

SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK İÇİN MULTİDİSİPLİNER ÇALIŞMALAR

Editor: **Doç. Dr. Adem ÇINARLI**

ARTİKEL AKADEMİ: 196
Life Sciences: 2

Sürdürülebilirlik için Multidisipliner Çalışmalar
Editor: Doç Dr. Adem Çınarlı

HAKEM KURULU:
Prof. Dr. Giuseppe T. CIRELLA
Prof. Dr. Mohammed SHARAF
Prof. Dr. Targan ÜNAL
Doç. Dr. Gökhan ÇAYLI
Dr. Cengiz KAHRAMAN

ISBN 978-605-71210-6-6
Birinci Basım: Aralık - 2021
Ofset Hazırlık: Artikel Akademi

Baskı ve Cilt: Net Kırtasiye Tanıtım ve Matbaa San. Tic. Ltd. Şti.
Gümüşsuyu, İnönü Caddesi & Beytül Malcı Sokak 23/A,
34427 Beyoğlu/İstanbul
Matbaa Sertifika No: 47334

Artikel Akademi bir Karadeniz Kitap Ltd. Şti. markasıdır.

©Karadeniz Kitap - 2021

Tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında
yayımcının yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

KARADENİZ KİTAP LTD. ŞTİ.
Koşuyolu Mah. Mehmet Akfan Sok. No:67/3 Kadıköy-İstanbul
Tel: 0 216 428 06 54 // 0530 076 94 90

Yayıncı Sertifika No: 19708
mail: info@artikelakademi.com
www.artikelakademi.com

SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK İÇİN MULTİDİSİPLİNER ÇALIŞMALAR

Editor: **Doç. Dr. Adem ÇINARLI**

YAZARLAR

Betül ULUPINAR

Emin ÖZDEMİR

Ersin ERTÜRK

Esra MIRMAHMUTOĞULLARI

Furkan GÜNEŞ

Mehmet Emre BURULDAY

Mehmet Enes ONUŞ

Mehmet GÜÇLÜ

Muhammed SALİH

Nureddin KAMADAN

İÇİNDEKİLER

SUNUŞ	7
1. Bölüm	
METALİK BİYOMALZEMELER VE İMPLANT UYGULAMALARI.....	9
- Emin ÖZDEMİR	
2. Bölüm	
FAZ DEĞİŞTİREN MALZEME ENKAPSÜLASYON PROSESİNİN	
GELİŞTİRİLMESİ	31
- Esra MİRMAHMUTOĞULLARI	
- Betül ULUPINAR	
- Muhammed SALİH	
- Mehmet Emre BURULDAY	
3. Bölüm	
KARBON NANOTÜP(KNT) KATKILI KOMPOZİT YAPRAK	
YAYIN STATİK ANALİZİ VE NÜMERİK ANALİZİ	43
- Mehmet GÜÇLÜ	
- Cüneyt FETVACI	
- Yener TAŞKIN	
- Fatih TURAN	
5. Bölüm	
AUTOMED:	
ÇOKLU İLAÇ TAKIBI SAĞLAYAN AKILLI İLAÇ TAKIP OTOMATI	
VE MOBİL UYGULAMASI.....	57
- Ersin ERTÜRK	
- Furkan GÜNEŞ	
- Mehmet Enes ONUŞ	
- Nureddin KAMADAN	

SUNUŞ

Sürdürülebilirlik dediğimizde; üretim ve çeşitliliğin devamlılığının sağlanması yanında yaşamımızın da sürekliliğinin olması yani kendi ihtiyaçlarımızı, gelecek nesillerin ihtiyaçlarından ödün vermeden karşılayabilmemizdir. Aslında ilk akla gelen çevrenin korunması gibi düşünülse de aslında sürdürülebilirlik kavramı çevre bilimle ilgili, ekonomik ve toplumsal boyutları da içine alan bir yaklaşımdır.

Artan nüfus ile birlikte hızlı sanayileşmeden kaynaklanan sorunlara çözüm üretmek amacıyla Birleşmiş Milletler bünyesi altında çalışmakta olan Dünya Çevre ve Kalkınma Komisyonu 1987 yılı içerisinde, ekonomik gelişim ve küreselleşmenin çevre üzerindeki olumsuz sonuçları hakkında bir rapor yayınlamıştır. Bu rapor ile dünya devletlerine ve insanlığı bir uyarı yapılmış olup, raporun geniş kitlelerce benimsenmesinin ve sürdürülebilirliğin hayata geçmesindeki en büyük etken ise 1984 yılında ilk defa tespit edilen Antartika üzerindeki ozon deliği olmuştur. Bu deliğin asıl sebebi ise insanlık ve hızlı bilinçsizce büyüyen sanayi ve çevre ye yaptıkları zararlar olmuştur. Daha sonra insanlığın verdiği zararlar artarak devam etmiş ve küresel iklim dengeleri değişmeye ve kötüleşmeye başlamıştır. Bu tarihten sonra ise sürdürülebilirliğin önemi artmış ve sürdürülebilirlik, çevreye zarar vermeden, toplumları refaha kavuşturacak ekonomik büyümeyi sağlamakla birlikte, sağlık, hayat ve eğitim kalitesinin tüm toplumlar için tatmin edici bir düzeye çıkması için uğraşan bir olgu olmuştur.

Sürdürülebilirlik uzun vadeli bir süreçtir. Gıdadan tarıma, tekstil ve moda-dan teknolojiye, madenden ulaşım ve daha birçok süreç ve sektörde süreklilik gerekliliği doğmuştur. Bu ve benzeri alanlarda ise birçok çalışmalar yapılmış ve yapılmaktadır.

Bunlardan biri ise, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa'nın desteğiyle düzenlenen "**3. Uluslararası Sürdürülebilirlik için Akademik Araştırmalar 2021**" konferansı da sürdürülebilirlikle ilgili çalışmalara katkıda bulunmuştur. Bu kon-

ferans da katılımcılar tarafından sunulan sürdürülebilirlikle ilgili çalışmalar önem arz etmektedir. Bu nedenle kitabın Editörü olarak bu kitapda yayınlanmış çalışmaları sizlere sunmaktan çok mutlu olduğumu belirtmek isterim. Katılımcılar ile birlikte konferansın düzenlenmesinde emeği geçen herkese teşekkür ederim.

Doç. Dr. Adem ÇINARLI
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi Kimya Bölümü
Organik Kimya Anabilim Dalı

1. Bölüm

METALİK BİYOMALZEMELER VE İMLANT UYGULAMALARI

Öğr. Gör. Dr. Emin ÖZDEMİR

*İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa,
Mühendislik Fakültesi, İstanbul / Türkiye*

ÖZET

Biyomedikal implant uygulamalarında uzun yıllardır kullanılan metalik malzemelerin imalat yöntemlerindeki sınırlamalar bu eklemlerin vücut içi servis performansını olumsuz etkilemektedirler. Bozulan implantların revizyonu için her yıl çok sayıda karmaşık ve maliyetli operasyon gerçekleştirilmektedir. İmplant uygulamalarında malzeme yüzeyi; korozyon, oksitlenme, yıpranma ve yorulma gibi yüzeyde başlayan çeşitli malzeme degradasyonlarına neden olan harici uyarılara maruz kalır. Genel olarak implant imalatında kullanılan; östenitik paslanmaz çelik alaşımları, CoCr alaşımları, Ti ve Ti alaşımları ve NiTi alaşımları gibi metalik biyomalzemeler, yeterli biyoyumluluk ve yüksek mukavemet özelliklerine karşın, vücut içinde zamanla iyon salınımı problemiyle karşı karşıyadırlar. Metalik implantlarda oluşan aşınma, korozyon ve yorulma kaynaklı hasarlar genelde imal edilen parçaların yüzeylerinde başlarlar. Üretilen implantların yüzey kalitesi onların servis performansı açısından kritik öneme sahiptir. Biyomedikal implantlarda beklentiler daha çok malzeme yüzeyi ile ilgili olduğundan, bir implantın güvenilirliği büyük ölçüde yüzey katmanındaki fiziksel durumuna bağlıdır. Bu sebeple metalik implantların biyoyumluluklarının ve fonksiyonel performanslarının geliştirilmesi için imalat aşamasında yüzey işlemleri anahtar rol oynamaktadır. Diğer yandan ek yüzey işlemlerinin getirdiği maliyetlerden kaçınmak için APD (Aşırı Plastik Deformasyon) yöntemleri ile implant malzemesinde oluşturulan arzu edilen yüzey bütünlüğü özellikleri ile implantların korozyon ve aşınma

direncinin ve dolayısı ile fonksiyonel performansı yükseltilebileceği anlaşılmıştır. Bu bölümde, biyomedikal implant uygulamalarında kullanılan metalik malzemeler, biyouyumlulukları, uygulama alanları ve vücut içi uygulamalarda karşılaşılan problemler nedenleri ile birlikte incelenmiş, implantların servis performansının geliştirilmesine ilişkin önerilere yer verilmiştir.

Anahtar kelimeler: Biyomedikal implant, metalik biyomalzeme, biyouyumluluk,

METALLIC BIOMATERIALS AND IMPLANT APPLICATIONS

ABSTRACT:

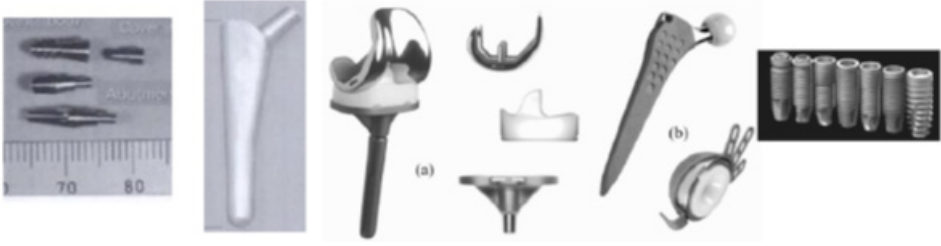
The limitations in the manufacturing methods of metallic materials that have been used in biomedical implant applications for many years negatively affect the in-body service performance of these joints. Many complex and costly operations are performed every year for the revision of failing implants. Material surface in implant applications; It is exposed to external stimuli such as corrosion, oxidation, wear and fatigue that cause various material degradation that starts on the surface. Generally used in implant manufacturing; metallic biomaterials such as austenitic stainless steel alloys, Ti and Ti alloys, CoCr alloys and NiTi alloys are faced with the problem of ion release in the body over time, despite their sufficient biocompatibility and high strength properties. Damages caused by abrasion, corrosion and fatigue that occur in metallic implants generally start on the surfaces of manufactured parts. The surface quality of the manufactured implants is critical to their service performance. Since expectations in biomedical implants are more related to the material surface, the reliability of an implant depends largely on its physical condition in the surface layer. For this reason, surface treatments play a key role in the manufacturing phase to improve the biocompatibility and functional performance of metallic implants. On the other hand, in order to avoid the costs of additional surface treatments, it has been understood that the desired surface integrity properties created in the implant material with SPD (Several Plastic Deformation) methods can increase the corrosion and wear resistance and thus functional performance of the implants. In this section, the metallic materials used in biomedical implant applications, their biocompatibility, application areas and the problems encountered in intra-body applications are examined together with the reasons, and recommendations for improving the service performance of the implants are given.

