce tüm makro kapsüllerin hasar gördüğünü ve sandviç çekirdek hücrelerinin içindeki dolgu maddesinin neredeyse tek tip bir epoksi haline geldiğini gösterdi.



Şekil 4. 8. Kendi kendine iyileşen, saf epoksi dolgulu ve dolgusuz sandviç numunenin darbe deneyi altındaki enerji absorpsiyon verileri.

Bası ve yüksek gerinim hızında gerçekleştirilen test sonuçları Tablo 1'de karşılaştırılmıştır. Her iki deney aynı numunelere aynı sistematik tekrar ile uygulanmasına rağmen, sonuçlar arasında açık bir fark olduğu görülmüştür. Her türdeki

darbe numuneleri, statik bası sonuçlardan çok daha iyi enerji absorbe edebilmektedir. Buradan sandviç malzemeleri geliştirmek için bu çalışmada kullanılan tüm yapı ve dolgu malzemelerinin gerinim hızına duyarlı olduğu ve mekanik performanslarının arttığı anlaşılmaktadır. Absorbe edilen enerjiler karşılaştırıldığında, boş alüminyum petek yapılı sandviç ve saf epoksi dolgulu alüminyum bal peteği sandviç numunelerinin darbe testindeki enerji absorpsiyonundaki artışın, kendi kendini iyileştiren kapsül dolgulu sandviçlere göre daha düşük olduğu görülmüştür. Sıvı kapsüllü kapsüllerin dinamik yüklerde sönümleme etkisini iyileştirdiği ve özellikle viskoz etkilerin baskın olduğu düşünülmektedir. Ancak, özellikle üçüncü tekrarlanan testte, statik test sonuçlarında saf epoksi dolgulu numune test sonuçlarıyla benzer davranış gözlenirken, darbe testinde açık bir fark görülmektedir. İkinci testten sonra, sandviç çekirdeğin çöken hücrelerinde hala çok az miktarda sıvı dolgu maddesi vardır. Kapalı hacmi oluşturan sandviç çekirdek hücrelerinin içindeki mevcut kırık katılaşmış iyileştirici dolguların ve hücre duvarlarının ezilerek karmaşık bir yüzey oluşturması nedeniyle boşluklarda az miktarda sıvı dolgu maddesi ve hava olduğu düşünülmektedir. Bu akışkanların, katı dolgu maddelerinin boşlukları arasındaki yüksek hızlı akışı, viskoz sönümleme ve havanın sıkıştırılabilirliği, ek enerji soğurma mekanizmalarını göstermektedir. Böylece, üçüncü kendi kendini iyileştirme deneyinde yarı statik ve darbe sıkıştırma sonuçları arasında önemli miktarda emilen enerji farkı elde edilmiştir.

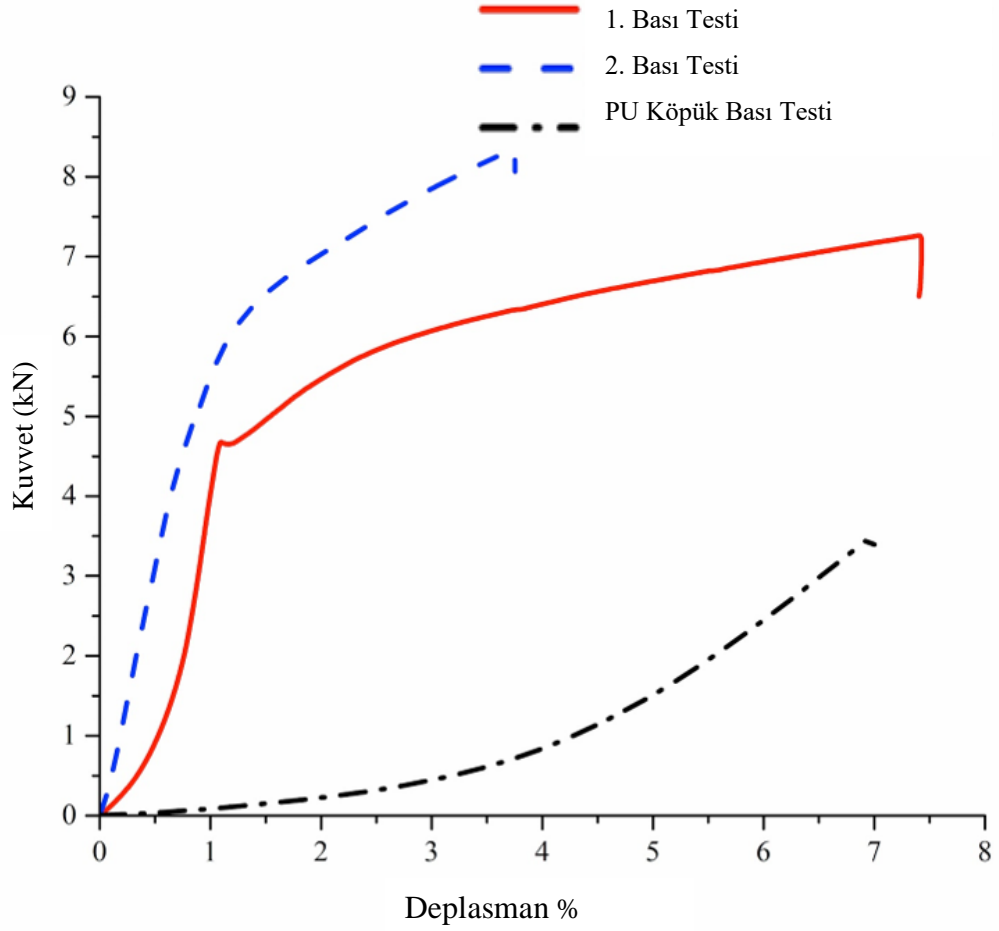
Çizelge 4. 1. Bası ve darbe deneylerinde emilen enerji miktarları.

| | Boş Bal Peteği (Joule) | Otonom İyileşme 1. Test (Joule) | Otonom İyileşme 2. Test (Joule) | Otonom İyileşme 3. Test (Joule) | Saf Epoksi 1. Test (Joule) | Saf Epoksi 2. Test (Joule) |
|---|------------------------------|--|--|--|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Bası testi | 2.36 | 11.12 | 6.82 | 5.22 | 5.36 | 4.98 |
| Darbe Testi 272 1/s ⁻¹ şekil değiştirme hızı | 3.25 | 16.6 | 11.67 | 9.38 | 9.1 | 6.05 |
| Fark (%) | 27.38 | 33.01 | 41.56 | 44.35 | 41.10 | 17.69 |

4.2. Geometrik Olarak Kendi Kendine İyileşebilen Sandviç Yapı Karakterizasyon Sonuçları

4.2.1. Bası deney sonuçları

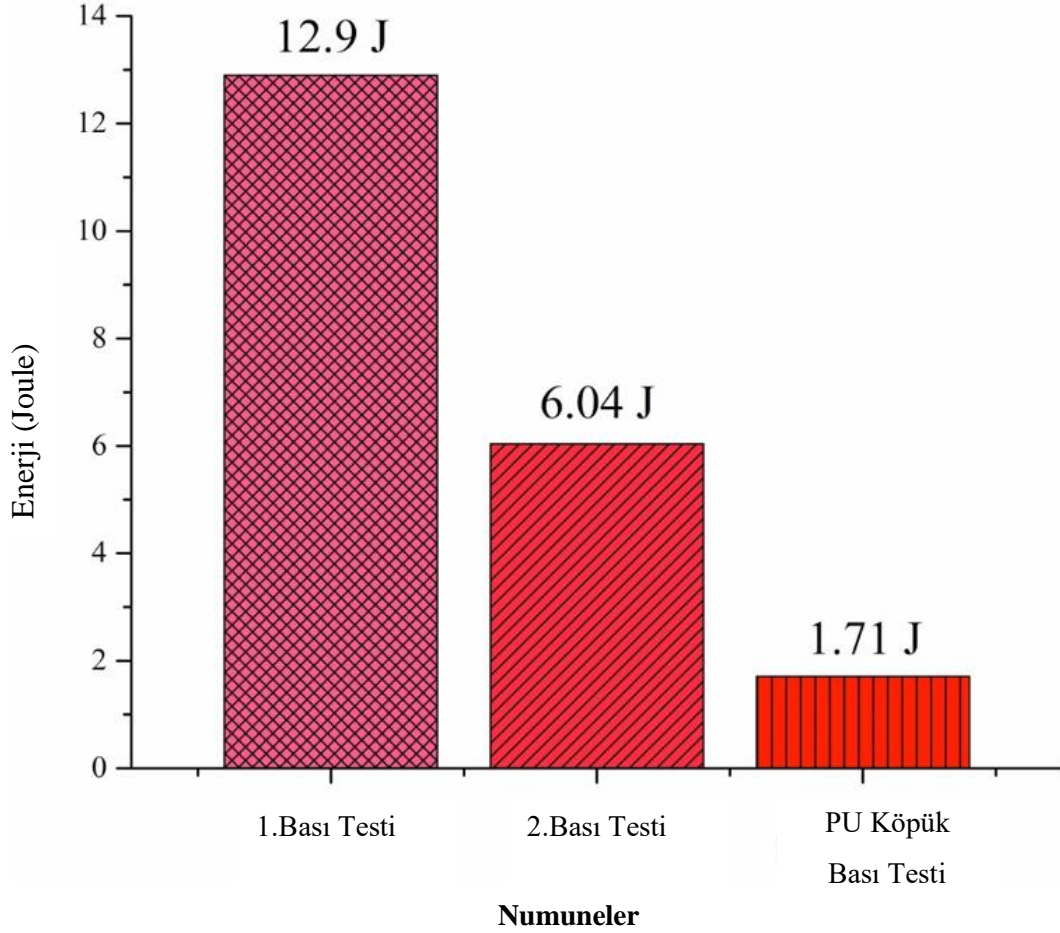
İyileşme ajanlarıyla doldurulan makro küreler alüminyum bal petekleri içerisine yerleştirildi. Ardından hazırlanan numunelere bası testi uygulandı. Test sonuçları şekil 4.9’ da gösterilmiştir. Statik bası deneylerinin birincisinde iyileşme kapsüllerin kırılması sağlanmıştır. Kapsüllerin plastik deformasyonu ve epoksi matris malzemesinin bağlarının sıkışması esnasında yüksek deplasman meydana gelmektedir. Kapsül hasarı ile beraber iyileşme ajanları çatlaklardan dışarı sızmaya devam etmiştir. Yapı içerisinde meydana gelen çatlaklar PU ile dolmuştur. İkinci testte yapısal bütünlüğün sağlanıp çatlakların kuvvet azalmasına sebebiyet vermediğine dikkat edilmelidir. Bu durum, yapı içerisinde iyileşme olduğunu göstermektedir. İlk test esnasında sıkışan epoksi matris bağları daha fazla sıkışmamış ve ikinci testte daha az deplasman meydana gelmiştir.



Şekil 4. 9. Geometrik olarak kendi kendine iyileşen sandviç yapının bası deney sonuçları.

Kuvvet deplasman grafikleri altında kalan alanın integrali alındığında absorbe edilen enerji miktarını vermektedir. İlk deney esnasında kırılmamış kapsüllerin ve yapısal bütünlük sebebiyle yüksek enerji (12.9 Joule) absorbe edilmiştir (Şekil 4.10). Çünkü kapsüllerin kırılması esnasında yük enerji olarak depolanmaktadır. İkinci deneyde ise kapsüllerin yapı içerisinde sadece dolgu görevi görmesi sebebiyle enerji absorpsiyonuna katkısı yoktur. Sıkışan epoksi matris bağları sebebiyle düşük deplasman olması eğri alanında azalmaya yol açmıştır. Bu nedenle 6.04 Joule değerinde enerji depolanmıştır. Boş bal peteği üzerinde gerçekleştirilen statik bası testinde al cidarlarda burkulmalar

meydana gelmiştir. Cidarların deformasyona uğramadan dayanabildiği yük miktarı sınırlı olduğundan absorpsiyon 1.71 joule değerinde kalmıştır.

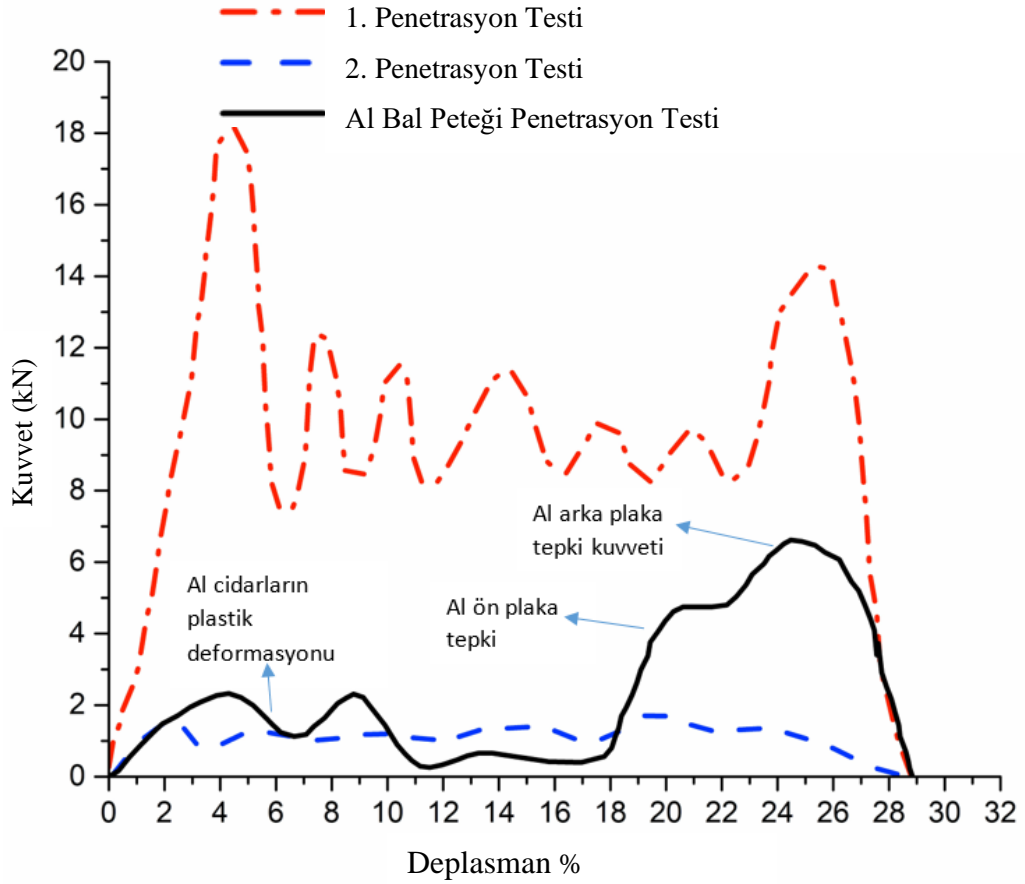


Şekil 4. 10. Geometrik olarak kendi kendine iyileşen sandviç yapının bası deney sonuçları bası altındaki enerji absorpsiyon verileri.