Key words: Biomedical implant, metallic biomaterial, biocompatibility

GİRİŞ

İnsan vücudunda işlevini yitiren herhangi bir organın yerine takılarak onun görevini yerine getiren ve canlı doku ile doğrudan temas halinde bulunan yapay malzemelere protez veya implant denir. Vücut içine monte edilen implant malzemelerinin hiçbirinin insan kemiğinin yerini tutamayacağı bir gerçektir. Vücut da kullanıldıkları bölgeye göre implant malzemeleri; hafiflik, tokluk, aşınma direnci, korozyon dayanımı, gerilme durumu, yorulma ömrü, biyouyumluluk, sert veya süngerimsi doku, manyetik özelliği, ısı iletkenliği ve imalat özellikleri göre, TSE, DIN ve ASTM standartlarına uygun biçimde hazırlanırlar (Şap ve Çelik, 2012).

Medikal implant uygulamalarında metal malzeme kullanımı uzun bir geçmişe sahiptir (Klocke, 2001, Yalçın ve Temiz, 2012). Vücut içindeki dokulara nazaran oldukça sert olmaları, yoğunluklarının yüksek olaması, korozyona uğramaları ve alerjik doku reaksiyonlarına sebep olan metal iyonu salınımı gibi dezavantajlarına rağmen, kuvvetli metalik bağlar ve kristal yapıları sebebiyle üstün mekanik özellikler gösteren; altın, paslanmaz çelikler, titanyum ve titanyum alaşımları, kobalt ve kobalt-krom alaşımları gibi metallerin ve metal alaşımlarının implant malzemesi olarak kullanım oranı yüksektir (Bronzino vd., 2000). Metalik malzemelerden; genelde kırık kemiklerin birleştirilmesinde, plaka, çivi ve vida olarak kullanılmalarının yanında kalça kemiği ve diz kapağı protezleri olarak ortopedide faydalanılırken, diş protezi ve dolgu malzemesi olarak dişçilikte yararlanılır (Şap ve Çelik, 2012, Sarsılmaz, 2003). Bununla birlikte imalat yöntemlerindeki sınırlamalar implantların performansını olumsuz etkiler. Anatomik benzerlik nedeniyle eklem implantları ve kemik plakalarının milyonlarca genellikle seri olarak üretilmektedirler. Şekil 1’de gösterilen; vida, diz kapağı ve kalça (femur başı) implantları ile ortopedik medikal cihazlar gibi karmaşık şekilli parçaların imalatı için; döküm, dövme, toz metalürjisi ve toz enjeksiyon kalıplama tekniklerinin akabinde, tornalama, frezeleme ve taşlama gibi talaşlı imalat yöntemlerinin kullanıldığı rapor edilmiştir (Klocke, 2001, Yalçın ve Temiz, 2012).



Şekil 1. Çeşitli imalat yöntemleri ile üretilen metalik implant örnekleri

Şekil 1’de görünen kalça ve diz implantlarının çoğu, dövülerek ya da dökülerek hazırlanan ön şekillendirilmiş parçaların CNC tezgâhlarda işlenmesi ile ya da doğrudan toz metalürjisi teknikleri ile yapılmaktadır (Long ve Rack, 1998, Gibson, 2005).

BİYOMALZEME VE BİYOUYUMLULUK

İnsan vücudundaki dokuların ve organların bazılarının görevlerini yerine getirememeleri durumunda, yerlerine yapay malzemeler geliştirilip kullanılmaya başlanmıştır. Tedavi ve onarım amacı ile, harici veya dâhili, devamlı veya geçici olarak vücuda monte edilen malzemelere implant malzemesi veya biyomalzeme denir (Pekşen ve Doğan, 2011).

Biyomalzemeler, insan vücudundaki dokuların veya organların görevlerini yerine getirmeleri ya da onları desteklemeleri için kullanılmakta olup, sürekli veya periyodik olarak vücut sıvısı ile temasta bulunurlar. Biyomalzemenin en önemli özelliği olan biyoyoumluluk, vücut tarafından kabul edilebilirlik şeklinde tanımlanabilir. Biyomalzemenin, kendisini çevreleyen dokuların normal değişimine engel olmaması ve dokuda, pıhtı oluşumu, iltihaplanma vb. istenmeyen reaksiyonlara neden olmaması gerekir (Bronzino vd., 2000). Genelde metal implantların biyoyoumluluğu, vücut içerisindeki (invivo) korozyon davranışına bağlıdır (Şap ve Çelik, 2012).

Vücut içine monte edilen implant malzemeleri, doğal bir vücut elemanının yerine geçeceği için vücut ile biyolojik uyumlu yani biyoyoumlu olmalıdır. Biyomedikal uygulamalarında birincil husus implantların yüksek biyoyoumluluğa

sahip olmalarıdır. Vücut içinde (in vivo) üstün korozyon dayanımına sahip olmaları ve herhangi bir katkı maddesine ihtiyaç duyulmadan (kalsiyum fosfat kristalleri, hücreler, proteinler ve kollajen gibi kemik bileşenlerinin oksite bağlanması sayesinde) kemikle hızlı bir şekilde bütünleşerek (osseointegrasyon) kalıcı bir bağlanma sağlanmalıdır (Havıçoğlu, 2011). Osseointegrasyon, implant ve canlı kemik arasındaki direkt fonksiyonel ve yapısal birleşme olarak tanımlanır.

İdeal yapıdaki bir implantın yumuşak dokulardan etkilenmemesi, yapısını ve devamlılığını koruyabilmesi, kimyasal olarak inert (aktif olmayan) olması, sterilize edilebilmesi, karsinojenik (kansere yapıcı) olmaması ve kimyasal olarak inert (aktif olmayan) olmasının yanında, enflamasyona, yabancı cisim reaksiyonuna, alerjiye ve hipersensitiviteye sebep olmaması arzu edilirken, kolay şekillendirilebilmesi ve gerekli mekanik özelliklere sahip olması gerekir (Pekşen ve Doğan, 2011, Park ve Bronzino, 2003, Altıntaş, 1994). Fakat insan organizmasına uygun tamamen inert bir malzeme maalesef yoktur. Bütün biyomedikal implantlar; vücuda uygulandığında farklı derecelerde bir bağışıklık cevabına-tepkisine yol açarlar. İmplant malzemesinin vücutta meydana getirdiği etkiye yanıt olarak oluşan doku cevabı, onun ne kadar biyouyumlu (biyolojik uyumlu) olduğunu belirtir (Akdoğan ve Güney, 2010, Korkusuz ve Korkusuz, 200).

Malzemenin kimyasal yapısının yanı sıra ara yüzeydeki nanometre boyutta proteinlerin ve mikron boyutta hücrelerin tutunmasını etkileyen diğer fizikokimyasal özelliklerin de (topografi, yüzey kimyası, elastikiyet, pürüzlülük, hidrofilik (bir molekülün hidrojen bağları kurarak suya bağlanabilmesi), yük vb.) dikkate alınması gerekmektedir. Beklentiler daha çok malzeme yüzeyi ile ilgili olduğundan, biyomalzemelerin yüzey modifikasyonları büyük önem taşımaktadır (Bronzino vd., 2000, Gümüş vd., 2012, Vladko, 2010).

METALİK İMPLANT UYGULAMALARI

Günümüzde dünya genelinde milyonlarca kemik plağı ve metal ortopedik eklem implantı (diz, kalça vb.) ameliyatları yapılmaktadır. Bunu rakamsal olarak ifade edecek olursak sadece Amerika Birleşik Devletleri'nde yılda 300000'den fazla kalça implantı ameliyatı yapılmaktadır (Long ve Rack, 1998, Gibson, 2005).

Tablo 1. İmplant örnekleri ve kullanılan metal tipi (Hermawan vd., 2011)

Bölüm	İmplant Örnekleri	İmplant Malzemesi
Kardiyovasküler	Stent, Yapay kapakçık	316L; CoCrMo; Ti; Ti6Al4V
Ortopedik	Kemik tespiti (plaka, vida, pim), Yapay eklemler	316L; Ti; Ti6Al4V; CoCrMo; Ti64; Ti6Al7Nb
Diş hekimliği	Ortodontik tel Dolgu	316L; CoCrMo; TiNi; TiMo AgSn(Cu) amalgam, Au
Kraniyofasiyal (baş ve yüz)	Plaka ve vida	316L; CoCrMo; Ti; Ti64
Otorhinoloji (KBB)	Yapay kulak zarı	316L

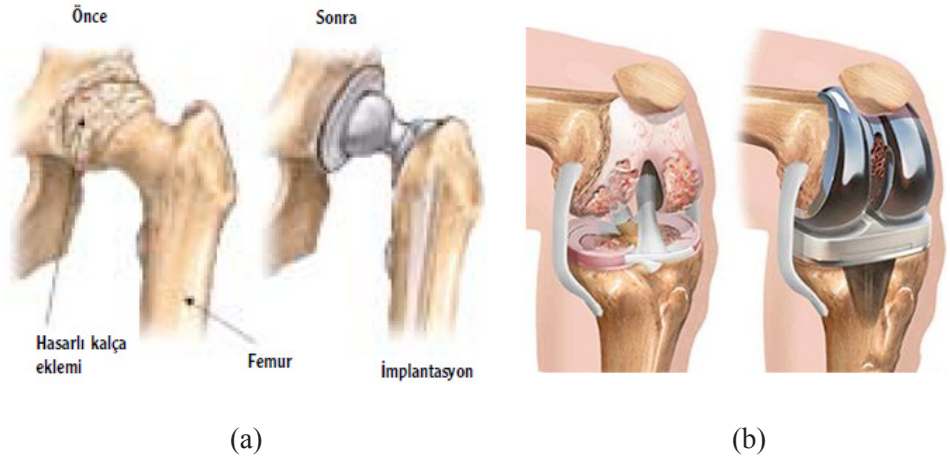
Bir implantın, malzemesi, mekanik mukavemeti, yorulma mukavemeti, tasarımı ve biyouyumluluğu başta olmak üzere birçok özelliği vücut içinde kullanımını etkiler. Vücut içindeki biyolojik ortamda özelliğini kaybetmeden işlevini ve devamlılığını sürdürebilmesi en önemli malzeme özelliğidir (Pekşen ve Doğan, 2011). Biyomedikal malzeme olarak kullanılacak metalin türü özellikle implant uygulamasına bağlıdır. Ti ve alaşımları, 316L paslanmaz çelik alaşımları, CoCrMo alaşımları, NiTi alaşımları gibi metalik biyomalzemeler, eklem protezi ve kemik yenileme malzemesi gibi ortopedik uygulamalarda kullanılan implantların imalatında, diş implantı imalatında, yüz ve çene cerrahisinde, kalp ve damar cerrahisinde kullanılan yapay kalp parçalarının imalatında, kateter, vana ve kalp kapakçıklarının imalatlarının yanında teşhis ve tedavi için kullanılan biyomedikal cihaz imalatında kullanılmaktadırlar (Bronzino vd., 2000, Pasinli, 2004). Tablo 1'de çeşitli implantlar ve üretildikleri metaller görülmektedir. Tablo 1'den anlaşılacağı üzere; 316L, Ti64, CoCrMo alaşımları, kardiyovaskü-

ler alandan otorhinoloji (KBB) alanına kadar tüm implant uygulamalarında hala en çok tercih edilen metalik implant malzemeleridir (Hermawan vd., 2011).



Şekil 2. *Kırık sabitlemesinde kullanılan çeşitli metal plakalar ve vidalar*

Şekil 2 ve Şekil 3’ de bazı vücut içi medikal implant uygulamaları ve örnekleri görünen; 316L, Ti64 ve CoCrMo alaşımları, genel olarak iskelet sistemi, eklemler ve kırık kemiklerin tespiti için ortopedik implantlarda (plaka, travma çivisi, tel, kemik pimleri, sonda, tel zımba), nörolojik uygulamalarda, kromatografi kolonları ve cerrahi alet yapımında kullanılırlar (Bronzino vd., 2000, Pasinli, 2004).