4.2.2. Penetrasyon deney sonuçları

Penetrasyon testi yapıda plastik deformasyonlar ve kalıcı hasarlar meydana getirmektedir. Bu hasarlar yapı içerisindeki kapsüllerin ve epoksi matris yapısının kırılması sonucu meydana gelmiştir. Kırılan kapsüllerin içerisindeki iyileşme ajanları yapıda geometrik iyileşme meydana getirmiştir. Böylece penetrasyon deliği kapanmıştır. Deliğin

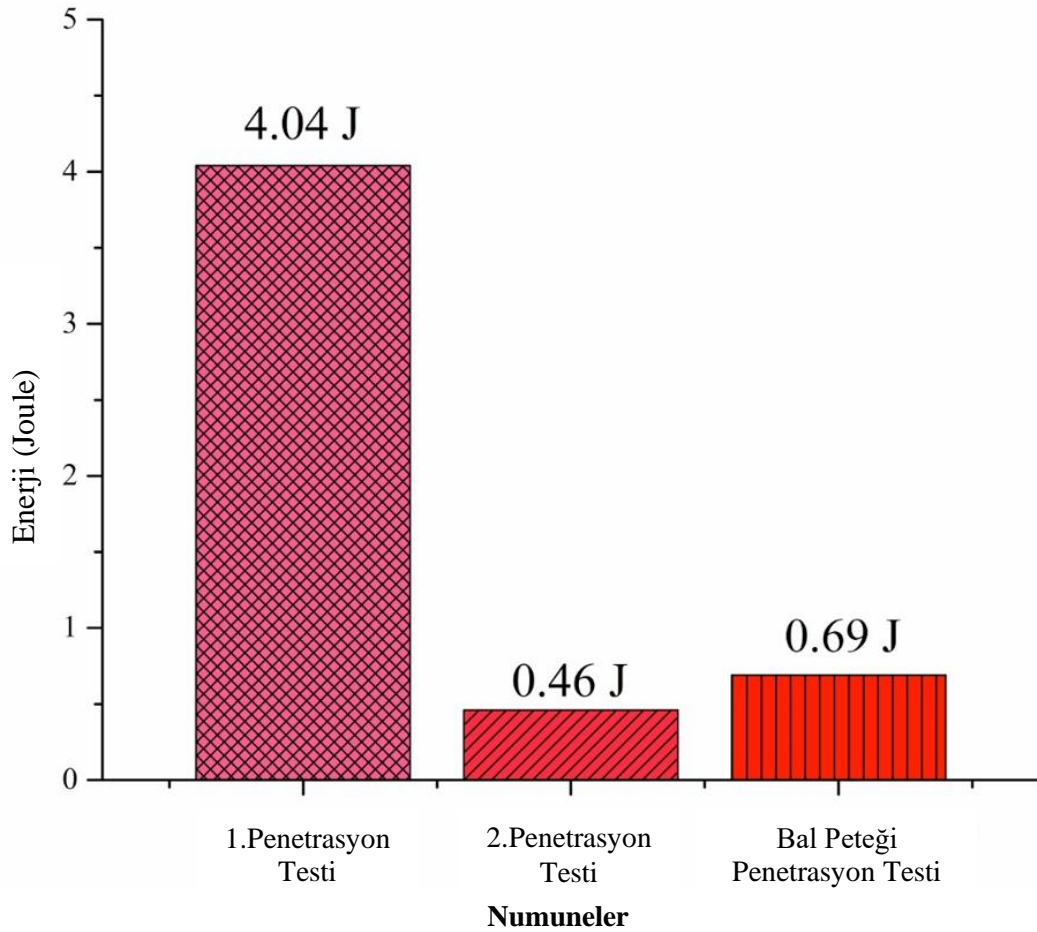
kapanması ve katılaşmanın tamamlanmasının ardından iyileşen bölge üzerinde ikinci deney gerçekleştirilmiştir. Geometrik iyileşme sağlayan poliüretan köpüğün gösterdiği tepki kuvveti belirlenmiştir. Ayrıca boş alüminyum bal peteği üzerinde de penetrasyon testi gerçekleştirildi. Deneyler sonucunda sandviç yapı içerisine ilave edilen kapsüller, epoksi matris ve Al bal peteğinin yapıya sağladığı katkı belirlenmiştir. Penetrasyon testi 441 strain rate ve 12,9 m/s hız değerlerinde gerçekleştirildi. Deneyde elde edilen kuvvet deplasman eğrileri şekil 4.11’ de gösterilmiştir.



Şekil 4. 11. Geometrik olarak kendi kendine iyileşen sandviç yapının penetrasyon deney sonuçları.

Penetrasyon çubuğunun Al plaka ile kapatılan sandviç panel yüzeyine temas etmesiyle tepki kuvveti meydana gelmiştir. 1. deneyde yapı içerisinin epoksi matris ve iyileşme kapsülleri ile dolu olması yüksek tepki kuvvetine (18,21 kN) sebep olmuştur. Al plakanın

delinmesiyle penetrasyon çubuğu epoksi ve kapsülleri kırarak ilerlemiştir. Bu esnada Al bal peteği cidarlarında da plastik deformasyona sebep olmuştur. Her kapsülün kırılması eğride periyodik salınımlara yol açmıştır. Penetrasyon çubuğunun arka plakaya değmesiyle anlık tepki kuvveti meydana gelmiştir. Plakanın delinmesiyle anlık kuvvet azalması oluşmuştur. 2. Deneyde, geometrik iyileşen bölgede penetrasyon çubuğu köpük hücrelerini deforme ederek ilerlemiştir. Elde edilen eğride plato bölgesi görülmektedir. Köpük cidarları daha düşük tepki kuvveti oluşturmuştur (Şekil 4.12).

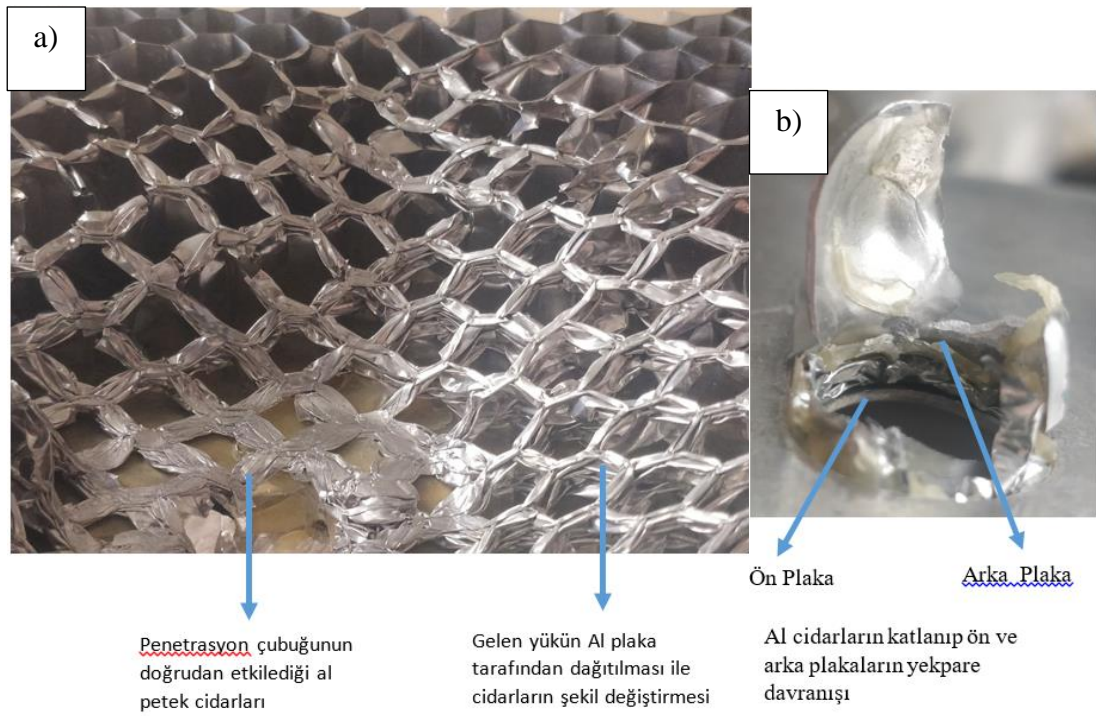


Şekil 4. 12. Geometrik olarak kendi kendine iyileşen sandviç yapının bası deney sonuçları bası altındaki enerji absorpsiyon verileri.

Şekil 4.13' de gerçekleştirilen boş Al bal peteği numunesine ait görseller verilmiştir. 2.3 kN luk ilk tepki kuvveti Al cidarların burkulmadan dayanabildiği kuvvet değeridir. Al

plaka ise daha yüksek kuvvete dayanmaktadır. Bu sebeple sandviç numune penetrasyon çubuğu etkisinde ilk olarak petek cidarlarında deformasyona sebep olmuştur. Deforme olan cidar görüntüleri şekil 13a’da gösterilmiştir.

Ardından sandviç numunenin ön plakası arka plakasına doğru deplasman yapmıştır. Şekil 13b’ de ön ve arka plaka yekpare davranış sergilemiştir. 20 mm deplasman sonucunda ön plaka delinmiştir. Ardından arka plakaya ulaşan penetrasyon çubuğu 6.2 kN luk tepki kuvveti sonucunda plakayı delip boşa çıkmıştır.



Şekil 4. 13. Boş Al bal peteği numunesinin penetrasyon deneyi altında fiziksel davranışı.

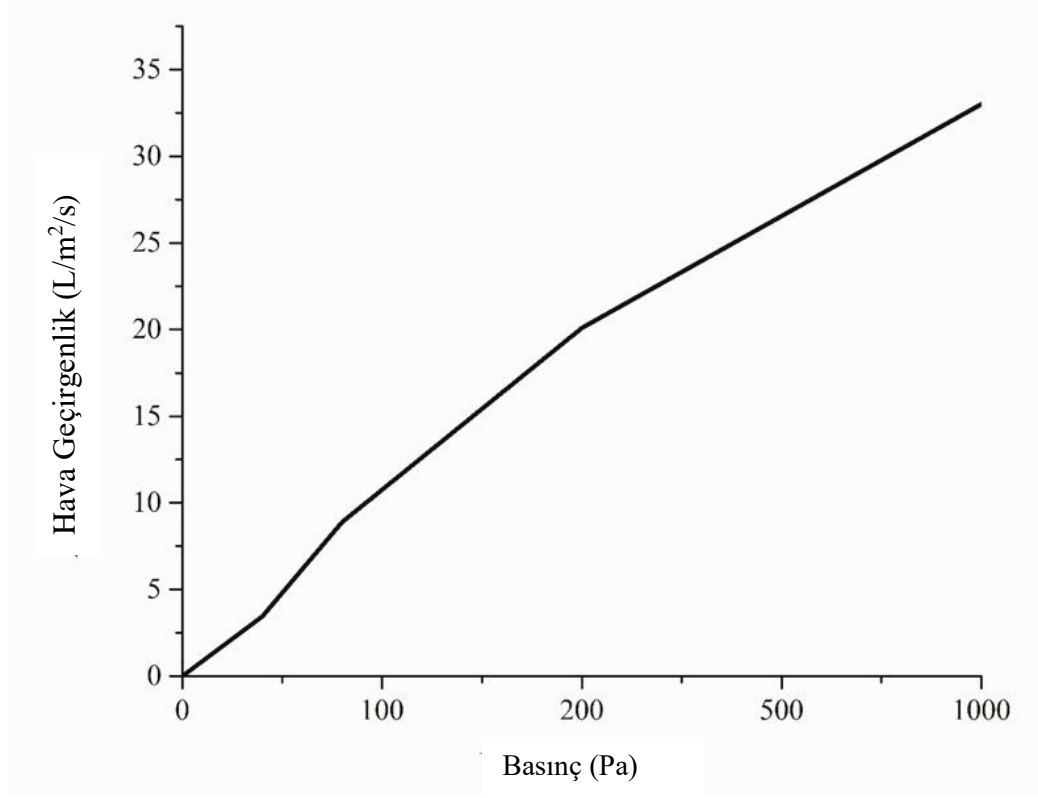
4.2.3. Sıvı geçirgenlik testi deney sonuçları

Bu çalışmada, poliüretan dolgulu kendi kendini iyileştirebilen sandviç yapı, denizaltı boru sistemleri, denizaltı araçları, basınçlı kaplar ve yapısal bütünlüğün korunması önemli olan inşaat sektöründe kullanılmak üzere geliştirilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde

iyileşen köpüğün kapalı gözeneklere sahip olduğu görülmüştür. Poliüretan köpük numunesinin su geçirgenliğinin hesaplanması denklem 3'e göre yapılmıştır. Test sürecinde sıvı yüksekliği 40 cm' den 100 cm' ye kadar kademeli olarak arttırılmıştır. Bu sayede sıvı basıncında artış meydana gelmiştir. Test sonucunda, artan basınca rağmen geçirgenlik (K)=0 olarak elde edilmiştir. Rijit hücre duvarları, üzerine gelen basınca dayanıp deformasyon göstermemiştir. Sonuç olarak PU köpük numunenin yapılan test sınırları çerçevesinde sıvı geçirmediği gözlemlenmiştir.

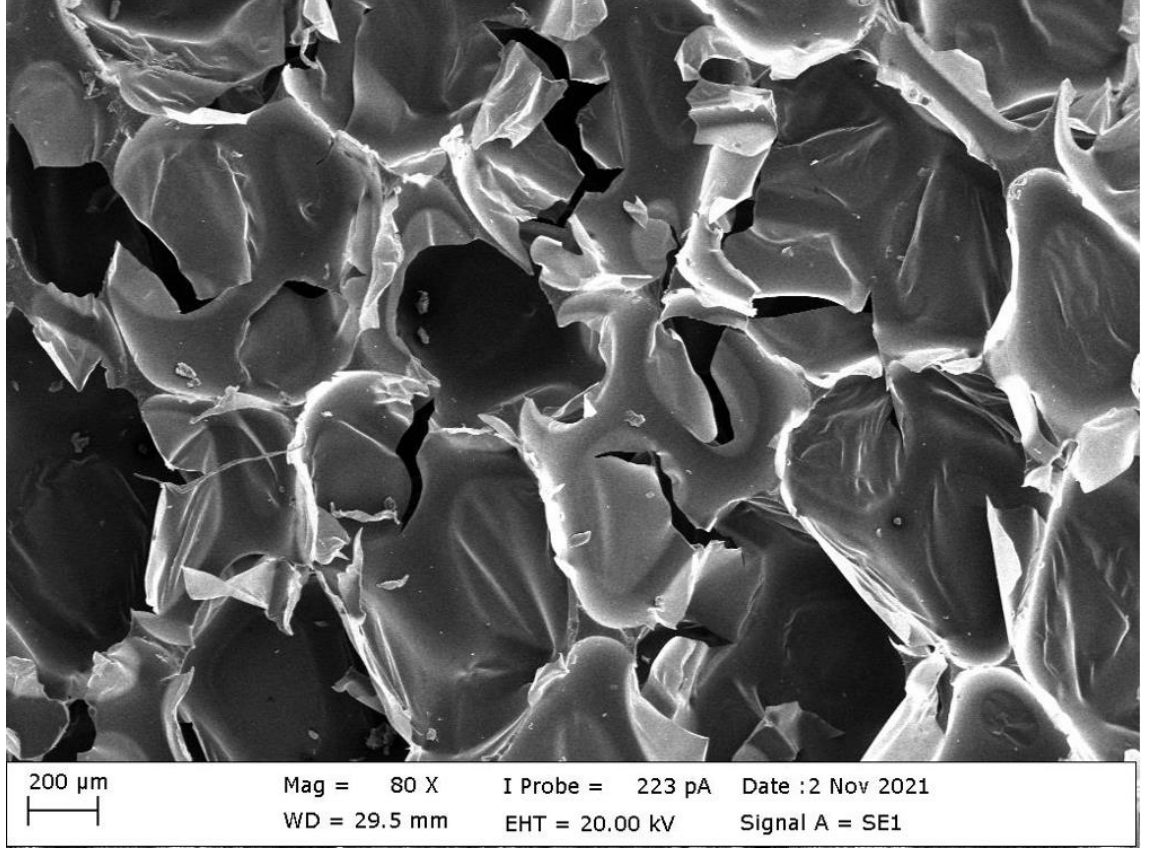
4.2.4. Hava geçirgenlik testi deney sonuçları

Poliüretan köpük üzerinde yapılan hava geçirgenlik testinin sonuçları Şekil 4.14' de verilmiştir. Sonuçlar (L/m²/s) 100, 200, 500 ve 1000 paskal basınçlarında elde edilmiştir. Sonuçlar, geometrik iyileştirici köpüğün hava geçirgenliğini büyük ölçüde engellediğini göstermiştir. Böylece hasarlı yapının onarımı için gereken kritik sürenin uzatılabilirliği görülmektedir.



Şekil 4. 14. Hava geçirgenlik deney sonuçları.

Şekil 4.15' de, 1000 Pa hava basıncı altında testten sonra numunedeki hasar gösterilmektedir. Artan hava basıncı ile hücre duvarlarında yırtılmalar ve çatlaklar meydana gelmiştir.



Şekil 4. 15. Hava geçirgenlik deneyi sonrası SEM görüntüsü.