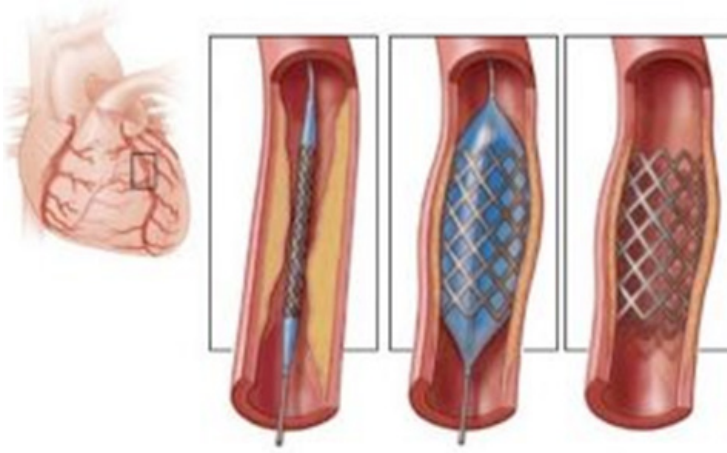
Şekil 3. *a) Hasarlı kalça eklemi ve implant uygulaması, b) hasarlı diz eklemi ve implant uygulaması*

Diş çekimi en sık gerçekleştirilen cerrahi işlem olduğundan diş hekimliği, 316L ve Ti64 alaşımlarından yapılan implantların kullanıldığı alanlardan birisidir (Şekil 4). Ayrıca ortodontik tedavilerde paslanmaz çelik alaşımları (316L) tel olarak kullanılabilir (Köse, 2016).



Şekil 4. *Diş implantının yerleştirilmesi: a) Diş kökü görevi gören implant geçici vidasının çene kemiğine tespiti. Bu işlem lokal anestezi altında bir saatten daha az sürede gerçekleştirilir, b) İyileşme süreci yaklaşık on haftadır, c) Geçici vida çıkartılır, d) Daimi vida yerleştirilir, e) Vidanın üzerine kron yapıştırılır (Köse, 2016)*

Görüldüğü üzere metalik biyomalzemeler çoğunlukla hasarlı olan sert dokuyu değiştirmek için kullanılır. Bununla birlikte, metalik biyomalzemelerin yumuşak doku onarımında kullanılması içinde vakalar vardır. Temsili vakalar stent olarak bilinen vasküler destek yapılarıdır (Niinomi, 2002). Hastalıkların, sakatlıkların ve dünya çapındaki ölümlerin başlıca sebebi hala koroner arter hastalığıdır. Kardiyovasküler stentler kullanılarak koroner aterosklerotik damar darlığı (damar sertliği) veya vazokonstriksiyon (damar büzülmesi-kasılması) (arter duvarlarındaki yağ veya kalsiyum birikintileri damarda sertleşmeye ve kalınlaşmaya sebep olur) tedavisi için intravasküler endoprotetik teknikler geliştirilmiştir. Metalik koroner stentler, koroner arterleri açık tutan tel ağlardır ve damar tıkanıklığını gidermek için endovasküler iskele görevi görürler. Hastalıklı koroner arter üzerinde sürekli bir radyal basınç uygularlar ve aterosklerotik plak sıkışması (arter duvarında yağ veya diğer maddelerin birikmesi), diseksiyonların kapatılması ve koroner damarın genişlemesi ile sonuçlanırlar (Raval vd., 2004).



Şekil 5. *Tipik koroner stent ve balon uygulaması*

Geometrisi Şekil 5’de gösterilen stent, plakların kısmen veya tamamen önlen- diği sağlıklı kan akışını sağlamak için hastalıklı damarlara yerleştirilir. Stentler iki tipte gruplandırılmıştır. Balon genişletilebilir ve kendiliğinden genişletilebilir olanlardır. Stent yapılar için 316L paslanmaz çelik, CoCr alaşımları, Nitinol, Ti alaşımları kullanılmaktadır (Niinomi, 2002).

VÜCUT İÇİ İMPLANT UYGULAMALARINDA KARŞILAŞILAN PROBLEMLER

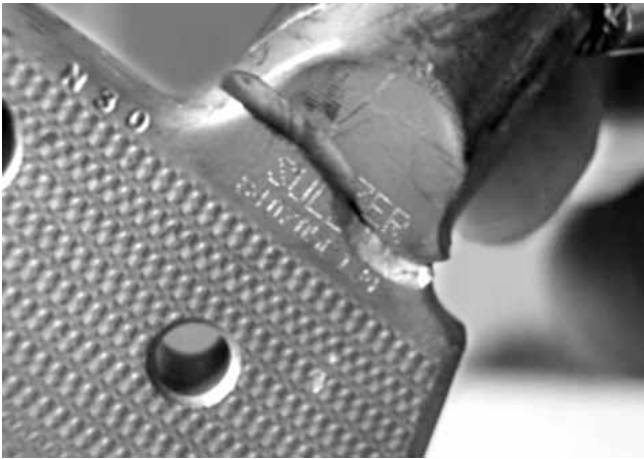
Vücut içine takılacak implantlar, yüksek kimyasal dayanımlarının yanında, monte edilecekleri bölge ile mekanik uyumları için gereken fiziksel şartları sağ- lanmalıdırlar. Bir implantın esas birincil özelliği; vücut içi biyolojik ortamda, sa- hip olduğu fiziksel ve kimyasal özellikleri bozulmadan, işlevini ve devamlılığını sürdürülebilmesidir. Vücut içinde çalışan implantlar, biyolojik ve mekanik olmak üzere iki tip hasara uğrarlar (Pekşen ve Doğan, 2011). İlk zamanlar ani bir tepki ile karşılaşılmasına rağmen, ilerleyen zamanlarda implant aşınmasından kaynaklı partiküllerin difüzyonu sonucu çevre dokuların göstermiş oldukları tepki sonucu alerjik reaksiyonlar ve iltihaplanmalar ortaya çıkmaktadır (Akdoğan ve Güney, 2010). Nüfus yaşlandıkça bu durum daha büyük önem taşımaktadır. İmplantın vücutta montajından belli bir süre sonra zayıf adhezyon aşınma dayanımı, iyon

sızıntısı ve korozyon nedeniyle implant gevşemesi, biyolojik ortamdaki implantların başarısızlığa uğramasının nedenlerinden bazılarıdır (Heisel vd., 2003). Özellikle eklem implantlarından vücut içine salınan metal iyonları, implantın yabancı cisim olarak algılanmasına ve vücut tarafından kabul edilmemesine neden olmaktadır. Neticede implant gevşemesi vuku bulan hastaların %64'ünde, problemin metal alerjisinden kaynaklandığı tespit edilmiştir (Köse, 2016).

Tablo 2. Ortopedik implantların genel sorunları (Pekşen ve Doğan, 2011)

İmplant Sorunları	Dokusal Sorunlar
Korozyon	Metal alerjisi
Yorulma	Enfeksiyon
Kırılma	Fibroz doku oluşumu
Mekanik uyumsuzluk	Ağrı
Plastik deformasyon	Kemik erimesi
Yük-gerilme kalkanı	Ara yüz ayrışması
Yüzey aşınması	

Ortopedik implantlarda karşılaşılan genel problemler Tablo 2'de sunulmuştur. İmplant bozunumu, kullanıldığı bölgeye ve hareketine göre değişiklik gösterir. Şekil 6'da ise mekanik olarak bozunuma uğramış implant örneği görülmektedir. İmplantlardaki bozunum mekanizmaları; mekanik, elektrokimyasal, fizikokimyasal ve biyokimyasal reaksiyonlar olarak sınıflandırılabilir (Tablo 3). Sıralanan mekanizmalar içinde en fazla metal korozyonu görülmektedir (Pekşen ve Doğan, 2011).

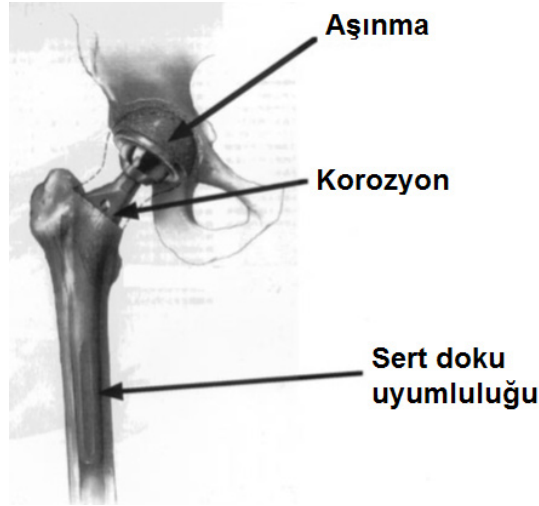


Şekil 6. Mekanik olarak hasara uğramış bir implant (Pekşen ve Doğan, 2011)

Metalik biyomalzemelerin yüzeyinde meydana gelen problemler en iyi aşağıdaki yapay kalça eklemi (Şekil 7) ve kemik plakası (Şekil 8) örneklerinde görülebilir. Metaller klinik kullanımda sert doku ile değiştirilir. Bununla birlikte, yapay eklemlerde metalik iyon salınımı ve aşınma artıkları, güvenli uygulama için çözülmesi gereken ciddi problemlerdir (Hanawa, 1999).

Tablo 3. Biyomalzemelerin bozunumuna yol açan mekanizmalar (Pekşen ve Doğan, 2011)

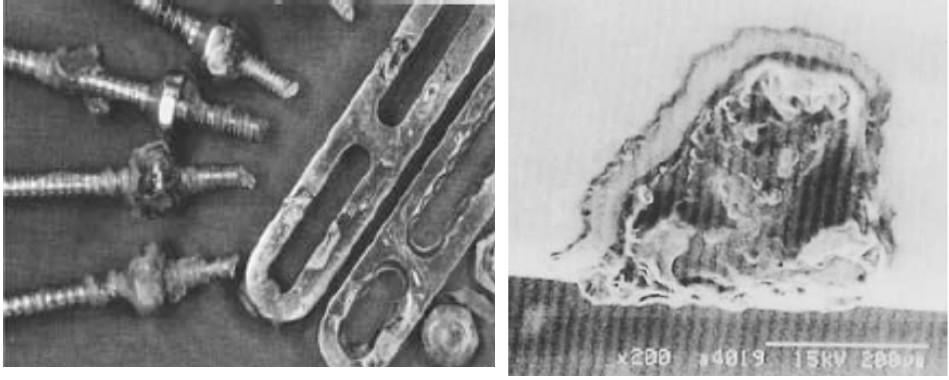
Bozunum Mekanizmaları	Görülen Hasar Tipleri
Mekanik	Gerilme, sürünme, aşınma, kırılma
Elektrokimyasal	Korozyon
Biyokimyasal/kimyasal reaksiyonlar	Amine, ester bağlarının hidrolizi, mineral çökmesi, fibroz doku oluşumu, oksidasyon, redüksiyon
Fizikokimyasal	



Şekil 7. Yapay kalça eklemi metal aksamında muhtemel problemler (Hanawa, 1999)

Ortopedik cerrahinin bazı alanlarında kemik kırıklarının onarımı yapılmaktadır (Garrett vd., 2006). Kırık kemiklerin geçici tespiti için plaka ve vida gibi kemik tespit implantları yaygın olarak kullanılmaktadır (Şekil 8 (a)) (Mohanty vd., 2003). İmplantın kemik dokusuna uygulanması ile erken dönemde gözlenen lokal etkilerin yanında geç dönemde gözlenecek lokal etkilerde olacaktır. Vücutta implant malzemesine karşı oluşacak uzun dönem cevaplardan birisi de adaptif kemiğin yeniden şekillenmesidir. Bu durum kemiğin bulunduğu ortamdaki mekanik yük paylaşımındaki değişim sonucu, kemiğin kitlesinde ve geometrisinde meydana gelebilecek değişimdir. Bir kemiğe uygulanan implantın, ilgili kemiğin mekanik ortamını değiştirmesi sonucu kemiğe etki eden yükleri azaltması, stres kalkını etkisi olarak adlandırılır. Bu durum, implant çevresinde vuku bulan kemik doku kaybı gelişimi açısından çok önemlidir. Özellikle kemik ile uygulanan implantın sertlik değerleri arasındaki fark yükseldikçe geometrik bozulma meydana gelir (Köse, 2016).