4.3. Ultra Hızlı Şekilde Kendi Kendine İyileşebilen Kompozit Malzeme Mekanik Değerler Ve Karakterizasyon

4.3.1. Deneysel tasarım ve optimizasyon sonuçları

Ultra hızlı kendi kendine iyileşebilen kompozit malzemenin bası deneyleri sonucu elde edilen absorpsiyon enerjileri Design Expert programına girildi (çizelge 4.2). Bu programda öncelikle sonuçlar için ANOVA analizi yapılarak verilerin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığı incelenmiştir. Daha sonra sayısal analiz ile en yüksek absorpsiyon enerjisi için optimum sodyum bikarbonat ve epoksi matris değerleri analiz edilmiştir.

Çizelge 4. 2. Deneysel tasarım sonuçları.

| Standart sıra | Çalışma | Değişken 1 A: Sodyum bikarbonat wt% | Değişken 2 B: Epoksi matris wt% | Yanıt Enerji Absorbsiyonu J |
|----------------------|----------------|--|--|--|
| 1 | 2 | 15 | 85 | 4.61 |
| 2 | 4 | 5 | 95 | 4.05 |
| 3 | 11 | 10 | 90 | 4.73 |
| 4 | 6 | 12,5 | 87,5 | 4.95 |
| 5 | 9 | 7,5 | 92,5 | 4.43 |
| 6 | 1 | 15 | 85 | 4.78 |
| 7 | 5 | 5 | 95 | 4.27 |
| 8 | 7 | 10 | 90 | 4.67 |
| 9 | 10 | 15 | 85 | 5.01 |
| 10 | 3 | 5 | 95 | 3.6 |
| 11 | 8 | 10 | 90 | 4.7 |

➤ Deneysel tasarımın ANOVA analizi

Sonuç (absorbasyon enerjisinin) varyans analizi çizelge 4.3’ de verilmiştir. Tablo içinde verilen *F-değeri*, tahminlerin karelerinin toplamının ortalaması artıkların kareleri toplamının ortalamasına oranıdır (Cornell, 2002).

Bu durumda modelin anlamlı (önemli) olduğu sonucuna varılmaktadır. Bir diğer önemli parametre modelin p değeridir. Modelin P değerinin 0.05’den küçük olması deneysel tasarım modelinin anlamlı olduğunu sonucunu göstermektedir.

Çizelge 4. 3. Anova analizi.

| Kaynak | Kareler Toplamı | df | Ortalama Kareler | F-değeri | p-değeri |
|------------------|------------------------|-----------|-------------------------|-----------------|-----------------|
| Model | 1,409 | 2 | 0,705 | 17,208 | 0,001 |
| Doğrusal Karışım | 1,155 | 1 | 1,155 | 28,205 | 0,001 |
| AB | 0,254 | 1 | 0,254 | 6,212 | 0,037 |
| Artık | 0,328 | 8 | 0,041 | | |
| Uygunsuzluk | 0,012 | 2 | 0,006 | 0,113 | 0,895 |
| Saf Hata | 0,316 | 6 | 0,053 | | |
| Kor Toplam | 1,737 | 10 | | | |

Deneysel tasarımın istatistiksel verileri çizelge 4.4’ de verilmiştir. Deneysel ile ilgili standart sapmanın değerinin sıfıra yakın olduğu analiz edilmiştir. Bu durum, verilerin ortalama değere yakın olduğu ve artık değerlerin az olduğunu göstermektedir. “R²” değeri

açıklanabilen varyasyonun açıklanamayan varyasyona oranıdır. Varyasyon verilerinin dağılımı doğru üzerinden geçiyorsa veya yakınsa “R²” değeri 1’e eşittir. Bu anlamda, R² değerinin 0.8’den büyük olması 2 değişken arasında güçlü bir ilişki olduğunu kanıtlamaktadır. Ayarlanmış R² değeri, model tarafından açıklanan ortalamanın çevresindeki değişim miktarının bir ölçüsüdür. Bununla birlikte ön görülmüş R² değeri, model tarafından açıklanan yeni verilerdeki varyasyon miktarının bir ölçüsüdür. Ayarlanabilir R² ve Ön görülmüş R² değeri arasındaki farkın 0.2’den az olması beklenir. Aksi halde modelde hata olduğu sonucuna varılmaktadır.

Çizelge 4. 4. Statik analiz.

| | |
|----------------------------|-------|
| Std. Dev. | 0,202 |
| Ortalama | 4,527 |
| C.V. % | 4,470 |
| R ² | 0,811 |
| Düzeltilmiş R ² | 0,764 |
| Tahmini R ² | 0,599 |
| Yeterlilik Hassasiyeti | 8,352 |

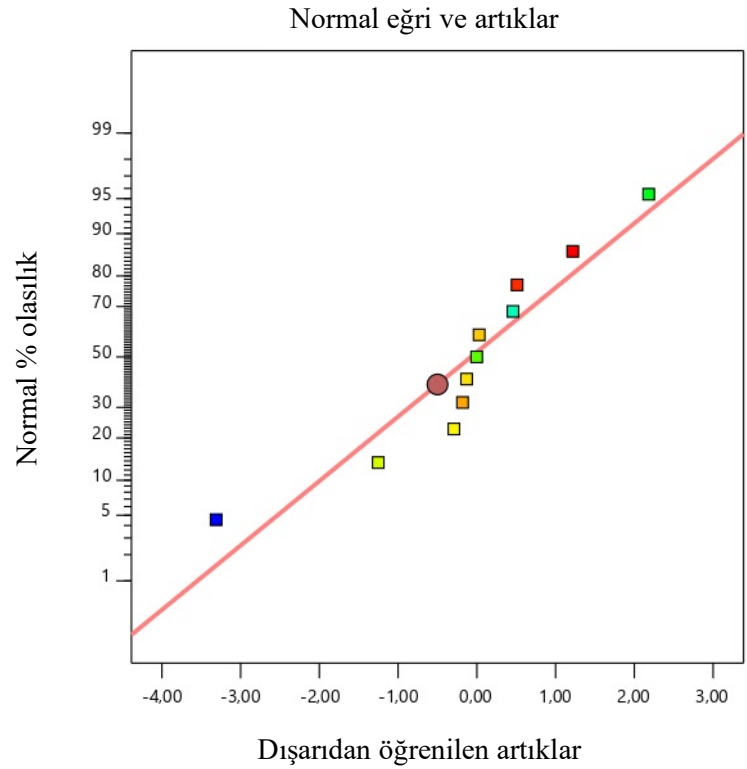
➤ **Deneysel tasarım teşhisi**

Ultra hızlı kendi kendine iyileşen kompozit malzemenin deney tasarım verileri normal dağılım grafiği şekil 4.16’da gösterilmiştir. Artıkların normal dağılım çizgisinde ya da yakın olması beklenmektedir. Artıklar modeldeki gerçek değerler ile tahmin değerleri arasındaki farktan oluşmaktadır. Şekil 4.16’da gösterilen grafikte artıkların bir “S” yapısı

gösterdiği gözlemlenmektedir. Bu durumda artıkların model için anlamlı olmadığı sonucuna ulaşılmaktadır.

Enerji absorpsiyonu

absorpsiyon enerjisi
değerine göre renk
noktaları
3,6 5,01

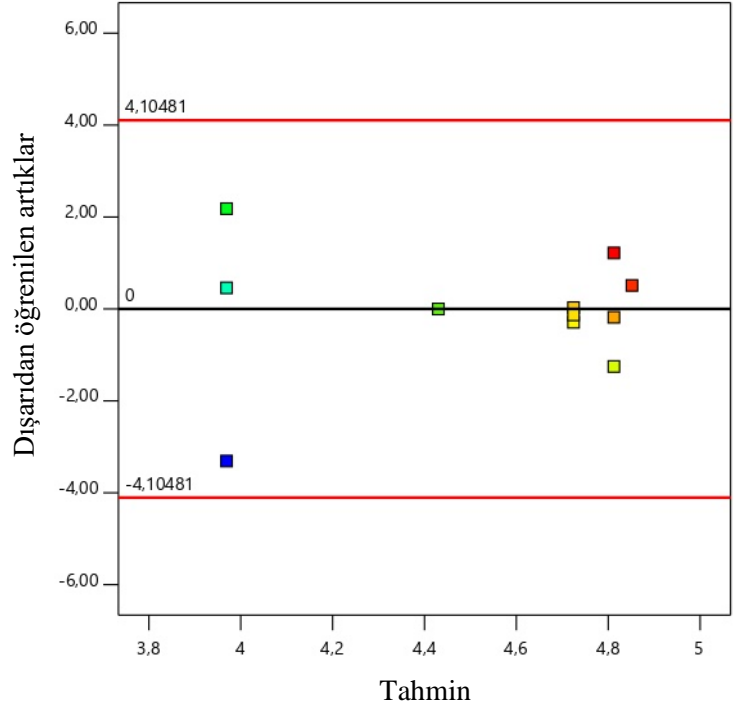


Şekil 4. 16. Artıkların normal eğrileri.

Artıklar ve tahmin grafiğinde Şekil 4.17' de alt ve üst sınır ile %95 güven aralığı belirlenmiştir. Artıklar güven aralığının içinde olduğundan dolayı modeli etkileyen bir durumun olmadığı gözlemlenmektedir.

Enerji absorpsiyonu

absorpsiyon enerjisi
değerine göre renk
noktaları
3,6 5,01

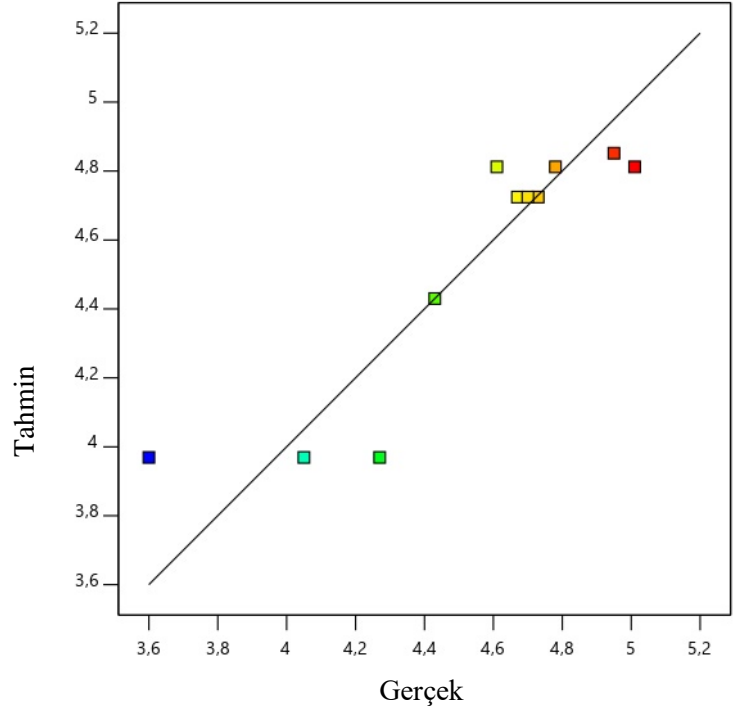


Şekil 4. 17. Artıklar- tahmini eğrileri.

Tahmin edilen ve gerçek değer grafiğinde gerçek çıktı verilerinin tahmin edilen çıktı verileriyle karşılaştırıldığı grafikdir. Şekil 18'deki grafikte 3,60 J gerçek değerine sahip verinin 3,97 J tahmin verisine karşılık artık değerinin fazla olduğu gözlemlenmiştir. Fakat bu durum, çizgi etrafındaki gerçek-tahmin verilerin yakın olmasından dolayı önemsenmemektedir.

Enerji absorpsiyonu

absorpsiyon enerjisi
değerine göre renk
noktaları
3,6 5,01



Şekil 4. 18. Tahmin-gerçek eğrileri.

➤ Ultra hızlı kendi kendine iyileşen kompozit malzemenin sayısal optimizasyonu

Numunenin deney tasarımı sonrası yapılan ANOVA analizleri sonucu, sayısal optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Malzemenin absorbe ettiği maksimum olduğu değer için sayısal optimizasyon yapılmıştır. Yapılan optimizasyon sonucu en yüksek absorbe enerji tahmini 4,857 J olarak hesaplanmıştır (şekil 4.19). Deneysel tasarım noktalarının %95 güven bandı içerisinde kalıyor olması güçlü bir tahmin sunmaktadır. Bu sonuca göre, optimum sodyum bikarbonat ve epoksi matris oranları aşağıdaki tablo 5’de gösterilmiştir.

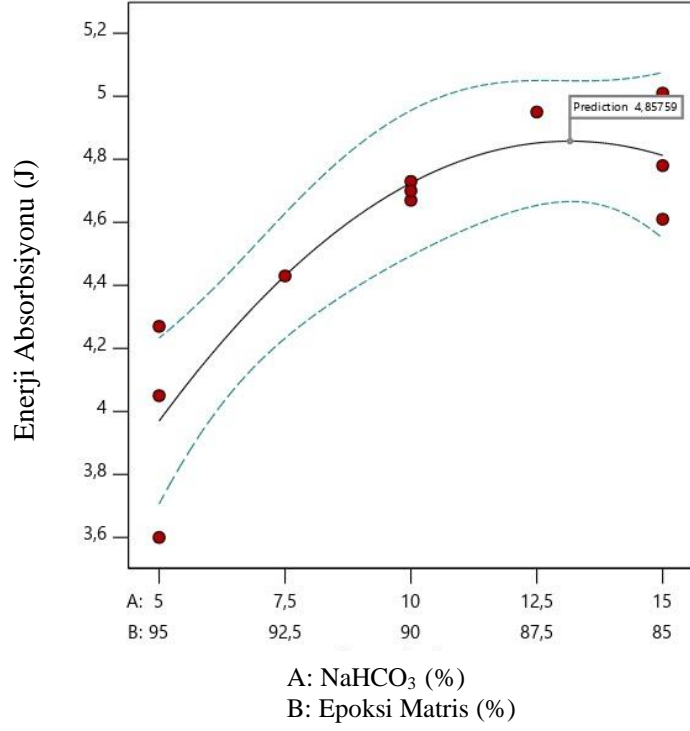
Enerji absorpsiyonu (J)

● Design Points

-- 95% CI Bands

X1 = A: NaHCO₃ (%)

X2 = B: Epoksi Matris



Şekil 4. 19. Enerji absorpsiyon tahminleri.

Deneysel tasarım yöntemi kullanılarak elde edilen optimum matris ve dolgu malzemesi oranları

Çizelge 4. 5. Ultra hızlı kendi kendine iyileşebilen kompozit malzeme dolgu oranı nümerik optimizasyonu.

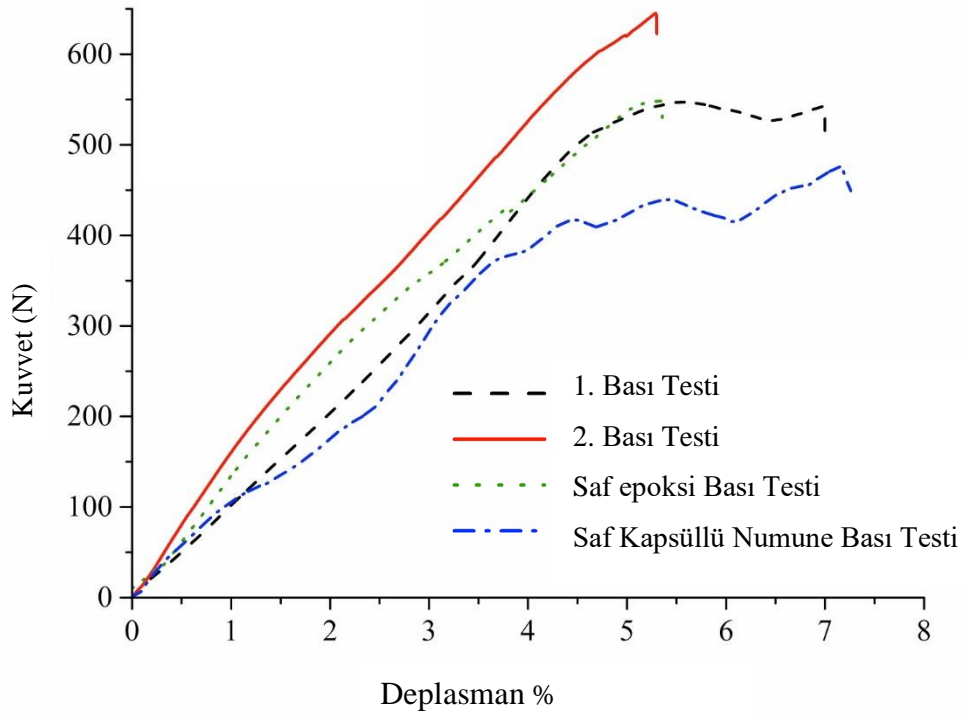
| Numara | NaHCO ₃ | Epoksi Matris | Enerji Absorpsiyonu | İstenilebilirlik |
|--------|--------------------|---------------|---------------------|------------------|
| 1 | 13,158 | 86,842 | 4,858 | 0,892 |

4.3.2. Bası deney sonuçları

İyileşme ajanlarıyla doldurulan makro küreler ve aktivatör NaHCO_3 dolgulu epoksi ile bası numuneleri hazırlanmıştır. Numunelere 3 mm/ dk. sabit hızlı statik bası testi uygulanmıştır. Test sonuçları şekil 4.20' de gösterilmiştir. Ayrıca epoksi bazlı kapsül duvarlarında meydana gelen kırılma dirençlerinin belirlenmesi amacıyla iyileşme ajanı ilave edilmeksizin üretilen numunelerin bası deneyleri gerçekleştirilmiştir.

İlk deneyde elde edilen eğride kapsüllerin kırılması esnasında hem enerji depolanmıştır. Hem de plastik deformasyon meydana geldiğinden deplasman meydana gelmiştir. Aynı numunede gerçekleştirilen ikinci eğri incelendiğinde ise epoksi bağlarındaki iç içe geçmeler ve kapsül içerisindeki ajanların hasar bölgelerini doldurması ile yapı boşluksuz yekpare davranış sergilemiştir. Bu sebeple düşük deplasman meydana gelmiştir. Tepki kuvveti ise beklendiği gibi artış göstermiştir.

İkinci deney ile saf epoksi dolu deney numunesi karşılaştırıldığında ise iki boşluksuz yapıda da dalgalanmaların meydana gelmediği görülmektedir. Kendi kendine iyileşebilen numunenin ikinci deneyinde meydana gelen yüksek gerilim ve elastik bölgenin fazlalığı iyileşmenin varlığının mekanik olarak ispatıdır.

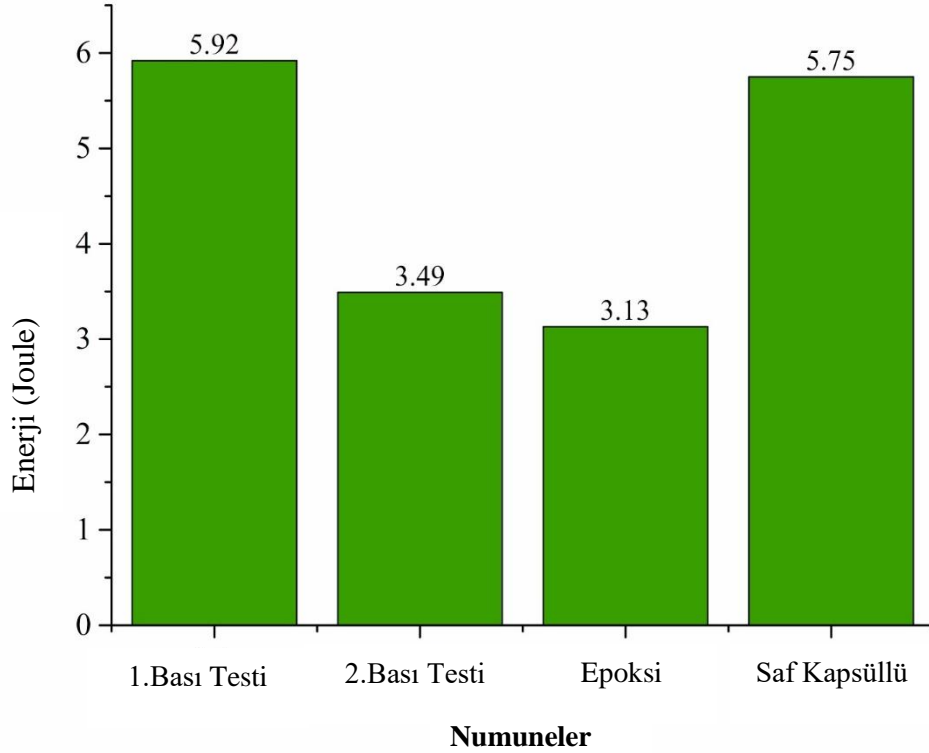


Şekil 4. 20. Ultra hızlı kendi kendine iyileşebilen kompozit malzemenin bası deney sonuçları.

Kapsül içerisinde iyileşme ajanı olan ve olmayan deney numuneleri karşılaştırıldığında ise sıvı formdaki iyileşme ajanlarının bası etkisine karşı kapsül duvarlarını içeriden destekleyici etkisi görülmektedir. Bu sebeple emilen enerji değerlerinde artış gözlemlenmiştir.

Kuvvet deplasman grafikleri altında kalan alanın integrali alındığında absorbe edilen enerji miktarını vermektedir. İlk deney esnasında kırılmamış kapsüllerin ve yapısal bütünlük sebebiyle yüksek enerji (5,92 Joule) absorbe edilmiştir (Şekil 4.21). Çünkü kapsüllerin kırılması esnasında yük enerji olarak depolanmaktadır. İkinci deneyde ise kapsüllerin yapı içerisinde sadece dolgu görevi görmesi sebebiyle enerji absorpsiyonuna katkısı yoktur. Sıkışan epoksi matris bağları sebebiyle düşük deplasman olması eğri alanında azalmaya yol açmıştır. Bu nedenle 3,49 Joule değerinde enerji depolanmıştır.

Kapsül içerisinde iyileşme ajanlarının olmadığı deneyde sıvı akışının enerji absorpsiyonuna %3 oranında katkı sağladığı görülmektedir.



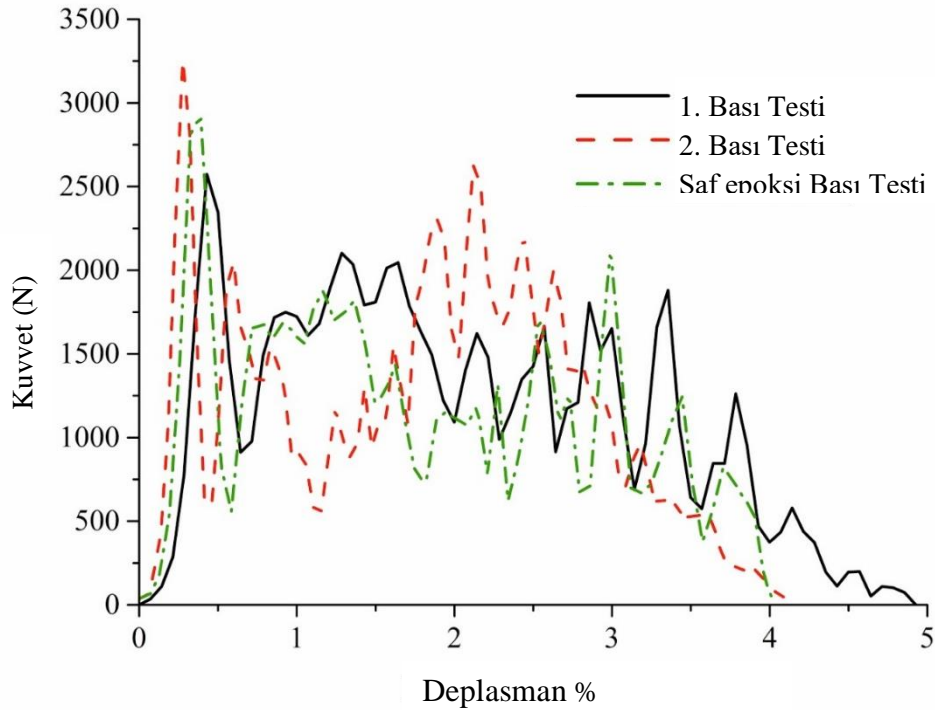
Şekil 4. 21. Ultra hızlı kendi kendine iyileşebilen kompozit malzemenin bası deneyi altında enerji absorpsiyon değerleri.

4.3.3. Darbe deney sonuçları

Ultra hızlı kendi kendine iyileşen kompozit numune üzerine bası yönünde gelen darbe etkisi sonuçları şekil 4.22' de gösterilmiştir. Testler, kendi kendine iyileşmenin gözlemlenmesi için tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir. İyileşme ajanının epoksi boşluklarını doldurmasının ardından beklenen yapısal bütünlük ikinci test ile tespit edilmiştir. Ayrıca, saf epoksi deneyleri gerçekleştirilmiştir. Böylelikle kusursuz epoksi yapısı ile onarım gerçekleşmiş epoksi yapısının mekanik farklılıkları iyileşme kalitesi tespit edilmiştir.

Eğrilerde görülen ilk tepki kuvvetleri karşılaştırıldığında saf epoksi numunesi ile ikinci bası numunesi arasında benzerlik görülmektedir. Bu durum iyileşme ajanlarından beklenen iyileşme performansını göstermektedir. İlk deneyden elde edilen ilk tepki kuvveti veya daha az tepki kuvveti elde edilmiş olsaydı, mekanik iyileşme performansında verimin düşüklüğü veya epoksi ile siyanoakrilat ajanın arayüzey uyumunun düşüklüğü söz konusu olurdu.

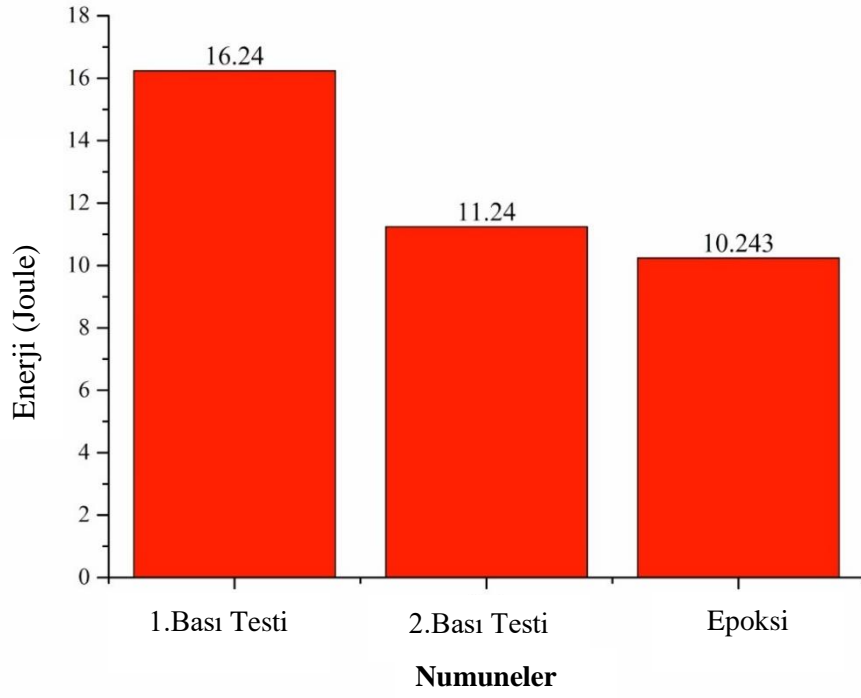
Deneysel esnasında meydana gelen deplasman değerleri karşılaştırıldığında, ilk bası deneyinde kapsüllerde meydana gelen plastik deformasyon esnasında şekil değiştirmeden dolayı deplasmanda artış gözlemlenmiştir. Hasar sonrası iyileşme ile yapı içerisinde epoksi kapsüller, epoksi matris ve iyileşme vasfını tamamlamış siyanoakrilat yekpare davranış sergilemiştir. Böylece saf epokside olduğu gibi %4 değerinde deplasman meydana gelmiştir.



Şekil 4. 22. Ultra hızlı kendi kendine iyileşebilen kompozit malzemenin darbe deney sonuçları.

Darbe esnasında sandviç yapı içerisinde meydana gelen plastik deformasyonlar sonucunda kapsüller, epoksi matris ve kapsül içerisindeki sıvı formdaki iyileşme ajanlarının her birinde belirli oranda şekil değiştirmeler meydana gelmektedir. Bu esnada darbe enerjisi formunu değiştirerek, plastik deformasyon esnasında ısı, kırılma enerjisi ve sıvı akış enerjisine dönüşmektedir. Ayrıca yüksek şekil değiştirme hızlarında gerçekleştirilen deneylerde kapsül içlerindeki kırılmalarda hava boşluklarından kaynaklanan tepki kuvvetleri görülmektedir. Özellikle yüksek deplasmanlarda havanın sıkışması eğrilerde salınımlar oluşturmaktadır. Şekil 4.22' de ilk bası deneyinde %3' den sonra meydana gelmiş olan yükselmeler kapsül içerisindeki hava direncinden dolayı meydana gelmektedir.

Darbe deneyleri sırasında elde edilen kuvvet-deplasman eğrilerinin altındaki alan, emilen enerji miktarını vermektedir. Bası testinde olduğu gibi, yüksek gerginime neden olan makro kapsüller, yapının enerji emme kapasitesini artırmaktadır. Böylece ilk test sonucunda 16,24 j enerji absorbe edilebilmiştir. İkinci deneyde ise kapsüller kırılmış ve yapı daha az deplasman yapmıştır. Böylece enerji absorpsiyon değerleri 11,24 j değerinde kalmıştır. Saf epoksi ile ikinci bası deneyleri karşılaştırıldığında ise enerji absorpsiyon verilerindeki benzerlik göze çarpmaktadır. Bu durum yapısal mukavemetin hasar sonrası yeniden kazanıldığını göstermektedir.



Şekil 4. 23. Ultra hızlı kendi kendine iyileşebilen kompozit malzemenin darbe deneyi altında enerji absorpsiyon değerleri.

Bası yönünde gerçekleştirilen deneylerde şekil değiştirme hızında meydana gelen değişiklik anlık tepki kuvvetlerine neden olmaktadır. Bu kuvvetler, bası testinde olduğundan farklı olarak yapıda, daha parçalı ve çok yerden kırılmalardan kaynaklanmaktadır. Kapsül içerisindeki sıvı ajanda yüksek şekil değiştirme hızı ile dalgalanmalara yol açmaktadır. Bu dalgalanmalar enerjideki form değişikliği olarak dikkate alınmalıdır. Ayrıca kapsül içerisindeki hava boşlukları yüksek şekil değiştirme hızlarında anlık hava sıkışması ve yer değiştirme olarak form değişikliğine uğramaktadır. Böylelikle çizelge 4.6' da verilen enerji absorpsiyon farklılıkları meydana gelmektedir.