Metalik implantlar; vücut içindeki dokulara nazaran yüksek sertlikleri ve yoğunlukları, korozyona uğramaları ve dokularda alerjik reaksiyonlar doğurabilecek metal iyonu, partikül salınımı vb. olumsuzluklara sahiptirler. Ayrıca kemik iyileşmesinden sonra ortaya çıkabilecek olumsuz etkileri önlemek için tespit implantlarının müteakip cerrahi operasyon ile çıkarılması gerekmektedir. Örneğin Şekil 8 (a)'da görüldüğü üzere, altı yıllık kullanımdan sonra hastadan çıkarılan 316L paslanmaz çelik omurga tespit aparatı parçaları gri çelik renginde iken metal plakalarda çok sayıda renksiz alan olduğu bildirilmiştir. Aparata ait parçaların kenarlarının bozulmuş ve birçok parçanın koyu kahverengi yumuşak dokusu ile kaplandığı belirtilmiştir. Plakalardaki renksiz bölgeleri çevreleyen dokuda gri homojen malzeme parçaları ve enflamatuar (ateşli, iltihaplı) tepki kaydedilmiştir. Şekil 8 (b)'de görünen taramalı elektron mikroskopu (SEM) fotoğrafı; aparat bileşenleri etrafındaki renksiz bölgelerde büyük korozyon çukurlarının oluştuğunu göstermektedir (Mohanty vd., 2003).



(a)

(b)

Şekil 8. a) İnsan vücudunda altı yıl bir kullanımdan sonra çıkarılan AISI 316L paslanmaz çelik omurga tespit aparatı bileşenleri, b) plakalardaki korozyonu gösteren renksiz alanların SEM fotoğrafı (Mohanty vd., 2003)

Ortopedik implantlar, insan vücudunda buldukları bölgeye göre zaman zaman farklı kuvvet ve etkilere maruz kalmaktadır. Örneğin günlük aktiviteler esnasında yük taşıyan kemiklere 4 MPa değerinde bir gerilme etki ederken, tendonlar kemiklerin çok çok üzerinde 40–80 MPa aralığında gerilme değerlerine maruz kalırlar. Bir kalça eklemine günlük aktivitelerde maruz kaldığı ortalama yük, insan vücudunun 3 katı ağırlığına kadar yükselebilirken, zıplama vb. aktiviteler esnasında bu yük vücudun 10 katı ağırlığına kadar artabilir. Oturma, ayakta durma, koşma vb. günlük aktiviteler esnasında bahsi geçen bu yüklere gün boyunca tekrarlı bir şekilde maruz kalınır. Bu tekrarlı yükler, implantların yorulmasına, çatlamasına veya plastik deformasyona uğrayarak, hasar görmelerine sebep olurlar (Gümüşderelioğlu, 2002).

Yürüme sırasında üst bacakta femur kemiği ile kalça kemiğinin birleşmesini sağlayan femur başına ortalama 80 kg olan insan vücudu ağırlığının 3,5 katı kadar yük geldiği deneysel metotlarla ölçülerek belirlenmiştir. Bu yüzden kalça protezinin, bu yükleri dayanıklılıkla karşılayabilmesi gerekmektedir. Diğer yandan bu implantların eklem yerlerindeki hareketliliğin neden olduğu sürtünme sonucu meydana gelen aşınmaya karşı dayanıklı olmaları gerekmektedir. Bu yüzden kalça protezlerinde; paslanmaz çelik, titanyum ve alaşımları, Co-Cr-Mo alaşımları, polimetilmetakrilat, yüksek yoğunluklu polietilen ve Al_2O_3 tipi seramik malzemeler birlikte kullanılmaktadır (Güven, 2010).

Ayrıca farklı metal alaşımlarının ortopedik uygulamalarda birlikte kullanılması ile farklı potansiyele sahip malzeme yüzeylerinin birbirine temasından dolayı elektrolit görevi gören vücut sıvısı içinde galvanik pil oluşumu dikkat edilmesi gereken bir husustur. Kobalt veya titanyum alaşımından yapılmış femur parçasına paslanmaz çelik tel temas ederse meydana gelen galvanik pil sonucu korozyon oluşmaya başlar (Güven, 2014).



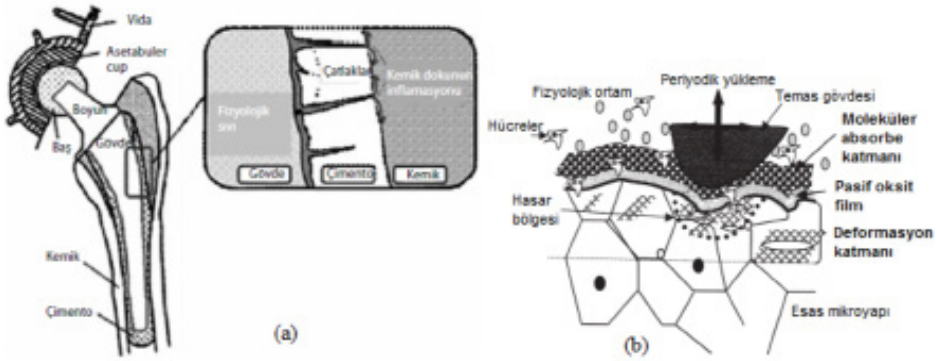
Şekil 9. İmplant çevresinde osteoliz (kemik yıkımı) (Köse, 2016)

Vücut içinde işlevini yitiren kemik veya eklem yerine iskelete monte edilen implant malzemesi mevcut kemik dokusu tarafından kabul edilmeyip, kemik ile bütünleşmez ise implant çevresinde fibroz bir doku oluşur. Sonuç olarak, kemiğe mekanik şekilde tutunamayan implant fizyolojik etkilere maruz bir şekilde altında hareket edecektir. Eklem yüzeylerinde veya eklem özelliği kazanamayan yüzeylerde meydana gelen bu hareketler, implant yüzeylerinde oluşan aşınma nedeniyle çevreye çok küçük partiküllerin yayılmasına sebep olurlar.

İmplanttan vücuda yayılan bu partiküller, özellikle yabancı maddeleri yutucu hücreler olan makrofajlar başta olmak üzere çevredeki dokularda birikmeye başlarlar. İmplant çevresindeki dokularda biriken bu partiküller, hücresel ve biyokimyasal reaksiyonları tetikleyerek, implant çevresinde kemik yıkımına ne-

den olan osteolizin (kemik erimesi) başlamasına sebep olurlar. Osteoliz (kemik erimesi), implantın tüm çevresinde görülebileceği gibi, bölgesel olarak implant çevresindeki bazı alanlarda da görülebilir (Şekil 9). Zamanla çürüten dokunun kemiğin mukavemetini zayıflatması sonucu implant çevresinde ilerleyen olgular da patolojik kırıklar meydana gelebilir (Köse, 2016).

Kuvvet etkisi altında elastik deformasyona maruz kalan implant yüzeylerinde zamanla oluşan çatlaklar, süreç içinde periyodik yüklerin etkisi ile ilerleyip birleşerek kırıkları oluştururlar. Yüzeyle gelişen bu çatlaklar bir müddet sonra implant yüzeyinden parçacık kopmasına neden olurlar. Kemik kırıklarının birbirine birleştirilmesinde kullanılan implantlarda sık sık karşılaşılan bu aşınma türüne “yorulma aşınması” denir. Özellikle eklemlerde, sürtünen implant yüzeyleri arasında bulunan vücut sıvısı, oluşan çatlakların içine girerek dinamik kuvvetlerin çatlak içlerine doğru kolayca iletilmesine ve çatlak ilerleyişinin daha da hızlanmasına sebep olur (Şekil 10) (Pekşen ve Doğan, 2011, Geringer vd., 2006). Ayrıca mikro organizmalar metallerde korozyonu artırarak mikro biyolojik korozyona neden olurlar (Pekşen ve Doğan, 2011).

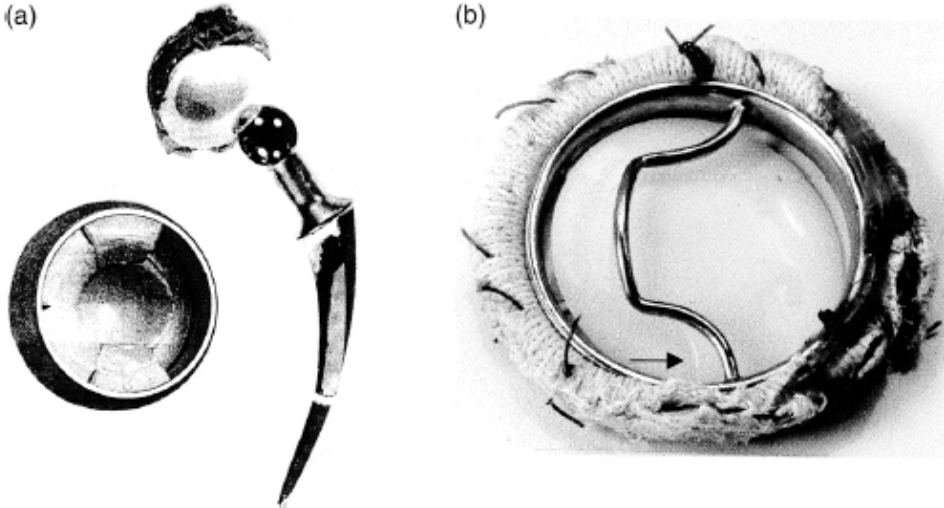


Şekil 10. a) Kalça implantında oluşan sürtünme korozyonunun şematik gösterimi (Pekşen ve Doğan, 2011, b) malzemenin yüzeyi ile fizyolojik çevre arasındaki karmaşık etkileşimleri gösteren, deforme olmuş bir metalik biyomalzeme yüzeyinin enine kesitinin şematik gösterimi (Teoh, 2000)

Biyomalzemelerdeki yorulma hasarını anlamak için, malzemelerin yüzey altı yapısı hakkında bilgi sahibi olmak gerekir. Şekil 10 (b), fizyolojik bir ortamda de-

forme olmuş bir metalik biyomalzeme yüzeyin enine kesitinin şematik bir resmini gösterir. Resimde gösterilen üç katman; moleküler absorbe katmanı, pasif oksit film ve deforme olmuş katmandır. Bu katmanların yorulma-aşınma sürecinde fizyolojik çevre ile nasıl etkileşime girdiği, biyomalzemenin davranışı ve medikal implantın uzun süreli yorulma performansı için büyük önem taşımaktadır.