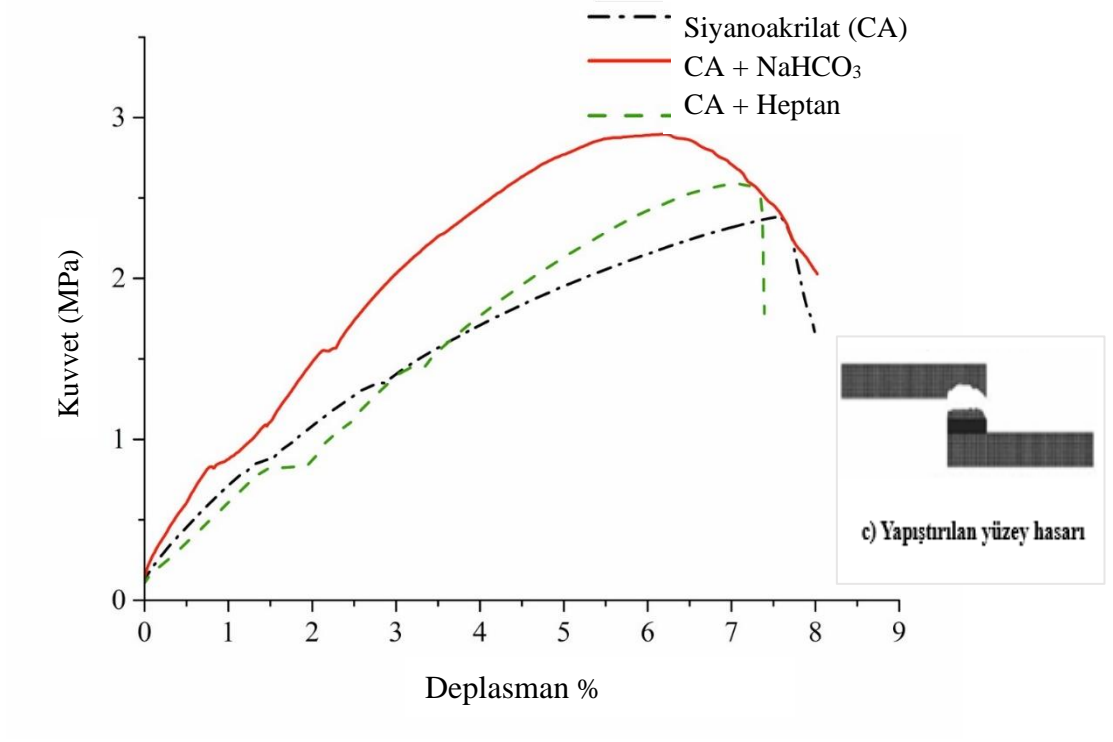
Çizelge 4. 6. Bası ve darbe deneylerinde emilen enerji miktarları.

| | Otonom İyileşme 1. Test (Joule) | Otonom İyileşme 2. Test (Joule) | Saf Epoksi 1. Test (Joule) |
|---|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|
| Bası testi | 5,92 | 3,49 | 3,13 |
| Darbe Testi 255 1/s ⁻¹ şekil değiştirme hızı | 16,23 | 11,24 | 10,24 |
| Fark (%) | 274,1 | 322,06 | 327,1 |

4.3.4. Tek nokta bindirme (SLJ) deney sonuçları

Çalışmada farklı kaynaklanmaktadır ile kimyasal iyileşme sürecine tabi tutulan siyanoakrilatların hem aktivatörler hem de epoksi ile aralarındaki uyumun tespit edilmesi önemlidir. Bu sebeple, yapışma direncinin belirlenmesi için SLJ testleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.24’ de gösterilen grafikte epoksi katmanların siyanoakrilatın yapıştırıcı ile yapıştırılmasıyla elde edilen deney eğrileri yer almaktadır. Endüstriyel alanda sıklıkla kullanılan haptan aktivatörü ile yapıştırılmış epoksi numune, aktivatör kullanılmadan ortam koşullarında havanın nem ve basıncıyla aktive olmuş numune ve toz aktivatör kullanılan siyanoakrilat yapıştırıcı ile yapıştırılan epoksi numunelere ait eğriler incelenmiştir. İncelemede yapışma ara yüzelerindeki uyum, yapıştırıcı mukavemeti ve aktivatörün yapışma mukavemetine etkileri tespit edilebilmektedir.

Deney esnasında her üç aktivatör durumu için hazırlanan deney numunelerinin, matris malzemesinden hasara uğradığı görülmüştür. Böylelikle istenilen yapışma özellikleri elde edilmiştir.



Şekil 4. 24. Tek nokta bindirme deney sonuçları.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, polistiren köpük taneleri epoksi kabuklarla kaplanarak makro kapsüller geliştirilmiştir. Kapsüller içerisinden polistiren köpükler çıkarılmış, yerlerine iyileştirici ajanlar ve aktivatörler eklenmiştir. İncelenen çalışmalara göre geliştirilen makro küre üretim sisteminin yazılı ve çevrimiçi literatürde yer almadığı görülmektedir. Bu nedenle yenilikçi bir yaklaşım sunarak literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Tez çalışmasında üç farklı türde kendi kendine onarım sağlayan yapılar geliştirilmiştir. Tezin önceki bölümlerinde olduğu gibi bu bölümde de bu üç farklı sistem ayrı ele alınacaktır.

Epoksi bazlı kendi kendine iyileşme kabiliyetine sahip sandviç yapılarda elde edilen sonuçlar maddeler halinde aşağıda belirtilmiştir.

Geliştirilen kendi kendini onaran makro kapsüller sandviç yapılara doldurulmuştur. İyileşmenin varlığını belirlemek için yüksek gerinim oranlarına sahip tekrarlanan yarı statik ve darbe altında bası testleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonucunda aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

1. Geliştirilen kendi kendini onaran makro kapsüller sandviç panele eklenmiş ve mekanik iyileşme performansları incelenmiştir. Deneysel veriler ve kesit görüntüleri incelenerek hasarın neden olduğu iyileşmeler belirlenmiştir.

2. Dolu sandviç yapıdaki ve boş sandviç yapıdaki kendi kendini onaran makro kapsüllerin enerji absorpsiyonu orantılı olarak karşılaştırılmıştır. Kendi kendini iyileştiren makro kapsül dolgulu sandviç yapılar, boş sandviç yapılarla karşılaştırıldığında, statik bası testinde 4,7 kat ve darbe testinde 5,1 kat daha fazla enerji emme davranışı sergilemiştir. Tekrarlanan deneylerin tüm aşamalarında emilen enerji miktarında azalmalar gözlemlenmiştir. Diğer bir deyişle makro kapsüller, kırılmaya karşı dirençleri ile sandviç yapının enerji emme kabiliyetine katkı sağlamıştır.

3. Kendi kendini iyileştiren makro kapsüller zarar görür ve ardından iyileşme gerçekleşir. Bu iyileşmeye sahip yapı, saf epoksi özellikleri sergiler.

4. Geliştirilen yapıların test sonuçları incelendiğinde, gerinim hızının artmasıyla birlikte enerji yutma kapasitesinde bir artış meydana gelmiştir. Sandviç yapı, dolgunun içinde hasara duyarlı makro kapsül dolgu malzemeleri ve sıvı formda malzemeler içerir. Bu durum daha fazla enerji absorbe ederek gerinim hızının artmasına katkıda bulunmuştur.

5. Geliştirilen makro kapsüllerin içerisine farklı özelliklere sahip iyileştirici ajanlar veya dolgu malzemeleri eklenerek kullanım alanları geliştirilebilir ve farklı alanlar için optimal bir iyileşme kapsülü olarak kullanılabilir.

6. Bu çalışmada üretilen sandviç hibrit malzemelerin kendi kendini iyileştirme özelliği, hasarın meydana geldiği ve hızlı iyileşmenin olduğu istenilen alanlarda kullanılabilir. Bu malzeme uzay aracı ve uçaklarda, otomotivde, savunma sektörlerinde ve ayrıca kullanılabilir.

Poliüretan bazlı geometrik olarak kendi kendine iyileşme kabiliyetine sahip sandviç yapılardan elde edilen sonuçlar maddeler halinde aşağıda belirtilmiştir.

Çalışmada geometrik olarak kendi kendine iyileşen sandviç yapı geliştirilmiştir. Bu yapı, denizaltı boru hatları, denizaltı araçları, basınçlı kaplar gibi sızdırmazlığın önem arz ettiği ve yapısal bütünlüğün korunması gereken alanlarda kullanılması hedeflenmiştir. Ayrıca literatürde yer alan geometrik kendi kendine iyileşen çalışmalarının mikro boyutlarda olduğu görülmektedir. Bu iyileşmeler, inşaat endüstrisinde meydana gelebilecek büyük çatlaklar ve yapısal hasarların tadilatında yeterli olmamaktadır. Bu nedenle geliştirilen yapıda makro boyutlarda kapsüller kullanılmıştır. Kapsüller içerisindeki iyileşme ajanları, hacimce 17 kat genişlemektedir. Böylece yapısal hasarların iyileşmesine katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Geliştirilen yapının yukarıda belirtilen amaçlara uygunluğu çeşitli testler ile kontrol edilmiştir. Bu testler sonucunda kapsüller ve sandviç yapının yük taşıma kapasitesi, bal peteği yapısının mekanik özelliklere katkısı, hasar sonrası geometrik iyileşme mekanizması, geometrik kendi kendine iyileşme ajanı olan poliüretan köpük malzemenin hava ve su geçirgenlik değerleri belirlenmiştir.

1. Bası testleri sonucunda, iyileşme ajanlarının doldurulduğu kapsüllerde üstün bası mukavemeti ile karşılaşılmıştır. Bu kritik yükün aşılması ile kapsüller kırılmıştır. Bu esnada yapıda 12,9 Joule enerji absorpsiyon edilmiştir. Hasar gören kapsüllerden, yapı içerisindeki boşluklara dağılan ajanlar çatlaklarda onarım sağlamıştır. Onarımı tamamlanan yapı üzerinde 2. deney gerçekleştirilmiştir. Deney sonucunda yapıda 6,04 joule enerji absorpsiyonu görülmüştür.

2. Yapıda meydana gelmesi beklenen geometrik iyileşme penetrasyon deneyi ile gözlemlenmiştir. Deneyde 12 mm lik delik meydana gelmiştir. Test sırasında Al sandviç plakalar, Al bal peteği, epoksi matris ve makro kapsüller penetrasyon çubuğuna karşı direnç göstermiştir. Hasar gören bu yapılarda 4,04 joule enerji absorbe edilmiştir. Meydana gelen hasar 120 sn. içerisinde poliüretan köpük ile tamamen kapanmıştır. Köpüğün katı hale gelmesinin ardından 2. penetrasyon deneyi gerçekleştirilmiştir. İyileşme bölgesinde köpük yapının penetrasyon esnasındaki kesme kuvvetine karşı göstermiş olduğu direnç sonucunda 0,46 joule enerji sönmülmüştür. Bu deney 441 Strain Rate oranlarında gerçekleştirilmiştir.

3. Geliştirilen sandviç yapının değişken sıvı ve hava basıncı etkisinde sergilemiş olduğu davranış incelenmiştir. Yapının bu davranışı, denizaltı sistemleri, basınçlı kap sistemleri ve uzay araçları gibi yapısal hasarların önemli olduğu alanlarda kullanımı hakkında bilgi vermektedir. Artan sıvı basıncı etkisinde 70 mikron kalınlığında hücre duvarlarının hasar görmemiş olması önemlidir. Hava geçirgenlik verileri incelendiğinde geometrik iyileşme ile beraber hava akışında önemli azalmalar görülmektedir. Böylece hava geçirgenlik süresinin kritik olduğu durumlarda hava akışının azaltılacağı görülmektedir.

Siyanoakrilat esaslı kendi kendine iyileşme kabiliyetine sahip yapılardan elde edilen sonuçlar maddeler halinde aşağıda belirtilmiştir.

Literatürde yer alan çalışmalarda kendi kendine iyileşmeler zamana bağlı olarak meydana gelmektedir. Yakıt tankları gibi anlık iyileşmenin beklendiği yapılarda ise mevcut kendi kendine iyileşme yapıları beklenen görevi görmemektedir. Bu nedenle ultra hızlı yani anlık iyileşme vasfına sahip yapıların geliştirilmesi endüstriyel açıdan önem teşkil etmektedir.

Çalışmada siyakların aktivatörü olarak literatürde yer alan pentan olarak isimlendirilen yapılardan farklı olarak toz aktivatör (sodyum bi karbonat) kullanılmıştır. Toz aktivatör makro kürelerin ilave edildiği kalıbın boş hacimlerini dolduran epoksi içerisine homojen oranda ilave edilmiştir. Bu oran deneysel tasarım yöntemi ile belirlenmiştir. Ayrıca yapısal bütünlüğün korunması ve yüzey pürüzlülüğünün sağlanması amacıyla hazırlanan numunenin dış yüzeyi iki katmanlı silikon ile kaplanmıştır. Hasar sonrası kırılan makro kürelerin içlerindeki iyileşme ajanlarından etrafa dağılmış ve NaHCO_3 ile temas ettiği yerlerde kimyasal reaksiyon başladığı için oldukça yüksek ısı ortaya çıkmıştır. Temas bölgelerindeki reaksiyon sonucu $120\text{ }^\circ\text{C}$ ' lik ısı açığa çıkmıştır. Termal kamera görüntüleri ile anlık iyileşme ispatlanmıştır.

Geliştirilen ultra hızlı kendi kendine iyileşebilen kompozit yapıdaki bir diğer doğrulama yöntemi mekanik deneylerdir. Hasarlı bölgelerde yapısal mukavemet normal şartlarda oldukça azalmaktadır. Eğer yapı otonom olarak iyileşme kabiliyetine sahipse bu kusur hızlı şekilde giderilerek yapı mekanik olarak eski formuna kavuşacaktır. Gerçekleştirilen bası ve darbe deneylerinde mekanik olarak iyileşme tespit edilmiştir. Ayrıca elastik özellikleri yüksek silikon kaplama ile plastik deformasyona maruz kalan numunenin yapısal bütünlüğü korunmuştur. Silikonun içeriğine ilave edilen toz aktivatör ile iyileşme ajanlarının yüzey bölgelerinde de kürlenmelere katkı sağladığı da tespit edilmiştir.

Sonuç olarak literatürde yer almayan ultra hızlı kendi kendine iyileşebilen kompozit yapı, anlık iyileşmenin önem arz ettiği basınçlı kaplar, denizaltıları, yakıt tankları, uzay araçları

gibi birçok endüstride kullanımının uygun olduğu gerçekleştirilen deneyler ve karakterizasyon teknikleri ile tespit edilmiştir.

Tez çalışması teknoloji hazırlık seviyesi açısından incelendiğinde, farklı karakterizasyon yöntemleriyle uygulanabilirliği kanıtlandığından ve prototip geliştirmelerle desteklendiğinden TSH 5 kapsamında değerlendirilebileceği düşünülmektedir.

Çalışmanın devamı olarak, üretim tekniklerinin tam otomasyon haline dönüştürülmesi, farklı niteliklere sahip polimerler ile uygulamanın devam ettirilmesi, spesifik alanlarda kullanılmasına yönelik farklı karakterizasyonların gerçekleştirilmesi ve böylelikle başvuru patent ve makalelerin devamı olarak literatüre ve endüstriye katkı sağlanması hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR

- (Anonim, 2018). Nondestructive Bond Testing for Aircraft Composites. Erişim adresi: <https://www.qualitymag.com/articles/94999-nondestructive-bond-testing-for-aircraft-composites>.
- Aguirresarobe, R.H., Nevejans, S., Reck, B., Irusta, L., Sardon, H., Asua, J.M. & Ballard, N. (2021). Healable and self-healing polyurethanes using dynamic chemistry. *Progress in Polymer Science*, 114, 101362. doi: 10.1016/j.progpolymsci.2021.101362
- Ağa, Süleiman (2016). Sonlu elemanlar (finite elements) yöntemi Erişim adresi: <https://docplayer.biz.tr/5571134-Sonlu-elemanlar-finite-elements-ontemi.html>
- Akkuş, H. (2016). *Bal peteği yapıların mekanik davranışlarının nano parçacık takviyeli yapıştırıcı kullanılarak deneysel ve teorik olarak araştırılması* (Doktora tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya). Erişim adresi: <http://acikerisimarsiv.selcuk.edu.tr:8080/xmlui/handle/123456789/6169>
- Aguirresarobe, R. H., Nevejans, S., Reck, B., Irusta, L., Sardon, H., Asua, J. M., & Ballard, N. (2021). Healable and self-healing polyurethanes using dynamic chemistry. *Progress in Polymer Science*, 114, 101362. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2021.101362>
- Akhan, S. (2019). *Kendi kendini onarabilen polibenzoksazin esaslı nanokompozit malzemelerin geliştirilmesi* (Yüksek lisans, Marmara Üniversitesi, İstanbul). Erişim adresi: <https://avesis.marmara.edu.tr/yonetilen-tez/7c04e2da-34d5-4b1f-b41f-4b738d0fef26/kendi-kendini-onarabilen-poliuretan-nanokompozit-kaplamaların-sentezi-ve-karakterizasyonu>
- Akkuş, H. (2016). *Bal peteği yapıların mekanik davranışlarının nano parçacık takviyeli yapıştırıcı kullanılarak deneysel ve teorik olarak araştırılması*. (Doktora, Selçuk Üniversitesi, Konya). Erişim adresi: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/>
- Aksoylu, B. (2007). *Kompozit Malzemelerde Elyaf Burkulmasının Sayısal Olarak İncelenmesi* (Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi) Erişim adresi: <https://polen.itu.edu.tr/bitstream/11527/4749/1/4661.pdf>
- Al-Tabbaa, A., Litina, C., Giannaros, P., Kanellopoulos, A., & Souza, L. (2019). First UK field application and performance of microcapsule-based self-healing concrete. *Construction and Building Materials*, 208(2019), 669–685. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.178>
- Anderson, T. L. (2017). *Fracture Mechanics* (3rd Edition).
- Asi, D. (2008). *Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin aşınma Performansının İncelenmesi*. (Yüksek lisans tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi) Erişim adresi: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=UGT2Xepm2JISYwiSQhd7KA&no=EiUwr3bcLlflPDMuQH6XKg>
- Baroiu, N., Beznea, E. F., Coman, G., & Chirica, I. (2021). Static and thermal behaviour of ship structure sandwich panels. *Thermal Science*, 25(2 Part A), 1109–1121. <https://doi.org/10.2298/TSCI190531463B>
- Baydar, D. G., Bekem, A., Doğu, M., Gemici, Z., & Ünal, A. (2012). Production And Characterization Of Continuous E-glass Fiber Reinforced Polypropylene Composites. *Journal of Engineering and Natural Sciences*, 120-132. Erişim adresi:

<https://eds.yildiz.edu.tr/ArticleContent/Journal/sigma/Volumes/2012/Issues/2/YTUJENS-2012-30-2.385.pdf>

- Bekem, A., Ercan, H., Dogu, M., & Unal, A. (2011). Investigation of Mechanical Behaviour of Honeycomb Composites Used in Aircraft Industry. *6 Th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, May, 475–480. Erişim adresi: <http://web.firat.edu.tr/iats/cd/subjects/Metallurgy&Material/MSM-97.pdf>
- Birjandi Nejad, H., Garrison, K. L., & Mather, P. T. (2016). Comparative analysis of shape memory-based self-healing coatings. *Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics*, 54(14), 1415–1426. <https://doi.org/10.1002/polb.24061>
- Blaiszik, B. J., Kramer, S. L. B., Olugebefola, S. C., Moore, J. S., Sottos, N. R., & White, S. R. (2010). Self-Healing Polymers and Composites. *Annual Review of Materials Research*, 40, 179–211. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070909-104532>
- Blaiszik, B. J., Sottos, N. R., & White, S. R. (2008). Nanocapsules for self-healing materials. *Composites Science and Technology*, 68(3–4), 978–986. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2007.07.021>
- Bleay, S. M., Loader, C. B., Hawyres, V. J., Humberstone, L., & Curtis, P. T. (2001). A smart repair system for polymer matrix composites. *Composites- Part A: Applied Science and Manufacturing*, 32(12), 1767–1776. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(01\)00020-3](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(01)00020-3)
- Brown, E. N., Sottos, N. R., & White, S. R. (2002). Fracture testing of a self-healing polymer composite. *Experimental Mechanics*, 42(4), 372–379. <https://doi.org/10.1007/bf02412141>
- Brown, E. N., White, S. R., & Sottos, N. R. (2004). Microcapsule induced toughening in a self-healing polymer composite. *Journal of Materials Science*, 39(5), 1703–1710. <https://doi.org/10.1023/B:JMSC.0000016173.73733.dc>
- Brown, E. N., White, S. R., & Sottos, N. R. (2005). Retardation and repair of fatigue cracks in a microcapsule toughened epoxy composite - Part II: In situ self-healing. *Composites Science and Technology*, 65(15-16 SPEC. ISS.), 2474–2480. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.04.053>
- Buruk Sahin, Y., Aktar Demirtaş, E., & Burnak, N. (2016). Mixture design: A review of recent applications in the food industry. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 22(4), 297–304. <https://doi.org/10.5505/pajes.2015.98598>
- Çalışkan, E. (2017). Synthesis and characterization of rigid polyurethane foam containing phosphorus based flame retardant. *Polymer Science and Technology Programme. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s10973-021-10837-9>
- Capelot, M., Montarnal, D., Tournilhac, F., & Leibler, L. (2012). Metal-catalyzed transesterification for healing and assembling of thermosets. *Journal of the American Chemical Society*, 134(18), 7664–7667. <https://doi.org/10.1021/ja302894k>
- Cardoso, R. J., Shukla, A., & Bose, A. (2002). Effect of particle size and surface treatment on constitutive properties of polyester-cenosphere composites. *Journal of Materials Science*, 37(3), 603–613. <https://doi.org/10.1023/A:1013781927227>
- Carlsson, L. A., & Kardomateas, G. A. (2011). *Structural and Failure Mechanics of Sandwich Composites*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3225-7>
- Chang, T., Panhwar, F., & Zhao, G. (2020). Flourishing Self-Healing Surface Materials:

- Recent Progresses and Challenges. *Advanced Materials Interfaces*, 7(6), 1–37. <https://doi.org/10.1002/admi.201901959>
- Changa, Kun, H. J., & Gu, S.-Y. (2019). A transparent, highly stretchable, self-healing polyurethane based on disulfide bonds. *European Polymer Journal*, 112, 822–831. doi: 10.1016/j.eurpolymj.2018.11.005
- Chen, T., Fang, L., Li, X., Gao, D., Lu, C., & Xu, Z. (2020). Self-healing polymer coatings of polyurea-urethane/epoxy blends with reversible and dynamic bonds. *Progress in Organic Coatings*, 147(July), 105876. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105876>
- Chen, X., Dam, M. A., Ono, K., Mal, A., Shen, H., Nutt, S. R., Sheran, K., & Wudl, F. (2002). A thermally re-mendable cross-linked polymeric material. *Science*, 295(5560), 1698–1702. <https://doi.org/10.1126/science.1065879>
- Cheng, M., & Chen, W. (2003). Experimental investigation of the stress-stretch behavior of EPDM rubber with loading rate effects. *International Journal of Solids and Structures*, 40(18), 4749–4768. [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(03\)00182-3](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(03)00182-3)
- Chowdhury, R. A., Hosur, M. V., Nuruddin, M., Tcherbi-Narteh, A., Kumar, A., Boddu, V., & Jeelani, S. (2015). Self-healing epoxy composites: Preparation, characterization and healing performance. *Journal of Materials Research and Technology*, 4(1), 33–43. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2014.10.016>
- Chujo, Y., Sada, K., Naka, A., Nomura, R., & Saegusa, T. (1993). Synthesis and redox gelation of disulfide-modified polyoxazoline. *Macromolecules*, 26(5), 883–887. <https://doi.org/doi.org/10.1021/ma00057a001>
- Chujo, Y., Sada, K., & Saegusa, T. (1990). Reversible Gelation of Polyoxazoline by Means of Diels-Alder Reaction. *Macromolecules*, 23(10), 2636–2641. <https://doi.org/10.1021/ma00212a007>
- Coover, H. W., Dreifus, D. W., & O'connor, J. T. (1990). Cyanoacrylate adhesives. In *Springer*, 1(12), 463–477.
- Cordier, P., Tournilhac, F., Soulié-Ziakovic, C., & Leibler, L. (2008). Self-healing and thermoreversible rubber from supramolecular assembly. *Nature*, 451(7181), 977–980. <https://doi.org/10.1038/nature06669>
- courtney, T. H. (2005). *Mechanical Behavior of Materials: Second Edition*. Erişim adresi: [https://books.google.com.tr/books?hl=tr&lr=&id=QcYSAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR3&dq=Mechanical+Behavior+of+Materials:+Second+Edition.&ots=TaPX7yC PzT&sig=pKWL88oNzhnvMd2jIY_hSz-3RtU&redir_esc=y#v=onepage&q=Mechanical Behavior of Materials%3A Second Edition.&f=false](https://books.google.com.tr/books?hl=tr&lr=&id=QcYSAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR3&dq=Mechanical+Behavior+of+Materials:+Second+Edition.&ots=TaPX7yC PzT&sig=pKWL88oNzhnvMd2jIY_hSz-3RtU&redir_esc=y#v=onepage&q=Mechanical+Behavior+of+Materials%3A+Second+Edition.&f=false)
- Coxworth, B. (2014). *Scientists create an inexpensive self-healing polymer*. Erişim adresi: <https://newatlas.com/dynamic-polyurea-self-healing-polymer/30750/>
- Day, R. J., Lovell, P. A., & Pierre, D. (1997). Toughening of epoxy resins using particles prepared by emulsion polymerization: Effects of particle surface functionality, size and morphology on impact fracture properties. *Polymer International*, 44(3), 288–299. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1097-0126\(199711\)44:3<288::aid-pi866>3.0.co;2-b](https://doi.org/10.1002/(sici)1097-0126(199711)44:3<288::aid-pi866>3.0.co;2-b)
- Demertzi, M., Silvestre, J. D., & Durão, V. (2020). Life cycle assessment of the production of composite sandwich panels for structural floor's rehabilitation. *Engineering Structures*, 221, 111060.

- <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111060>
- Demir, L. (2004). *İstatiksel Deney Tasarımı Yöntemi ve Bir Tekstil İşletmesinde Uygulanması*. (Yüksek lisans tezi, Pamukkale Üniversitesi) Erişim adresi: <http://acikerisim.pau.edu.tr/xmlui/bitstream/handle/11499/1215/Leyla%20Demir.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Dilaver, M. (2017). *Natural and Applied Sciences Synthesis, Characterization and Application of Self-Healing Coatings on Several Substrates By Spray Technique*. (Doktora tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi)
- Dong, B., Wang, Y., Fang, G., Han, N., Xing, F., & Lu, Y. (2015). Smart releasing behavior of a chemical self-healing microcapsule in the stimulated concrete pore solution. *Cement and Concrete Composites*, 56, 46–50. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.10.006>
- Dry, C. (1996). Procedures developed for self-repair of polymer matrix composite materials. *Composite Structures*, 35(3), 263–269. [https://doi.org/10.1016/0263-8223\(96\)00033-5](https://doi.org/10.1016/0263-8223(96)00033-5)
- Dry, C. M. (2000). Three designs for the internal release of sealants, adhesives, and waterproofing chemicals into concrete to reduce permeability. *Cement and Concrete Research*, 30(12), 1969–1977. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00415-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00415-4)
- Faber, K. T., & Evans, A. G. (1983). Crack deflection processes—I. Theory. *Acta Metallurgica*, 31(4), 565–576. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(83\)90046-9](https://doi.org/10.1016/0001-6160(83)90046-9)
- Fang, X., Pan, Z., & Chen, A. (2021). Analytical models to estimate efficiency of capsule-based self-healing cementitious materials considering effect of capsule shell thickness. *Construction and Building Materials*, 274, 121999. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121999>
- Farle, A. S., Kwakernaak, C., van der Zwaag, S., & Sloof, W. G. (2015). A conceptual study into the potential of Mn+1AX_n-phase ceramics for self-healing of crack damage. *Journal of the European Ceramic Society*, 35(1), 37–45. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2014.08.046>
- Feng, L., Yu, Z., Bian, Y., Lu, J., Shi, X., & Chai, C. (2017). Self-healing behavior of polyurethanes based on dual actions of thermo-reversible Diels-Alder reaction and thermal movement of molecular chains. *Polymer*, 124, 48–59. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2017.07.049>
- Fifo, O., Ryan, K., & Basu, B. (2014). Glass fibre polyester composite with in vivo vascular channel for use in self-healing. *Smart Materials and Structures*, 23(9), 095017. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/23/9/095017>
- Gaan, S., Liang, S., Misprouve, H., Perler, H., Naescher, R., & Neisius, M. (2015). Flame retardant flexible polyurethane foams from novel DOPO-phosphoramidate additives. *Polymer Degradation and Stability*, 113, 180–188. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2015.01.007>
- Gardner, D., Jefferson, A., Hoffman, A., & Lark, R. (2014). Simulation of the capillary flow of an autonomic healing agent in discrete cracks in cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 58, 35–44. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.01.005>
- Ghosh, B., & Urban, M. W. (2009). Self-repairing oxetane-substituted chitosan polyurethane networks. *Science*, 323(5920), 1458–1460. <https://doi.org/10.1126/science.1167391>

- Ghosh, S. K. (2008). *Self-healing materials : fundamentals, design Strategies, and applications* (1st editio). Erişim adresi: <https://www.wiley.com/eng/Self+healing+Materials:+Fundamentals,+Design+Strategies,+and+Applications-p-9783527318292>
- Gu, H., Ma, C., Gu, J., Guo, J., Yan, X., Huang, J., Zhang, Q., & Guo, Z. (2016). An overview of multifunctional epoxy nanocomposites. *Journal of Materials Chemistry C*, 4(25), 5890–5906. <https://doi.org/10.1039/c6tc01210h>
- Guadagno, L., Vertuccio, L., Naddeo, C., Calabrese, E., Barra, G., Raimondo, M., Sorrentino, A., Binder, W. H., Michael, P., & Rana, S. (2019). Self-healing epoxy nanocomposites via reversible hydrogen bonding. *Composites Part B: Engineering*, 157(May 2018), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.08.082>
- Gunashekar, S., Pillai, K. M., Church, B. C., & Abu-Zahra, N. H. (2015). Liquid flow in polyurethane foams for filtration applications: a study on their characterization and permeability estimation. *Journal of Porous Materials*, 22(3), 749–759. <https://doi.org/10.1007/s10934-015-9948-2>
- Guo, T., Gao, Q., & Liang, H. (2020). Thermal and combustion behaviors of rigid polyurethane foams prepared with heteroaromatic polyol. *Proceedings - International Conference on Artificial Intelligence and Electromechanical Automation, AIEA 2020*, 836–845. <https://doi.org/10.1109/AIEA51086.2020.00183>
- Han, T., Wang, X., Li, D., Li, D., Xing, F., & Han, N. (2020). Impermeability characteristics of cementitious materials with self-healing based on epoxy/urea-formaldehyde microcapsules using an immersion test. *Construction and Building Materials*, 259, 119782. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119782>
- Hayes, S. ., Zhang, W., Branthwaite, M., & Jones, F. . (2007). Self-healing of damage in fibre-reinforced polymer-matrix composites. *Journal of Royal Society Interface*, 4(13), 381–387. <https://doi.org/doi.org/10.1098/rsif.2006.0209>
- Hayırkuş, A. (2021). *Sürekli elyaf takviyeli termoplastik kompozit malzeme esaslı çok hafif sandviç plakların sonlu elemanlar analiz yöntemi ve deneysel olarak incelenmesi* [Yüksek lisans tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi]. <https://tez.yok.gov.tr>
- He, M., & Hu, W. (2008). A study on composite honeycomb sandwich panel structure. *Materials and Design*, 29(3), 709–713. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2007.03.003>
- Hillewaere, X. K. D., & Du Prez, F. E. (2015). Fifteen chemistries for autonomous external self-healing polymers and composites. *Progress in Polymer Science*, 49–50, 121–153. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2015.04.004>
- Hu, Z., Zhang, D., Lu, F., Yuan, W., Xu, X., Zhang, Q., Liu, H., Shao, Q., Guo, Z., & Huang, Y. (2018). Multistimuli-Responsive Intrinsic Self-Healing Epoxy Resin Constructed by Host-Guest Interactions. *Macromolecules*, 51(14), 5294–5303. <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.8b01124>
- Imato, K., Nakajima, H., Yamanaka, R., & Takeda, N. (2020). Self-healing poly(siloxane-urethane) elastomers with remoldability, shape memory and biocompatibility. *Polymer Journal*, 53, 355–362. <https://doi.org/10.1038/s41428-020-00432-4>
- İşlek, H. İ. (2020). *Takviye Nedir?* Eeişim adresi: <http://kompozithayalleri.com/takviye-nedir/>
- Javierre, E. (2019). Modeling self-healing mechanisms in coatings: Approaches and

- perspectives. *Coatings*, 9(2), 1–19. <https://doi.org/10.3390/COATINGS9020122>
- Jiang, H., Ren, Y., Jin, Q., Zhu, G., & Liu, Z. (2020). Flexural performances of fiber face-sheets/corrugated core sandwich composite structures reinforced by horizontal stiffeners. *International Journal of Mechanical Sciences*, 168(November 2019), 105307. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105307>
- Jin, F. L., Li, X., & Park, S. J. (2015). Synthesis and application of epoxy resins: A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 29, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2015.03.026>
- Jin, H., Mangun, C. L., Stradley, D. S., Moore, J. S., Sottos, N. R., & White, S. R. (2012). Self-healing thermoset using encapsulated epoxy-amine healing chemistry. *Polymer*, 53(2), 581–587. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2011.12.005>
- Johnston, D. S., & Pepper, D. C. (2003). Polymerisation via macrozwitterions, 2. Ethyl and butyl cyanoacrylates polymerised by pyridine and polyvinylpyridine. *Die Makromolekulare Chemie*, 182(2), 407–420. <https://doi.org/10.1002/macp.1981.021820212>
- Joseph, C., Jefferson, A. D., & Cantoni, M. B. (2007). Issues Relating To the Autonomic Healing of Cementitious Materials. *First International Conference on Self Healing Materials*, April, 1–8.
- Kalista, S. J., Ward, T. C., & Oyetunji, Z. (2007). Self-healing of poly(ethylene-co-methacrylic acid) copolymers following projectile puncture. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 14(5), 391–397. <https://doi.org/10.1080/15376490701298819>
- Kassapoglou, C. (2013). *Design And Analysis Of Composite Structures*. <https://doi.org/10.1002/9781118536933>
- Kassapoglou, C., Fantle, S. C., & Chou, J. C. (1995). Wrinkling of composite sandwich structures under compression. *Journal of Composites Technology and Research*, 17(4), 308–316. <https://doi.org/10.1520/ctr10451j>
- Kaya, A. İ. (2016). *Kompozit Malzemeler ve Özellikleri*.
- Keller, M. W., White, S. R., & Sottos, N. R. (2008). Torsion fatigue response of self-healing poly(dimethylsiloxane) elastomers. *Polymer*, 49(13–14), 3136–3145. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2008.04.041>
- Kepler, J. A., & Bull, P. H. (2009). Sensitivity of structurally loaded sandwich panels to localized ballistic penetration. *Composites Science and Technology*, 69(6), 696–703. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.03.005>
- Kessler, M. R., & White, S. R. (2001). Self-activated healing of delamination damage in woven composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 32(5), 683–699. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(00\)00149-4](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(00)00149-4)
- Kessler, Michael R. (2012). Polymer matrix composites: A perspective for a special issue of polymer reviews. *Polymer Reviews*, 52(3–4), 229–233. <https://doi.org/10.1080/15583724.2012.708004>
- Kinloch, A. J., Mohammed, R. D., Taylor, A. C., Eger, C., Sprenger, S., & Egan, D. (2005). The effect of silica nano particles and rubber particles on the toughness of multiphase thermosetting epoxy polymers. *Journal of Materials Science*, 40(18), 5083–5086. <https://doi.org/10.1007/s10853-005-1716-2>
- Kinloch, A. J., & Taylor, A. C. (2006). The mechanical properties and fracture behaviour of epoxy-inorganic micro- and nano-composites. *Journal of Materials Science*,

- 41(11), 3271–3297. <https://doi.org/10.1007/s10853-005-5472-0>
- Kontiza, A., Semitekolos, D., Milickovic, T. K., Pappas, P., Koutroumanis, N., Galiotis, C., & Charitidis, C. A. (2022). Double cantilever beam test and micro-computed tomography as evaluation tools for self-healing of CFRPs loaded with DCPD microcapsules. *Composite Structures*, 279, 114780. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114780>
- Kuang, X., Liu, G., Dong, X., Liu, X., Xu, J., & Wang, D. (2015). Facile fabrication of fast recyclable and multiple self-healing epoxy materials through diels-alder adduct cross-linker. *Journal of Polymer Science, Part A: Polymer Chemistry*, 53(18), 2094–2103. <https://doi.org/10.1002/pola.27655>
- Kuzu, E. (2021). Termoplastik malzemeler için elyaf uyumlaştırma sistemleri ve lif/matris ara yüzey performansının incelenmesi (Yüksek lisans tezi). Erişim Adresi: <https://tez.yok.gov.tr>
- Laha, K., Kyono, J., Kishimoto, S., & Shinya, N. (2005). Beneficial effect of B segregation on creep cavitation in a type 347 austenitic stainless steel. *Scripta Materialia*, 52(7), 675–678. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2004.11.016>
- Lan, P., Nunez, E. E., & Polycarpou, A. A. (2020). Advanced Polymeric Coatings and Their Applications: Green Tribology. *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials, January*, 345–358. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803581-8.11466-3>
- Lee, J., & Yee, A. F. (t.y.). Inorganic particle toughening I: Micro-mechanical deformations in the fracture of glass bead filled epoxies. *Polymer*, 42(2), 577–588.
- Lesovik, V., Fediuk, R., Amran, M., Vatin, N., & Timokhin, R. (2021). Self-healing construction materials: The geomimetic approach. *Sustainability (Switzerland)*, 13(16), 1–11. <https://doi.org/10.3390/su13169033>
- Li, B., Sun, G., Sun, D., Lu, T., Ma, J., & Deng, Y. (2020). Survival and activation behavior of microcapsules in self-healing asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 260, 119719. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119719>
- Li, P., Hao, J., & Wang, X. (2021). Systems Chemistry in Self-Healing Materials. *ChemSystemsChem*, 3(5). <https://doi.org/10.1002/syst.202100016>
- Li, V. C., Lim, Y. M., & Chan, Y. W. (1998). Feasibility study of a passive smart self-healing cementitious composite. *Composites Part B: Engineering*, 29(6), 819–827. [https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(98\)00034-1](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(98)00034-1)
- Li, Z. J., Zhong, J., Liu, M. C., Rong, J. C., Yang, K., Zhou, J. Y., Shen, L., Gao, F., & He, H. F. (2020). Investigation on Self-healing Property of Epoxy Resins Based on Disulfide Dynamic Links. *Chinese Journal of Polymer Science (English Edition)*, 38(9), 932–940. <https://doi.org/10.1007/s10118-020-2406-x>
- Ling, J., Rong, M. Z., & Zhang, M. Q. (2012). Photo-stimulated self-healing polyurethane containing dihydroxyl coumarin derivatives. *Polymer*, 53(13), 2691–2698. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2012.04.016>
- Liu, Chao, Xing, L., Liu, H., Huang, W., Nong, X., & Xu, X. (2021). Experimental on repair performance and complete stress-strain curve of self-healing recycled concrete under uniaxial loading. *Construction and Building Materials*, 285, 122900. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122900>
- Liu, Chengjun, Zhang, Y. X., & Li, J. (2017). Impact responses of sandwich panels with fibre metal laminate skins and aluminium foam core. *Composite Structures*,

- 182(July), 183–190. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.09.015>
- Long, W. J., Gu, Y., Liao, J., & Xing, F. (2017). Sustainable design and ecological evaluation of low binder self-compacting concrete. *Journal of Cleaner Production*, *167*, 317–325. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.192>
- Long, X., Wu, Z., Shao, C., Wang, X., & Wang, Y. (2021). High-temperature oxidation behavior of SiBN fibers in air. *Journal of Advanced Ceramics*, *10*(4), 768–777. <https://doi.org/10.1007/s40145-021-0471-4>
- Luhar, S., Luhar, I., & Shaikh, F. U. A. (2021). Review on performance evaluation of autonomous healing of geopolymer composites. *Infrastructures*, *6*(7), 1–24. <https://doi.org/10.3390/infrastructures6070094>
- Luo, X., Ou, R., Eberly, D. E., Singhal, A., Viratyaporn, W., & Mather, P. T. (2009). A thermoplastic/thermoset blend exhibiting thermal mending and reversible adhesion. *ACS Applied Materials and Interfaces*, *1*(3), 612–620. <https://doi.org/10.1021/am8001605>
- Mahajan, M. S., & Gite, V. V. (2019). Microcapsule-Assisted Smart Coatings. *Applications of Encapsulation and Controlled Release*, 249. Erişim adresi: <https://www.taylorfrancis.com/books/edit/10.1201/9780429299520/applications-encapsulation-controlled-release-munmaya-mishra?refId=851357fa-c2d9-44d2-b019-f4adef96314e&context=ubx>
- Menikheim, S. D., & Lavik, E. B. (2020). Self-healing biomaterials: The next generation is nano. *Wiley Interdisciplinary Reviews Nanomedicine and Nanobiotechnology*, *12*(6). <https://doi.org/10.1002/wnan.1641>
- Mills, N. (2007). *Polymer Foams Handbook: Engineering and Biomechanics Applications and Design Guide* (1st Edition).
- Mills, N. J. (2005). The wet Kelvin model for air flow through open-cell polyurethane foams. *Journal of Materials Science*, *40*(22), 5845–5851. <https://doi.org/10.1007/s10853-005-5018-5>
- Moll, J. L., Jin, H., Mangun, C. L., White, S. R., & Sottos, N. R. (2013). Self-sealing of mechanical damage in a fully cured structural composite. *Composites Science and Technology*, *79*, 15–20. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2013.02.006>
- Montgomery, D. C. (2013). Design and Analysis of Experiments Eighth Edition. Arizona State University. In *Copyright* (Eighth Edi, Vol. 2009, Issue 2005).
- Motuku, M., Vaidya, U. K., & Janowski, G. M. (1999). Parametric studies on self-repairing approaches for resin infused composites subjected to low velocity impact. *Smart Materials and Structures*, *8*, 623.
- Murphy, E. B., & Wudl, F. (2010). The world of smart healable materials. *Progress in Polymer Science (Oxford)*, *35*(1–2), 223–251. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2009.10.006>
- Naous, W., Yu, X. Y., & Zhang, Q. X. (2006). Morphology, tensile properties, and fracture toughness of epoxy/Al₂O₃ nanocomposites. *Journal of Polymer Science Part B Polymer Physics*, *44*(10), 1466–1473. <https://doi.org/10.1002/polb.20800>
- Oehlenschlaeger, K. K., Mueller, J. O., Brandt, J., Hilf, S., Lederer, A., Wilhelm, M., Graf, R., Coote, M. L., Schmidt, F. G., & Barner-Kowollik, C. (2014). Adaptable hetero Diels-Alder networks for fast self-healing under mild conditions. *Advanced Materials*, *26*(21), 3561–3566. <https://doi.org/10.1002/adma.201306258>
- Özer, H. (2015). *Sürekli Cam Elyaf Takviyeli Termoplastik Kompozit Malzemelerin*

- Geliştirilmesi Ve Mekanik Özelliklerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi.*
<https://doi.org/10.1145/3132847.3132886>
- Paksoy, Ö. (2008). *Plastik Enjeksiyon Prosesinde Elyaf Yönlenmesinin İncelenmesi.* (Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi) Erişim adresi:
<https://polen.itu.edu.tr/handle/11527/5073>
- Parsaee, S., Mirabedini, S. M., Farnood, R., & Alizadegan, F. (2020). Development of self-healing coatings based on urea-formaldehyde/polyurethane microcapsules containing epoxy resin. *Journal of Applied Polymer Science*, 137(41), 1–15.
<https://doi.org/10.1002/app.49663>
- Patrick, J. F., Sottos, N. R., & White, S. R. (2012). Microvascular based self-healing polymeric foam. *Polymer*, 53(19), 4231–4240.
<https://doi.org/10.1016/j.polymer.2012.07.021>
- Pengfei Du, Xuanxuan Liu, Zhen Zheng, Xinling Wang, T. J. and Y. Z. (2013). Synthesis and characterization of linear self-healing polyurethane based on thermally reversible Diels–Alder reaction. *RSC Advances*, 35.
- Qian, C., Zheng, T., Zhang, X., & Su, Y. (2021). Application of microbial self-healing concrete: Case study. *Construction and Building Materials*, 290, 123226.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123226>
- Rammal, H., Ghavaminejad, A., Erdem, A., Mbeleck, R., Nematollahi, M., Emir Diltemiz, S., Alem, H., Darabi, M. A., Ertas, Y. N., Caterson, E. J., & Ashammakhi, N. (2021). Advances in biomedical applications of self-healing hydrogels. *Materials Chemistry Frontiers*, 5(12), 4368–4400. <https://doi.org/10.1039/d0qm01099e>
- Reddy, K. R., El-Zein, A., Airey, D. W., Alonso-Marroquin, F., Schubel, P., & Manalo, A. (2020). Self-healing polymers: Synthesis methods and applications. *Nano-Structures and Nano-Objects*, 23, 100500.
<https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2020.100500>
- Richard P. Wool. (2008). Self-Healing Materials: A Review. *Soft Matter*, 3.
- Romero-Sabat, G., Gago-Benedí, E., Roa Rovira, J. J., González-Gálvez, D., Mateo, A., Medel, S., & Tolentino Chivite, A. (2021). Development of a highly efficient extrinsic and autonomous self-healing polymeric system at low and ultra-low temperatures for high-performance applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 145(February).
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106335>
- Rosso, P., Ye, L., Friedrich, K., & Sprenger, S. (2006). A toughened epoxy resin by silica nanoparticle reinforcement. *Journal of Applied Polymer Science*, 100(3), 1849–1855. <https://doi.org/doi.org/10.1002/app.22805>
- Rule, J. D., Brown, E. N., Sottos, N. R., White, S. R., & Moore, J. S. (2005). Wax-protected catalyst microspheres for efficient self-healing materials. *Advanced Materials*, 17(2), 205–208. <https://doi.org/10.1002/adma.200400607>
- Rule, J. D., Sottos, N. R., & White, S. R. (2007). *Effect of microcapsule size on the performance of self-healing polymers.* 48, 3520–3529.
<https://doi.org/10.1016/j.polymer.2007.04.008>
- Santos, C. P., Rato, T. J., & Reis, M. S. (2019). Design of Experiments: A comparison study from the non-expert user’s perspective. *Journal of Chemometrics*, 33(1), 1–18. <https://doi.org/10.1002/cem.3087>
- Sastri, S. B., & Keller, T. M. (1999). Phthalonitrile polymers: Cure behavior and

- properties. *Journal of Polymer Science, Part A: Polymer Chemistry*, 37(13), 2105–2111. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-0518\(19990701\)37:13<2105::AID-POLA25>3.0.CO;2-A](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-0518(19990701)37:13<2105::AID-POLA25>3.0.CO;2-A)
- Sharma, A., Pandey, A., Shukla, D. K., & Pandey, K. N. (2018). Effect of Self-Healing Dicyclopentadiene Microcapsules on Fracture Toughness of Epoxy. *Materials Today: Proceedings*, 5(10), 21256–21262. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.526>
- Silva, L. F. M., Dillard, D. A., Blackman, B., & Adams, R. D. (2012). *Testing Adhesive Joints*.
- Slattery, P. G., McCarthy, C. T., & O’Higgins, R. M. (2016). Development of a novel cyanoacrylate injection repair procedure for composites. *Composite Structures*, 153, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.05.101>
- Smith, W. F., Hashemi, J., & Presuel-Moreno, F. (2019). *Foundations of Materials Science and Engineering Sixth Edition*.
- Souradeep, G. ve. Kua, H. W. (2016). Encapsulation technology and techniques in self-healing concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(12), 1–15.
- Stefanov, T., Ryan, B., Ivanković, A., & Murphy, N. (2016). Mechanical bulk properties and fracture toughness of composite-to-composite joints of an elastomer-toughened ethyl cyanoacrylate adhesive. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 68, 142–155. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2016.03.001>
- Sullins, R. T., Smith, G. W., & Spier, E. E. (1969). *Manual for Structural Stability Analysis of Sandwich Plates and Shells*. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19700004831/downloads/19700004831.pdf>
- Sun, G., Chen, D., Wang, H., Hazell, P. J., & Li, Q. (2018). High-velocity impact behaviour of aluminium honeycomb sandwich panels with different structural configurations. *International Journal of Impact Engineering*, 122(August), 119–136. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2018.08.007>
- Sun, T., Shen, X., Peng, C., Fan, H., Liu, M., & Wu, Z. (2019). A novel strategy for the synthesis of self-healing capsule and its application. *Composites Science and Technology*, 171(September 2018), 13–20. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.12.006>
- Sun, Z., Hu, X., Sun, S., & Chen, H. (2013). Energy-absorption enhancement in carbon-fiber aluminum-foam sandwich structures from short aramid-fiber interfacial reinforcement. *Composites Science and Technology*, 77, 14–21. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2013.01.016>
- Syrett, J. A., Becer, C. R., & Haddleton, D. M. (2010). Self-healing and self-mendable polymers. *Polymer Chemistry*, 1(7), 978–987. <https://doi.org/10.1039/c0py00104j>
- Taşkesen, İ. H. (2020). *Bal peteği sandviç kompozitlerde darbe testi sonrası basma davranışlarının incelenmesi*. (Yüksek lisans tezi, Batman Üniversitesi). Erişim adresi: <http://earsiv.batman.edu.tr/xmlui/handle/20.500.12402/2450>
- Toohey, K. S., Sottos, N. R., Lewis, J. A., Moore, J. S., & White, S. R. (2007). Self-healing materials with microvascular networks. *Nature Materials*, 6(8), 581–585. <https://doi.org/10.1038/nmat1934>
- Tvergaard, V. (1992). Effect of ductile particle debonding during crack bridging in ceramics. *International Journal of Mechanical Sciences*, 34(8), 635–649. [https://doi.org/doi.org/10.1016/0020-7403\(92\)90060-T](https://doi.org/doi.org/10.1016/0020-7403(92)90060-T)