Yorulma kırılması ve aşınması, implant gevşemesi, stres kalkanı ve nihai implant yetmezliği ile ilişkili ana sorunlardan biri olarak tanımlanmıştır. Aşınma yaygın olarak diz ve kalça eklemi protezleri gibi ortopedik uygulamalarda bildirilmesine rağmen, mekanik kalp kapakçıklarında ciddi ve çoğu zaman ölümcül bir deneyimdir. Şekil 11, kalça protezinde ve mekanik bir kalp kapakçığında implant yorulma kırılması örneklerini göstermektedir. Resimden yorulma-aşınma etkileşiminin, tıbbi cihazların nihai başarısızlığında önemli bir rol oynadığı açıkça görülmektedir. Döküm kobalt-krom kalça kemiği sapı, alt kısmından yorulma sonucu kırılmıştır. Eğik kalp kapakçığı diskinin poliasetal tıkaçı, üst metal gergi teli ile yapılan tekrarlayan darbe boşaltma hareketinin bir sonucu oluşan derin bir aşınma kanalı sergilemektedir (Teoh, 2000).



Şekil 11. Medikal implantların yorulma hasarı örnekleri; a) kalça protezi, b) çıkarılan Björk-Shiley poliasetal disk mekanik kalp kapakçığı (ok işareti, yorulma-aşınma izini gösterir) (Teoh, 2000)

SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

İmplant uygulamalarında görüldüğü üzere bir implantın yüzeyi; malzeme degradasyonuna sebep olan, korozyon, oksitlenme, yıpranma ve yorulma gibi çeşitli harici uyarılara maruz kalır. Yıpranan implantları sisteme geri kazandırmak için her yıl çok sayıda revizyon operasyonu gerçekleştirilmektedir (Bronzino vd., 2000, Yang, 2013). Genellikle revizyon işlemleri karmaşık ve maliyetlidir. Bu nedenle biyomalzeme bileşenlerinin yüzey özelliklerinin geliştirilmesine mühendisler ve bilim adamları tarafından sürekli ihtiyaç duyulmaktadır. İmplantların biyo uyumluluklarının ve fonksiyonelliklerinin geliştirilmesi için yüzey modifikasyonları iyi bir çözüm gibi durmaktadır (Yang, 2013).

Hâlihazırda implant üreticileri aşınma ve korozyon özelliklerini iyileştirmek ve metal iyonu salınım sürelerini geciktirilebilmek için malzemelere kaplama, kumlama, elektropolisaj vb ek yüzey işlemleri uygulanmaktadır (Hermawan vd., 2011). Ayrıca implant üretimi gibi kritik yapı komponentlerinin işlenmesinde ve özellikle yüksek güvenilirlik seviyesine ulaşmak hedeflendiğinde, yüzey pürüzlülüğü, yüzey topografyası, mikro yapı, mikro sertlik, yorulma vb özellikleri içeren yüzey bütünlüğü ön plana çıkmaktadır (Outeiro, 2006, Field ve Kahles, 1964). Yüzey bütünlüğünde sağlanacak gelişmeler, gerek sterilizasyon aşamalarına karşı gerekse vücut içi servis performansına karşı hem genel hem de lokal korozyon direncinin geliştirilmesine katkıda bulunacaktır (Bertolini vd., 2009).

Diğer yandan implant üretiminde genel olarak kullanılan 316L paslanmaz çelik, Ti64 ve CoCrMo alaşımlarının mukavemetleri ve biyoyumlulukları yeterli iken, osseointegrasyonu, yüzey sertliği ve neticesinde aşınma direnci bazı durumlarda yetersiz kalabilmektedir. Genelde bu tip olumsuzlukları gidermek için malzemeye ilave edilen alaşım elementleri, biyoyumluluğu ve veya malzemenin şekillendirilebilme kabiliyeti ile işlenebilirlik kabiliyetini olumsuz yönde etkilerler. Son yıllarda yapılan araştırmalar, kimyasal yapıyı bozmadan mevcut malzemelerin APD (Aşırı Plastik Deformasyon) yöntemleri ile yüksek mukavemetli hâle getirilebileceğini göstermiştir. Böylece alaşımlandırmaya gerek kalmadan, tamamen biyoyumlu olan saf metal malzemeler bile eşdeğer mukavemet değerlerine ulaştırılabilmektedirler (Pürçek vd., 2012). APD yöntemleri ile yüzey ve yüzey altı tabakada ultra ince ve hatta nanometre boyutlu taneler üreterek birçok malzemenin yüzey bütünlüğü özelliklerinin geliştirebileceği gösterilmiştir (Yang vd., 2013, Pu vd., 2011, Klocke vd., 2018, Tang vd., 2017).

Aynı malzemeye defalarca uygulanabilen APD yöntemleri; tekrarlı ekstrüzyon ve basma (TEB), eş kanallı açışal ekstrüzyon (EKAE), yüksek basınç altında burma (YBB), birikimli hadde bağı (BHD), tekrarlı bükme-doğrultma (TBD), kapalı kalıpta tekrarlı dövme (KKD), çoklu izotermal basma (ÇİB) ve sürtünme karıştırma işlemi (SKİ) şeklinde sıralanabilir (Pürçek vd., 2012, Zhao, 2004). Bununla birlikte son gelişmeler, talaşlı imalat sürecinin de bir APD süreci olarak kategorize edilebileceğini göstermiş olup, yüzeyde nano/ultra ince tane yapısı oluşturarak fonksiyonel performansın geliştirilmesi için kullanılabilceğini göstermiştir (Tang vd., 2017, Özçatalbaş ve Baş, 2006, Wang vd., 2003, Shi ve Han, 2008, Qi vd., 2009, Yang vd., 2011).

SONUÇLAR

Biyomedikal implant üretiminde, kardiyovasküler alandan otorhinoloji (KBB) alanına kadar hala en çok tercih edilen metalik implant malzemeleri, mukavemet ve biyouyumluluk özellikleri yeterli seviyede olan 316L, Ti64, CoCrMo alaşımlarıdır.

İmplantlarda oluşan aşınma, korozyon, metalik iyon salınımı ve yorulma kaynaklı hasarlar malzeme yüzeylerinde başladığından, imal edilen implantların yüzey kalitesinin geniş bir ifadesi olan yüzey bütünlüğü özellikleri servis performansı açısından kritik öneme haizdir.

Aşınmayı, korozyonu ve metal iyonu salınımını engellemek için implantlara kaplama, kumlama, elektropolisaj vb ek yüzey işlemleri yapılmaktadır.

Ek yüzey işlemlerinin getirdiği maliyetlerden kaçınmak için APD yöntemleri sonucu implant malzemesinde oluşturulan; tane ufalanması, yüksek yüzey sertliği, düşük pürüzlülük ve kristalografik yönelim gibi arzu edilen yüzey bütünlüğü faktörleri ile implantların korozyon direncinin ve dolayısı ile fonksiyonel performansı yükseltilebilir.

KAYNAKÇA

- Akdoğan, G. ve Güney, A. (2010, 21-24 Nisan). *Diz artroplastisinde malzemelerden kaynaklanan biyoyumluluk problemleri*. 15. Biyomedikal Mühendisliği Ulusal Toplantısı, Antalya, 25-30.
- Altıntaş, M. (1994). *Klinik Gelişim*. İstanbul: İstanbul Tabip Odası Yayını.
- Bertolini, R., Bruschi, S. and Ghiotti, A. (2009). Enhancement of corrosion resistance to sterilization stages of a biomedical grade AISI 316L stainless steel by means of low temperature machining. *Materialstoday: Proceedings*, 7(1), 552-559.
- Bronzino, J. D., Park, J. B. and Kim, Y. K. (2000). *Metallic Biometaterials, The Biomedical Engineering Handbook (Second Edition)*. New York: CRC Press.
- Field, M. and Kahles, J. F. (1964). The surface integrity of machined and ground high strength steels. *DMIC Report*, Cornell University, 210, 54-77.
- Garrett, W. E. Jr., Swiontkowski, M. F., Weinstein, J. N., Callaghan, J., Rosier, R. N., Berry, D. J., Harrast, J. and Derosa, G. P. (2006). American board of orthopaedic surgery practice of the orthopaedic surgeon: Part-II, certification examination case mix. *The Journal of Bone and Joint Surgery*, 88(3), 660-667.
- Geringer, J., Forest, B. and Combrade, P. (2006). Wear analysis of materials used as orthopaedic implants. *Wear*, 261(9), 971-979.
- Gibson, I. (2005). *Advanced Manufacturing Technology for Medical Applications*. London: John Wiley & Sons.
- Gümüş, S., Polat, Ş., Lackner, J. M. ve Waldhauser, W. (2012, 5-8 Eylül). Darbeli lazer çöktürme yöntemi ile nano boyutta kaplanmış polimerik biyomalzemelerin yüzey karakterizasyonu ve biyoyumluluk açısından değerlendirilmesi. IV. Ulusal Polimer Bilim ve Teknolojileri Kongresi, Çanakkale.
- Gümüşderelioğlu, M. (2002). *Biyomalzemeler*. Ankara: Bilim ve Teknik Dergisi Yayını, 2-4.
- Güven, Ş. Y. (2010, 11-12 Kasım). *Ortopedik malzemelerin biyoyumlulukları ve mekanik özelliklerine göre seçimi*. 2. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi, Balıkesir, 472-484.
- Güven, Ş. Y. (2014). Biyoyumluluk ve biyomalzemelerin seçimi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 2(3), 303-311.
- Hanawa, T. (1999). In vivo metallic biomaterials and surface modification. *Materials Science and Engineering A*, 267(2), 260-266.
- Havıtcıoğlu, H. (2011). İmplant malzemelerinin yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi. *Türk Ortopedi ve Travmatoloji Birliği Derneği Dergisi*, 10(2), 178-183.
- Heisel, C., Silva, M. and Schmalzried, T. P. (2003). Bearing surface options for total hip replacement in young patients. *Journal of Bone and Joint Surgery-American*, 85A(7), 1366-1379.

- Hermawan, H., Ramdan, D. and Djuansjah, J. R. P. (2011). *Biomedical Engineering From Theory to Applications, Metals for Biomedical Applications*. Rijeka: InTech., 411.
- Klocke, F. (2001). *Manufacturing Technology I*. Aachen: WZL-RWTH.
- Klocke F., Döbbeler, B, Lung, S., Seelbach, T. and Jawahir, I. S. (2018). Analysis of surface integrity in machining of AISI 304 stainless steel under various cooling and cutting conditions. *Proceedings of The 21. International ESAFORM Conference on Material Forming, AIP Conference Proceedings 1960*, 070015, 1-6.
- Korkusuz, P. and Korkusuz, F. (2004). *Hard Tissue-Biomaterial Interactions. In Biomaterials in Orthopedics*. (Edited by Yaszemski, M. J., Trantolo, D. J., Lewandrowski, K. U., Hasırcı, V., Altobelli, E., Wise, D. L.,). NY: Marcel Dekker Inc., 1-210.
- Köse, N. (2016). *Ortopedi ve Travmatoloji Temel Bilimler ve Araştırma Kitabı, Bölüm 1: Biyomalzeme ve Biyomekanik, Biyomalzemeler ve İmplantlara Biyolojik Yanıt*. Ankara: TOTEK, 3-16.
- Long, M. and Rack, H. J. (1998). Titanium alloys in total joint replacement - a materials science perspective. *Biomaterials*, 19(18), 1621-1639.
- Mohanty, M., Baby, S. and Menon, K. V. (2003). Spinal fixation device: A 6-year postimplantation study. *Journal of Biomaterials Applications*, 18(2), 109-121.
- Niinomi, M. (2002). Recent metallic materials for biomedical applications. *Metallurgical And Materials Transactions A*, 33A, 477-486.
- Outeiro, J. C., Umbrello, D. and M'Saoubi, R. (2006). Experimental and numerical modelling of the residual stresses induced in orthogonal cutting of AISI 316L steel. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46(14), 1786-1794.
- Özçatalbaş, Y. ve Baş, A. (2006). Effect of cooling by air spraying on cutting forces and tool life in turning. *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 21(3), 451-455.
- Park, J. B. and Bronzino, J. D. (2003). *Biomaterials: Principles and Applications*. NY: CRC Press.
- Pasinli, A. (2004). Biyomedikal Uygulamalarda Kullanılan Biyomalzemeler. *Teknolojik Araştırmalar, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 4, 25-34.
- Pekşen, C. ve Doğan, A. (2011). İmplant dayanımı. *Türk Ortopedi ve Travmatoloji Birliği Derneği Dergisi*, 10(2),122-128.
- Pu, Z., Outeiro, J. C., Batista A. C., Dillon Jr., O. W., Puleo, D. A. and Jawahir, I. S. (2011). Surface integrity in dry and cryogenic machining of AZ31B Mg alloy with varying cutting edge radius tools. *Procedia Engineering*, 19, 282-287.
- Pürçek, G., Saray, O., Hacısalihoğlu, İ., Karaman, İ. ve Alsaran, A. (2012). Yüksek dayanımlı ve biyoyumlu implant üretiminde yeni bir yaklaşım: Aşırı plastik deformasyon ve yüzey işlemleri. *TMMOB MMO Mühendis ve Makina Dergisi*, 53(628), 50-60.
- Qi, Z., Jiang, J. and Meletis, E. I. (2009). Wear mechanism of nanocrystalline metals. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 9(7), 4227-4232.

- Raval, A., Choubey, A., Engineer, C. and Kothwala, D. (2004). Development and assessment of 316LVM cardiovascular stents. *Materials Science and Engineering A*, 386(1-2), 331-343.
- Sarsılmaz, F. (2003). *Polimer-Hidroksiapatit Kompozitlerinin Ortopedik Biyomalzeme Olarak Kullanılmasının Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Shi, Y.N. and Han, Z. (2008). Tribological behaviors of nanostructured surface layer processed by means of surface mechanical attrition treatment. *Key Engineering Materials*, 384, 321-334.
- Şap, E. ve Çelik, H. (2012). Kobalt esaslı alaşımların mikroyapı ve mekanik özelliklerine Ti ve Mn ilavesinin etkisinin incelenmesi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 9(3), 25-33.
- Tang, J., Luo, H. Y. and Zhang, Y. B. (2017). Enhancing the surface integrity and corrosion resistance of Ti-6Al-4V titanium alloy through cryogenic burnishing. *International Journal Advanced Manufacturing Technology*, 88, 2785-2793.
- Teoh, S. H. (2000). Fatigue of biomaterials: A review. *International Journal of Fatigue*, 22(10), 825-837.
- Vladkova, T. G. (2010). Surface Engineered Polymeric Biomaterials with Improved Biocantact Properties. *International Journal of Polymer Science, Polymeric Biomaterials for Tissue Engineering Application*, 2010, 1-22.
- Wang, Z.B., Tao, N.R., Li, S., Wang, W., Liu, G., Lu, J. and Lu, K. (2003). Effect of surface nanocrystallization on friction and wear properties in low carbon steel. *Materials Science and Engineering: A*, 352(1-2), 144-149.
- Yalçın, B. ve Temiz, D. (2012, 4-5 Ekim). *İmplant malzemesi olarak kullanılan AISI 316L östenitik paslanmaz çeliğin kuru tornalanabilirliğinin araştırılması*. 3. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu, Ankara, 212-224.
- Yang, S., Dillon Jr., O. W., Puleo, D. A. and Jawahir, I. S. (2013). Effect of cryogenic burnishing on surface integrity modifications of Co-Cr-Mo biomedical alloy. *Journal of Biomedical Materials Research Part B Applied Biomaterials*, 101B(1), 139-152.
- Yang, S., Puleo, D. A., Dillon Jr., O. W. and Jawahir, I. S. (2011). Surface Layer Modifications in Co-Cr-Mo Biomedical Alloy from Cryogenic Burnishing. *Procedia Engineering*, 19, 383-388.
- Zhao, Y. H., Liao, X. Z., Jin, Z., Valiev, R. Z. and Zhu, Y. T. (2004). Microstructures and mechanical properties of ultrafine grained 7075 Al alloy processed by ECAP and their evolutions during annealing. *Acta Materialia*, 52(15), 4589-4599.

2. Bölüm

**FAZ DEĞİŞTİREN MALZEME ENKAPSÜLASYON
PROSESİNİN GELİŞTİRİLMESİ****Esra Mirmahmutogullari¹,****Betül Ulupinar²,****Muhammed Salih³,****Mehmet Emre Burulday⁴***Ekip Lideri, Mir Araştırma ve Geliştirme A.Ş., Çevre-Enerji Araş. Birimi,**esramirmahmutogullari@mirarge.com**² Asistan Ar-Ge Mühendisi, Mir Araştırma ve Geliştirme A.Ş., Çevre-Enerji Araş.**Birimi, betulkalayci@mirarge.com**³Asistan Ar-Ge Mühendisi, Mir Araştırma ve Geliştirme A.Ş., Çevre-Enerji Araş. Birimi,**muhammedsalih@mirarge.com**⁴Asistan Ar-Ge Mühendisi, Mir Araştırma ve Geliştirme A.Ş., Çevre-Enerji Araş. Birimi,**mehmetemreburulday@mirarge.com***ÖZET**

Konutlardaki toplam enerji harcamalarının önemli bir bölümü ısıtma ve soğutma için kullanılmaktadır. Isıtma-soğutma enerjisi harcamalarının azaltılmasına yönelik çeşitli uygulamalar yönetmeliklerle zorunlu hale getirilmiştir. Bu sebeple konutların termal depolama kapasitesinin artırılması ve binaların enerji kullanımındaki pik yük tasarruflarının maksimize edilmesi gerekmektedir. Ayrıca sürdürülebilir ve sağlıklı bir yaşam için binalarda termal konfor şartları uzun süreler korunabilmelidir. Tüm bunlar yüksek enerji performanslı sürdürülebilir konutların ve iklimlendirme sistemlerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Konutlarda ısıtma enerjisi harcamalarının azaltılmasında Faz Değiştiren Malzemelerin (FDM) ısı enerji depolama özelliklerinden yararlanılabilmektedir. FDM'ler ısı enerjisiyi gizli ısı şeklinde depolayan malzemelerdir. FDM'ler yapı elemanlarına uygulandığında iç hava sıcaklığındaki dalgalanmayı azaltarak dengeli bir ısıtma enerjisi harcaması oluşmasını sağlayabilmektedir.

Bu kapsamda Mikrokapsüllü Faz Değiştiren Malzeme (MFDM) prosesi

geliştirme çalışmaları yapılmıştır. FDM olarak Parafin Mumu kullanılmış olup mikrokapsül kabuk malzemesi olarak Arap Zamkı+Alümina(Al_2O_3)/Jelatin kapsül kullanılmıştır. Seçilen FDM ve kabuk malzemesine uygun olarak Kompleks Koaservasyon yöntemi kullanılarak proses geliştirme optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Belirlenen FDM ve geliştirilen mikrokapsüllü numunelerde karakterizasyon testleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar incelenmiştir. Numune kabuğında Alümina kullanılması ile numunenin entalpi değerinin saf parafinin entalpi değerine yakın olduğu gözlemlenmiştir. Alumina ilavesi ile kapsül yapısının bozunma sıcaklığında artış görülmüş olup, entalpi değerinde ve buna bağlı olarak kapsülleme veriminde artış gözlemlenmiştir

Anahtar Sözcükler: Faz değiştiren malzemeler, malzeme geliştirme, enerji depolama, sürdürülebilirlik, enkapsülasyon

GİRİŞ

Binalarda toplam enerji kullanımının %40' ı bina ısıtma-soğutma ihtiyacı için harcanmaktadır. Ülkemiz enerjisinin %70'ini yurt dışından edinmektedir. Fosil yakıtlara bağımlılığın azaltılmaya çalışıldığı günümüzde enerji kayıplarını düşürerek enerjinin daha verimli kullanılması, maliyetleri önemli ölçüde düşürmekte ve karbon emisyonları ile beraber hava kirliliğinin de azaltarak sürdürülebilirliğe önemli destek vermektedir (Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, 2021).

Isıl enerji depolama sistemlerinde kullanılabilir faz değişim malzemelerinin belirli özellik ve ölçütleri içermesi gerekmektedir. Bir malzemenin gizli ısı depolama malzemesi olarak kullanılabilmesi için erime ve donma sıcaklıklarının uygulama alanına yönelik olması, birim kütlede istenilen entalpi değerlerini sağlaması, uzun süreli kullanımlarda performansını devam ettirmesi, ucuz olması, toksik olmaması, kimyasal kararlılık gösterirken yanıcı özellik göstermemesi gerekmektedir (Aydın, A. A., ve Okutan, H., 2021). Bu amaçla maddeler karşılaştırmalı olarak analiz edilmeli ve uygulama alanına yönelik malzeme seçimi yapılmalıdır.

FDM'ler farklı sıcaklık aralıklarında faz değişimi göstermektedir. Birim kütle başına depolayabildikleri ısı enerjisi miktarı birbirinden farklıdır. Bu çeşitlilik sebebiyle faz değişim malzemeleri farklı alanlarda kullanıma sahiptirler. Katı-Sıvı faz geçiş işlemleri boyunca FDM'lerin sızıntısını etkili bir şekilde azaltmak ve FDM'lerin çevre ile reaksiyonunu engellemek için mikrokapsülasyon yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca mikrokapsülasyon yöntemi FDM tabanlı ısı depolama işlemleri içinde termal döngünün kararlılığını ve büyük bir ısı transfer alanı sağlayabilmektedir (Hassan, A., Laghari, M.S., Rashid, Y., 2016).

Kabuk malzemeleri, üretilen mikrokapsüllerin morfolojisi, mekanik özellikleri ve termal özelliklerinde önemli rol oynamaktadır. Kimyasal yapısına göre organik, inorganik ve organikinorganik hibrit malzeme olarak üç kategori de incelenmektedir. Kabuk malzemelerinin seçimi ve kompozit FDM kapsüllerinin yapısı FDM stabilitesi ve performansı için çok önemlidir. Gün içerisinde FDM malzemelerinde erime ve donma döngüsünün olduğu varsayılırsa, malzemenin 7300 döngü boyunca kararlı olması gerekmektedir (Dal, İ., 2020)

Mikrokapsül polimerik bir duvar ve bu duvar tarafından kaplanmış sıvı maddesinden oluşur. Kapsül duvarı, içindeki sıvı ile reaksiyon vermeyen bir maddedir. Mikrokapsülleme işlemi daha basit bir ifadeyle aktif maddelerin mikroskobik kapsüller içerisinde paketlenmesidir. FDM'nin yapıda dağılmasının önlenmesi

(hacim değişikliğine izin verme), daha az buharlaşma, sıvı faz kaybını engellemesi ve çevre ile etkileşimini en alt seviyede tutmak için mikrokapsülasyon yöntemlerine başvurulmaktadır. FDM mikrokapsülasyonu, küçük FDM parçacıklarının veya damlacıklarının bir kaplama malzemesi ile çevrelendiği homojen veya heterojen bir matrikse eklenerek fiziksel veya kimyasal işlemler sonucunda üretilmektedir. FDM'lerin mikrokapsülasyonu en yaygın şekilde kullanılan depolama yöntemidir. Mikrokapsüller sıvı materyallerin katı bir şekilde kullanılmalarını sağlarlar ve faz değişimi sırasında gerçekteşecek hacim değişimine izin verirler (K. Zhang , W. Wu , H. Meng , K. Guo, J.-F. Chen., 2009).