- Ullah, H., Azizli, K. A. M., Man, Z. B., Che Ismail, M. B., & Khan, M. I. (2016). The potential of microencapsulated self-healing materials for microcracks recovery in self-healing composite systems: A review. *Polymer Reviews*, 56(3), 429–485. <https://doi.org/10.1080/15583724.2015.1107098>
- Utrera-barrios, S., Verdejo, R., Lopez-manchado, M. A., & Hernández, M. (2020). Evolution of self-healing elastomers, from extrinsic to combined intrinsic mechanisms: A review. *Materials Horizons*, 7(11), 2882–2902. <https://doi.org/10.1039/D0MH00535E>
- Van Tittelboom, K., & De Belie, N. (2013). Self-healing in cementitious materials-a review. In *Materials* (Vol. 6, Issue 6). <https://doi.org/10.3390/ma6062182>
- Vermeer, C. M., Rossi, E., Tamis, J., Jonkers, H. M., & Kleerebezem, R. (2021). From waste to self-healing concrete: A proof-of-concept of a new application for polyhydroxyalkanoate. *Resources, Conservation and Recycling*, 164(September 2020), 105206. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105206>
- Vintila, I. S., Draghici, S., Petrescu, H. A., Paraschiv, A., Condruz, M. R., Maier, L. R., Bara, A., & Necolau, M. (2021). Evaluation of dispersion methods and mechanical behaviour of glass fibre composites with embedded self-healing systems. *Polymers*, 13(10). <https://doi.org/10.3390/polym13101642>
- Wan, Y. Y., Creber, K., Peppley, B., & Bui, V. T. (2004). Ionic Conductivity and Tensile Properties of Hydroxyethyl and Hydroxypropyl Chitosan Membranes. *Journal of Polymer Science Part B Polymer Physics*, 42(8), 1379–1397. <https://doi.org/10.1002/polb.20007>
- Wang, S., & Urban, M. W. (2020). Self-healing polymers. *Nature Reviews Materials*, 5(8), 562–583. <https://doi.org/10.1038/s41578-020-0202-4>
- Wang, X., Liu, F., Zheng, X., & Sun, J. (2011). Water-enabled self-healing of polyelectrolyte multilayer coatings. *Angewandte Chemie - International Edition*, 50(48), 11378–11381. <https://doi.org/10.1002/anie.201105822>
- Wang, Y., Pham, D. T., & Ji, C. (2015). Self-healing composites: A review. *Cogent Engineering*, 2(1). <https://doi.org/10.1080/23311916.2015.1075686>
- Weiherrmann, W. R. K., Meier, M. M., & Pezzin, S. H. (2019). Microencapsulated amino-functional polydimethylsiloxane as autonomous external self-healing agent for epoxy systems. *Journal of Applied Polymer Science*, 136(23). <https://doi.org/10.1002/app.47627>
- Wen, N., Song, T., Ji, Z., Jiang, D., Wu, Z., Wang, Y., & Guo, Z. (2021). Recent advancements in self-healing materials: Mechanicals, performances and features. *Reactive and Functional Polymers*, 168(June), 105041. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2021.105041>
- White, S. R., Sottos, N. R., Geubelle, P. H., Moore, J. S., Kessler, M. R., Sriram, S. R., Brown, E. N., & Viswanathan, S. (2001). Autonomic healing of polymer composites. *Nature*, 409(6822), 794–797. <https://doi.org/10.1038/35057232>
- Woods, J. (2003). Polycyanoacrylates. *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*, 3. <https://doi.org/10.1002/0471440264.pst256>
- Wu, D. Y., Meure, S., & Solomon, D. (2008). Self-healing polymeric materials: A review of recent developments. *Progress in Polymer Science (Oxford)*, 33(5), 479–522. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2008.02.001>
- Xie, T., & Rousseau, I. A. (2009). Facile tailoring of thermal transition temperatures of

- epoxy shape memory polymers. *Polymer*, 50(8), 1852–1856. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2009.02.035>
- Xing, Y., Yang, S., Lu, S., An, Y., Zhao, E., & Zhai, J. (2021). Energy absorption and optimization of Bi-directional corrugated honeycomb aluminum. *Composites Part B: Engineering*, 219(April), 108914. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108914>
- Xu, Y., & Chen, D. (2016). A Novel Self-Healing Polyurethane Based on Disulfide Bonds. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 217(10), 1191–1196. <https://doi.org/10.1002/macp.201600011>
- Xu, Y., & Chen, D. (2018). Shape memory-assisted self-healing polyurethane inspired by a suture technique. *Journal of Materials Science*, 53(14), 10582–10592. <https://doi.org/10.1007/s10853-018-2346-9>
- Xue, B., Wang, H., Pei, J., Li, R., Zhang, J., & Fan, Z. (2017). Study on self-healing microcapsule containing rejuvenator for asphalt. *Construction and Building Materials*, 135, 641–649. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.165>
- Xue, C., Li, W., Qu, F., Sun, Z., & Shah, S. P. (2020). Self-healing efficiency and crack closure of smart cementitious composite with crystalline admixture and structural polyurethane. *Construction and Building Materials*, 260, 119955. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119955>
- Yamaguchi, M., Ono, S., & Okamoto, K. (2009). Interdiffusion of dangling chains in weak gel and its application to self-repairing material. *Materials Science and Engineering: B*, 162(3), 189–194. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2009.04.006>
- Yan, C. Y., Min, Z. R., Ming, Q. Z., Chen, J., Gui, C. Y., & Xue, M. L. (2008). Self-healing polymeric materials using epoxy/mercaptan as the healant. *Macromolecules*, 41(14), 5197–5202. <https://doi.org/10.1021/ma800028d>
- Yang, H. J., Pei, Y. T., Rao, J. C., & De Hosson, J. T. M. (2012). Self-healing performance of Ti₂AlC ceramic. *Journal of Materials Chemistry*, 17.
- Yang, Y., Lu, X., & Wang, W. (2017). A tough polyurethane elastomer with self-healing ability. *Materials and Design*, 127(3). <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.04.015>
- Yang, Y., U. M. W. (2013). Self-healing polymeric materials. *Chemical Society Reviews*, 42(17), 7446–67. <https://doi.org/doi:10.1039/c3cs60109a>
- Yang, Z., Peng, H., Wang, W., & Liu, T. (2010). Crystallization behavior of poly(ϵ -caprolactone)/layered double hydroxide nanocomposites. *Journal of Applied Polymer Science*, 116(5), 2658–2667. <https://doi.org/10.1002/app>
- Yardımcı, O. (2019). *Development of an equivalent model of aluminum honeycomb sandwich structures subjected to transverse loads*. (Yüksek lisans tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi) Erişim adresi: <https://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12623558/index.pdf>
- Yerleşen, U. (2015). *Sürekli Cam Elyaf Takviyeli Poliamid 6 Levhaların Şekillendirilmesi Ve Karakterizasyonu*. (Yüksek lisans tezi, Marmara Üniversitesi) Erişim adresi: <https://tez.yok.gov.tr>
- Yuan, Y. C. (2008). Self healing in polymers and polymer composites. Concepts, realization and outlook: A review. *Express Polymer Letters*, 2(4), 238–250. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2008.29>
- Zeng, K., Zhou, K., Zhou, S., Hong, H., Zhou, H., Wang, Y., Miao, P., & Yang, G. (2009). Studies on self-promoted cure behaviors of hydroxy-containing phthalonitrile model

- compounds. *European Polymer Journal*, 45(4), 1328–1335. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2008.12.036>
- Zhai, L., Ameya, N., & Ahn, K. (2019). Self-healing polymers with nanomaterials and nanostructures. *Nano Today*, 30(100826). <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2019.100826>
- Zhai, L., Narkar, A., & Ahn, K. (2020). Self-healing polymers with nanomaterials and nanostructures. *Nano Today*, 30, 100826. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2019.100826>
- Zhang, M. Q., & Rong, M. Z. (2011). *Self-Healing Polymers and Polymer Composites*. <https://doi.org/10.1002/9781118082720>
- Zhang, Q., Liu, L., Pan, C., & Li, D. (2018). Review of recent achievements in self-healing conductive materials and their applications. *Journal of Materials Science*, 53(1), 27–46. <https://doi.org/10.1007/s10853-017-1388-8>
- Zhang, S., Kohlbrecher, J., & Langelaan, G. (2013). Defect-induced Au precipitation in Fe-Au and Fe-Au-B-N alloys studied by in situ small-angle neutron scattering. *Acta Materialia*, 61(18), 7009–7019. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.08.015>
- Zhong, N., & Post, W. (2015). Self-repair of structural and functional composites with intrinsically self-healing polymer matrices: A review. *Composites Part A-Applied Science and Manufacturing*, 69, 226–239. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESA.2014.11.028>
- Zhu, D. Y., Rong, M. Z., & Zhang, M. Q. (2015). Self-healing polymeric materials based on microencapsulated healing agents: From design to preparation. *Progress in Polymer Science*, 49–50, 175–220. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2015.07.002>
- Zhu, J., Chen, G. Y., Yu, L., Xu, H., Liu, X., & Sun, J. (2020). Mechanically strong and highly stiff supramolecular polymer composites repairable at ambient conditions. *CCS Chemistry*, 2(4), 280–292. <https://doi.org/10.31635/ccschem.020.201900118>

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Hakkı ÖZER
Doğum Yeri ve Tarihi : Keçiören/Ankara 07/07/1989
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu

Lise : Halide Edip Lisesi, 2007
Lisans : Makine Mühendisliği Bölümü, (2008-2012)
Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
Otomotiv Mühendisliği Ana Bilim Dalı, (2013-2015)

Çalıştığı Kurum ve Yıl : Hidropol Mühendislik 2012 (Temmuz-Eylül)
Uludağ Üniversitesi 2013(Eylül-...)

İletişim (e-posta) : hakkiozer@uludag.edu.tr

Akademik Çalışmalar :

Makaleler,

Özer H., Kuzu E., Özada Ç., Ünal M., Yazıcı M. (2021). The self-healing sandwich panel: Production of epoxy based self-healing capsules, self-healable sandwich panel development, and experimental measurement of self-healing performance. Construction and Building Materials, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125303

Özer H., CanY., Yazıcı M. (2017). Investigation of the Crash Boxes LightWeighting with Syntactic Foams by the Finite Element Analysis. Acta Physica Polonica A, cilt.132, sa.3, ss.734-737.

Özer H., Kurtuluş O., Güçlü H., Taş M., Yazıcı M. (2017). Open-Hole Tensile Experiments of Thermoplastic Composite Laminates and Finite Element Analysis.

International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering (IJCESEN), cilt.3, sa.1, ss.44-46.

Yazıcı M., Özer H., Karen İ., Can Y., Torçuk C. (2016). Mechanical Properties of 2D Cross Ply EGlassFiber Reinforced ThermoplasticLaminated Composite Materials. International JournalofAutomationMechatronics&Robotics (IJAMR). cilt.3, sa.1, ss.56-60,

Projeler,

Seri Üretime ve Araç Güvenlik Kriterlerine Uygun Termoplastik Kompozit Kapı Barı Tasarımı ve Prototip İmalatı. Yürütücü: Murat Yazıcı. Tübitak-TEYDEB 1505, TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikaları Paydaşı ile, 2015-77760. (Araştırmacı).

Kendi Kendine Makro Seviyede İyileşebilir Özelliikli Yeni Hibrit Sandviç Panel Geliştirilmesi ve Statik, Anlık Dinamik ve Şok Yükleri Altında İyileşme Performansının İncelenmesi. Proje Yürütücüsü: Prof. Dr. Murat YAZICI. TÜBİTAK-ARDEB 1001. (Bursiyer)

Hakemli Kongreler,

Yazıcı M., Can Y., Özer H., Güçlü H. (2020). Experimental Investigation Of The Behavior Of Sandwich Panels under Shock Loading. 7th International Conference On Computational and Experimental Science and Engineering (ICCESEN-2020). Antalya, Türkiye.

Ünal M., Özada Ç., Özer H., Aykut Y., Yazıcı M. (2019). Development of Self-Healable Syntactic Foams. 6th International Conference On Computational And Experimental Science And Engineering (ICCESEN-2019). Antalya, Türkiye.

El Khodor M., Alışkın M., Özer H., Ergin F., Yazıcı M. (2019). Sound Insulation Performance of Chemical y Foamed Low-DensityPolyethylene Thermoplastics Materials. Thermophysical and Mechanical Properties of Advanced Materials (THERMAM). İzmir, Türkiye.

Boztoprak Y., Özada Ç., Ünal M., Özer H., Ergin F., Yazıcı M. (2019). Sound Insulation Performance of Honeycomb Core AluminumSandwich Panels with Flexible Epoxy Based Foam Infil. Thermophysical and Mechanical Properties of Advanced Materials (THERMAM). İzmir, Türkiye.

Özer H., Can Y., Yazıcı M. (2016). Production of syntactic foam material and vehicle collisions with elements of syntactic foam material modeling with finite element analysis. International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering (İccesen 2016). Antalya, Türkiye.

Özer H., Kurtuluş O., Taş M., Yazıcı M. (2016). Investigation of Mechanical Properties of Reinforcement Thermoplastic Composite Materials and Finite Element Analysis. International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering (İccesen 2016). Antalya, Türkiye.

Kasım H., Özer H., Yazıcı M. (2016). Rubber Based Syntactic Foamcore Sandwich Panels. International Congress on Naturaland Engineering Sciences (ICNES2016). Skopje, Makedonya.

Özer H., Can Y., Güçlü H., Karen İ., Yazıcı M. (2016). Termoplastik Kompozitmalzeme Ve Sentaktik Köpük Esaslı Sandviç Yapılardan Çok Hafif Tampon Kirişi Ve Darbe Sönümleyici Geliştirilmesi. OTEKON 2016. 8. Otomotiv Teknolojileri Kongresi, Bursa, Türkiye.

Yazıcı M., Özer H., Karen İ., CanY., Somyak C. (2016). Mechanical Properties of 2D Cross Ply E-Glass Fiber Reinforced Thermoplastic Laminated Composite Materials. 4th International Conference on Advances in Civil, Structural and Mechanical Engineering- CSM2016. Birmingham, İngiltere.

Yazıcı M., Özer H., Türkoğlu İ.K., Güçlü H., Karen İ. (2015). Experimental Determination of Mechanical Properties of 2D Cross Ply Glass Reinforced Thermoplastic Laminated Composite Materials and Finite Element Model Validation. International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering (İccesen 2015). Antalya, Türkiye.

Yazıcı M., Karen İ., Türkoğlu İ.K., Özer H., Güçlü H., Somyak C., Torçuk C. (2015). Investigation of the Polymer Composite Side Door Anti-intrusion Bar for a Light Commercial Vehicle. International Congress On Natural And Engineering Sciences (ICNES2015). Bosna-Hersek.

Yazıcı M., Özer H., Can Y., Karen İ., Güçlü H. (2015). Frontal crash simulation of the Composite Car Bumper to Rigid Barriers and Poles. International Congress On Natural And Engineering Sciences (ICNES2015). Bosna-Hersek.

Güler H., Ertan R., Özer H. (2014). 30MnB5 Çelik Malzemenin Kırılma Enerjisi ve Dayanım Değerlerine İşıl İşlem Sıcaklıklarının Etkisi. Otomotiv Teknolojileri Kongresi (2014). Bursa, Türkiye.