FDM kapsüllenmesindeki amaç, maddenin kapsül içinde hapsolarak faz değişimini kapsül içinde gerçekteşirmesidir. Böylece FDM'in kullanımı kolaylaşırken ısı transferi açısından yüzey alanı artacağından daha elverişli bir ortam olmaktadır. Mikrokapsül üretiminde birçok teknik kullanılmaktadır. Mikrokapsülasyon tekniğinin seçiminde, çekirdek materyalinin tipi, istenilen partikül boyutu, kabuk materyalinin geçirgenliği, vb. gibi özellikleri önemlidir. Hedeflenen etkiye göre mikrokapsülasyon tekniği seçilir.

FDM'nin yapı elemanına entegrasyonu üzerine çok çeşitli çalışmalar mevcuttur. Hawes vd. (1993) yaptıkları çalışmada, FDM birleştirme için doğrudan birleştirme veya emdirme (impregnasyon), daldırma ve kapsülleme yöntemleri umut verici üç yöntem olarak ortaya konmuştur. Zhou vd. (2012) tarafından yapılan çalışmada ise FDM'lerin erime ve donma sıcaklıklarının, yapı malzemelerine dahil edildiğinde biraz değiştiği ifade edilmiştir. Ayrıca FDM'ler tek bir lamine levha şeklinde kullanılarak diğer yapı bileşenleriyle birleştirilebilmektedir (K. Darkwa, J.S. Kim., 2004). Kullanılacak FDM'ler ile yapı malzemelerinin özellikleri birbirleri ile yoğunluk, ısıl iletkenlik, erime sıcaklığı ve erime entalpisi parametreleri çerçevesinde uyumluluk göstermelidir.

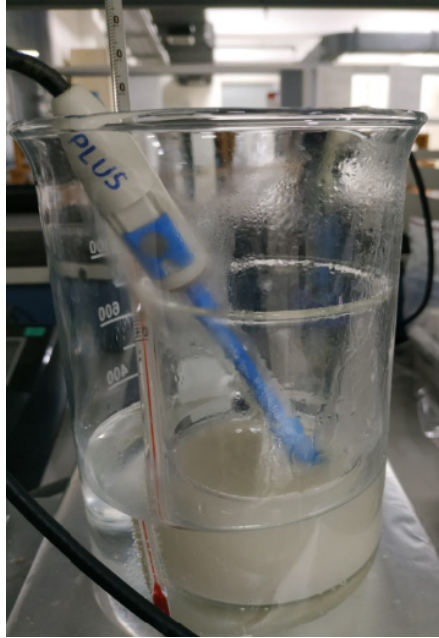
Çalışmanın amacı, mikrokapsüle edilmiş faz değiştiren malzeme prosesi geliştirirerek binanın tümünün termal depolama kapasitesini arttırmak, binaların enerji ve pik yük tasarruflarını maksimize etmek ve binalarda termal konfor şartlarını uzun süreler koruyabilen iklimlendirme sistemlerine termal depolama özelliği kazandırmaktır. Bu çalışmada, duvardan aktif ısıtma ve soğutma yapan yapı elemanı için (Koca, A, ve Gemici, Z., 2014) mikrokapsüllü FDM geliştirilmiştir. Çalışmada, kapsülleme prosesi optimize edilmiş olup, geliştirilen proses sonucunda elde edilen MFDM'ler için karakterizasyon testleri gerçekteşirilmiştir.

YÖNTEM

Çalışma kapsamında, faz değiştiren malzeme olarak Parafin mumu kullanılmıştır. Parafinler genel formülü ile düz zincirli n-alkanların bir karışımıdır. $CH_3-(CH_2)_n-CH_3$, 800 kg / m^3 civarında yoğunluğa sahip geniş bir sıcaklık aralığında mevcuttur. Düşük ısı iletkenliktedir (yaklaşık $0,2W / mK$) (M.K. Rathod, J. Banerjee, 2016). Parafinler, yüksek gizli ısı, iyi termal özellikler ve kimyasal/termal olarak kararlı oldukları için bir dizi uygulama alanına uyumlu erime sıcaklığı aralıklarına sahiptirler.

Yapılan mikrokapsülasyon çalışmasında, kabuk malzemesi için protein esaslı Arap Zamkı+ Al_2O_3 /Jelatin kullanılmıştır. Mikrokapsülleme yöntemi olarak ise, Kompleks Koaservasyon yöntemi ile mikrokapsülleme gerçekleştirilmiştir (Başal ve ark., 2012).

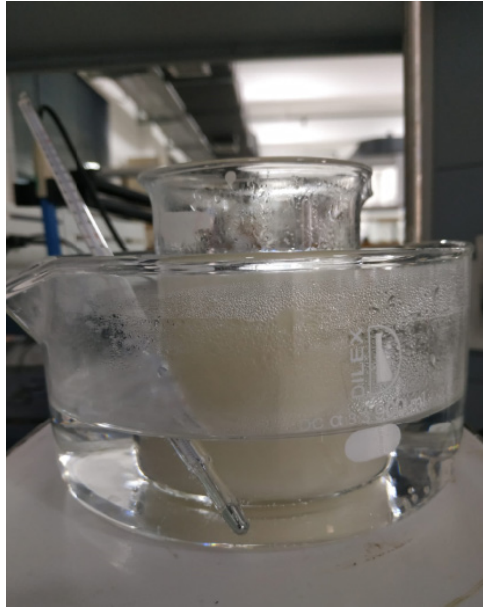
Oda sıcaklığında 100 ml deiyonize su içerisine 2 g jelatin eklenerek manyetik karıştırıcı ile homojen bir karışım eldesi için 30 dakika boyunca karıştırılmıştır. Ardından Arap Zamkı içerisine 0,5 g Alümina eklenir ve 15 dakika boyunca karıştırılır. Daha sonra çözeltilinin sıcaklığı $50^\circ C$ üzerine çıkarılmıştır. İstenen sıcaklığa ulaşıldığında çözeltilinin pH'ı 3M NaOH ile 7,0'ye ayarlanmıştır. Sıcaklık sabit kalacak şekilde 15 dakika boyunca karıştırılmıştır (şekil 1.).



şekil 1. Arap Zamkı+Alumina çözeltilisi pH ayarlaması.

13,5 g parafin içerisine 1,6 g SDS (Sodyum Deodesil Sulfat) eklenmiş ve 500 rpm’de karıştırılmıştır. Hazırlanan jelatin çözeltisi içerisine damlalar halinde SDS içeren parafin eklenerek 65 °C’de ve 500 rpm’de karıştırılmıştır. Arap zankı çözeltisi damlalar halinde su içinde yağ fazına eklenmiş ve 500 rpm’de 15 dakika boyunca karıştırılmıştır. Karıştırma sonunda emülsiyonun pH’ı 1M HCl ile 4,0-4,5 (4’e yakın olması daha iyi sonuç vermektedir) arasına ayarlanmış ve 65°C’de 90 dakika boyunca karıştırmaya bırakılmıştır. (sıcaklığın sistem boyunca sabit kalması gerekmektedir).

Koaservasyon işlemi (şekil 2.) sonrası ısıtıcı kapatılmış ve çözeltinin oda sıcaklığına inmesi için 600 ml soğuk deiyonize su çözelti içerisine eklenmiştir. Oda sıcaklığına soğutma işlemi sonrası sistem 5-10 °C’ye soğutulmuştur. Soğuyan sisteme %1,5’luk glutraldehit çözeltisi eklenmiştir (500 ml) (Köksal, E., Fetiyeye, G., 2017). Glutraldehit özeltisi eklenmesi sonrası sistemin sıcaklığı 3 saat boyunca sabit tutularak 500 rpm’de karıştırılmıştır.



şekil 2. Koaservasyon işlemi.

Kullanılan Malzemeler

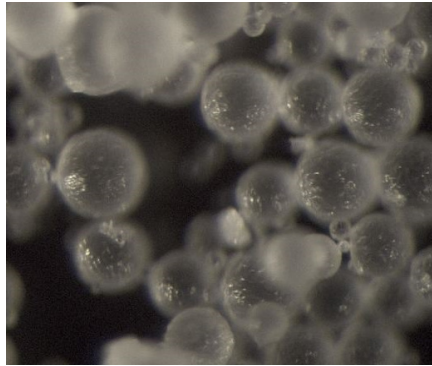
Deney için kullanılan malzeme, amaç ve malzemelere ait miktarlar Tablo 1’de yer almaktadır.

Tablo 1. Deney malzemeleri

Malzeme	Kullanım Amacı	Miktar
Jelatin	Kabuk malzemesi	2 g
Arap Zamkı	Kabuk malzemesi	2 g
Al ₂ O ₃ (Alumina)	Kabuk malzemesinin termal iletkenliğini arttırmak.	0,5 g
SDS(Sodyum Deodesil Sülfat)	Emülsiyon oluşumu sağlanmaktadır. Miktarına bağlı olarak mikrokapsüllerin boyutları değişmektedir.	1,6 g
Paraffin wax	FDM	13,5 g (Paraffin mumunun yoğunluğu 0,9 g/ml olarak alınmıştır)
Gluteraldehit	Çapraz bağlayıcı. Kabuk malzemesinin kalıcı bir şekilde bir arada durmasını sağlamaktadır.	%1,5'lik çözeltiden 500 ml

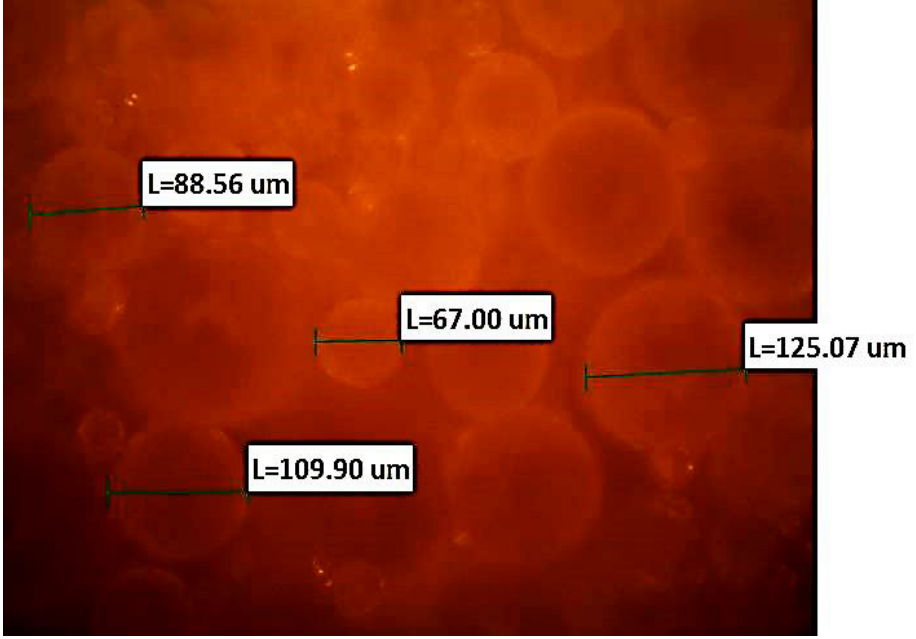
BULGULAR

Elde edilen numuneye “Stereo-Optik mikroskop, DSC ve TGA” analizleri yapılmıştır. Şekil 3.’deki Stereo mikroskop görüntüsünde, kapsüllerin düzgün kürecik formunda oldukları görülmektedir. Kabuğa eklenen Alümina, kapsüllerin yüzeyinde yer almaktadır.



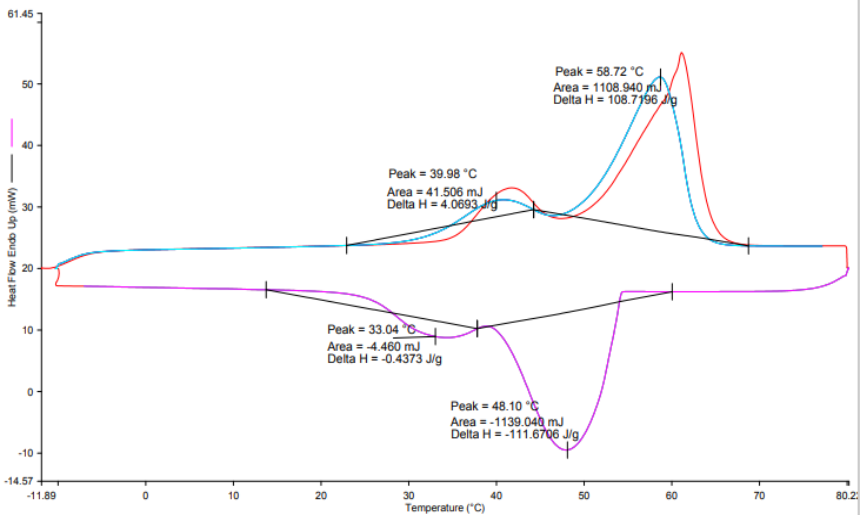
Şekil 3. Mikrokapsüle edilmiş FDM’ye ait stereo mikroskop görüntüsü.

şekil 4’de yer alan MFDM ‘lerin 20X büyütme oranındaki optik mikroskop görüntüsündeki ortalama tane boyutu, 97,63 μm ’dir. Kabuk malzemenin varlığı ve kapsül şekillerinin dairesel olduğu görölmektedir.



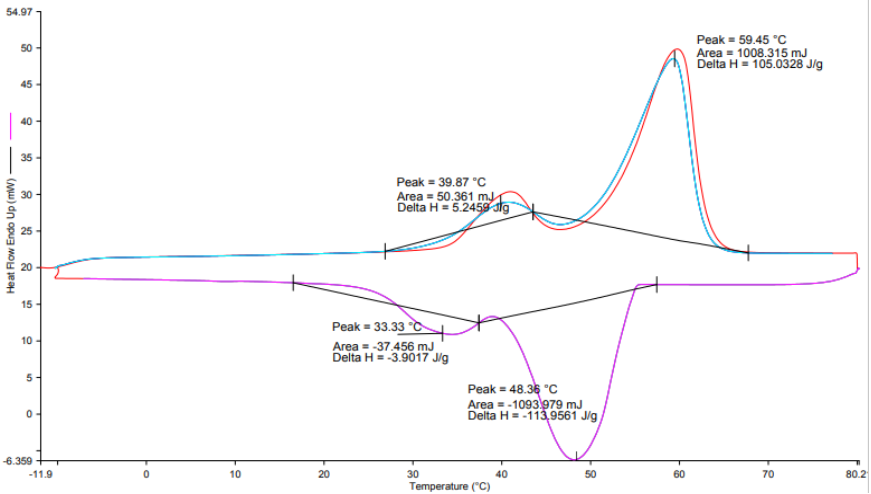
şekil 4. Mikrokapsüle edilmiş FDM’ye ait optik mikroskop görüntüsü (20X).

FDM’ye ait düşük sıcaklık diferansiyel taramalı kalorimetre cihazı (DSC) ile elde edilen termal davranış şekil 5’deki gibidir. DSC analizi $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkları arasında $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ısıtma hızında gerçekteştirilmiştir. Saf Parafin mumunun ısıtma ve soğutma eğrilerinde iki adet pik görünmektedir. Bu durum Parafin mumuna özel bir davranıştır. Saf parafinin erime ve katılaşma sıcaklıkları sırasıyla $58,72\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $48,10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’dir. $39,98\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’de verdiği pik Parafin mumunun katı-katı faz değimini, $58,72\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’de verdiği pik ise katı-sıvı faz değişimini ifade etmektedir. Saf parafinin ortamdan depoladığı ve verdiği enerji sırasıyla $112,78\text{ J/g}$ ve $112,10\text{ J/g}$ ’dır. Bu değerler kullanılan parafinin saflık değerine göre değişebilmektedir.



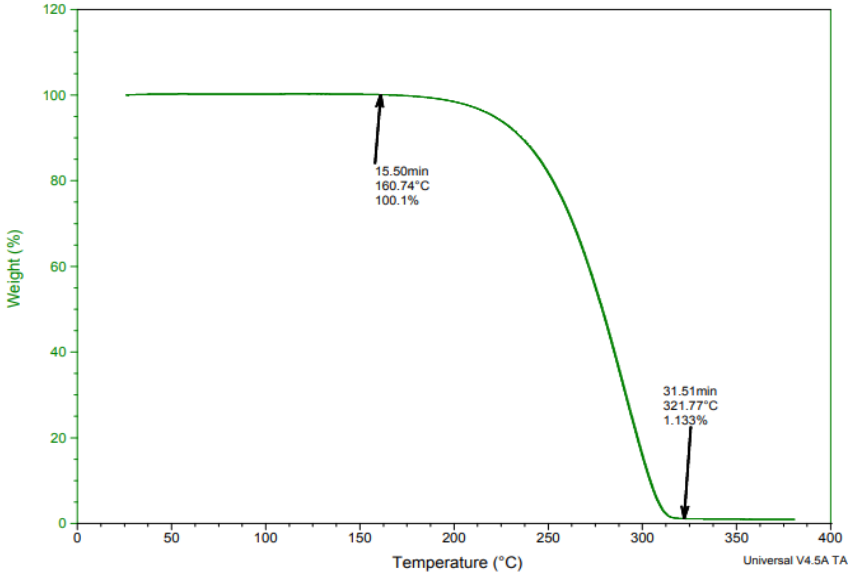
Şekil 5. Parafin mumuna ait DSC Grafiği

Şekil 6’da MFDM’ye ait DSC grafiği yer almaktadır. MFDM’ye ait erime ve katılaşma sıcaklıkları sırasıyla 59,45 °C ve 49,35 °C’dir. MFDM’nin ortamdan depoladığı ve ortama verdiği enerji sırasıyla 110,27 J/g ve 117,85 J/g’dir.



Şekil 6. Mikrokapsüle edilmiş FDM’ye ait DSC Grafiği

Şekil 7.'de yer alan TGA (Termogravimetrik Analiz) sonucunda MFDM numunenin yaklaşık olarak 160 °C'ye kadar bozunmadığı-kütlesini kaybetmediği görülmektedir. 160 °C ve 321 °C arasında malzeme, kütlesinin %98,8'ini kaybetmiştir. Yapılan diğer çalışmalara kıyasla numunenin bozunma sıcaklığı daha yüksektir. MFDM numunenin içerisinde bulunan "Alumina" ile bozunma sıcaklığında artış sağlanmıştır. Bozunma sıcaklığındaki artışın "Alumina"nın etkisi ile malzemeye güç tutuşur özellik kazandırdığı söylenebilmektedir.



Şekil 7. Mikrokapsüle edilmiş FDM'ye ait TGA Grafiği

Aşağıda yer alan formül ile DSC analizi sonuçlarından faydalanılarak mikrokapsüllenmiş FDM oranı % olarak hesaplanmıştır.

$$\text{Mikrokapsüllenmiş FDM (\%)} = \left[\frac{\Delta H_{\text{mikroFDM}}}{\Delta H_{\text{FDM}}} \right] \times 100$$

$\Delta H_{\text{mikroFDM}}$: Mikrokapsüllenmiş faz değiştiren maddenin erime entalpişi,
 ΔH_{FDM} kapsülenmemiş faz değiştiren maddenin erime entalpisidir.

MFDM'nin mikrokapsüllenmiş FDM oranı, %98'dir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Geliştirilen mikrokapsüllü FDM prosesi bina uygulamalarında kullanımı için uygun bulunmuştur. Faz Değiştiren Malzeme'ye ait erime sıcaklığı değeri üç farklı şekilde değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme temel olarak yapı malzemesinin kullanılacağı iklim ve coğrafi konum durumları göz önüne alınarak belirlenmiştir. Bu durumlar, soğuk hava şartlarında radyant soğutma ve ısıtma sisteminde kullanılan borulardan geçen su sıcaklığı ve termal konfor şartlarıdır.

Çalışma sonucunda, Arap Zamkı+Al₂O₃/Jelatin entalpi değerinin saf parafinin entalpi değerine yakın olduğu gözlemlenmiştir. Kapsül malzemesinde Alümina kullanımı ile parafinin entalpi değerinde ve buna bağlı olarak kapsülleme veriminde artış gözlemlenmiştir. Entalpi değerinin artması ile kapsüllenen parafinin miktarının arttığı bu sebeple verimin yükseldiği yorumlanmaktadır.

Elde edilen MFDM numunenin erime noktası 59,45 °C olup, erime entalpisi 110,27 J/g'dır. MFDM'nin donma noktası 48,36 °C olup, donma entalpisi 117,85 J/g'dır. MFDM'nin mikrokapsüllemiş FDM oranı, %98'dir.

Parafin Mumu erime sıcaklığı sebebi ile (50-53 °C) bina uygulamaları için uygun değildir. Bu sebeple gelecek çalışmalarda, ucuz ve tedarik zorluğu olmayan, endüstriyel uygulamalara uygun FDM tedarik edilerek denemeler gerçekleştirilecektir. Ayrıca elde edilen numune, prototip duvardan ısıtma ve soğutma yapan yapı elemanı içerisine eklenerek ısı performans testlerine tabi tutulacak ve enerji verimliliği analizleri gerçekleştirilecektir.

TEŞEKKÜR

Çalışmaya maddi destek veren Mir Araştırma ve Geliştirme A.Ş.'ye, yoğun çalışmaları ile katkıda bulunan Çevre-Enerji Araştırmaları Ekibine, bilgi ve yol göstericilikleri sebebi ile Yüksek Lisans Tez Danışman Hocalarım Doç. Dr. Gökhan Çaylı ve Doç. Dr. Alihsan Koca'ya ve Amirim; firma Direktörümüz Dr. Mustafa Doğu'ya teşekkürlerimi sunarım.

KAYNAKÇA

- Aydın, A. A., & Okutan, H. (2021) *Faz Değişim Malzemeleri ve Isı Enerjisinin Depolanması*, İstanbul Sanayi Odası.
- Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi. (2021), *Termal Enerji Depolama İnovasyon Görünümü Raporu*
- Koca, A. *Modular hybrid wall assembly*. Patent. World Intellectual Property Organization, No WO/2014/037556, Tarih 12 Mart 2014. <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2014037556>
- M.K. Rathod, J. Banerjee. (2016) *Thermal stability of phase change materials used in latent heat energy storage systems: a review*. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 246–258.
- Beyhan, B., Cellat, K., Karahan, O., Konuklu, Y., Dündar, C., Güngör, C., Paksoy, H. (2015) “*Bina Yapı Malzemeleri İçin Mikrokapsüllenmiş Faz Değiştiren Madde Geliştirilmesi*”, Teskon.
- Başal, G., Karagül, S. (2012) “*Medikal Tekstiller İçin Antimikrobiyel Ajan İçeren Mikrokapsüllerin Hazırlanması*”.
- Dal, İ., (2020) “*Yüksek Performanslı Stabil Faz Değişim Malzemesinin Geliştirilmesi*”, Bilecik.
- Hassan, A., Laghari, M.S., Rashid, Y. (2016) “*Micro-Encapsulated Phase Change Materials: A Review of Encapsulation, Safety and Thermal Characteristics*”.
- K. Zhang , W. Wu , H. Meng , K. Guo, J.-F. Chen. (2009) “*Pickering Emulsion Polymerization: Preparation Of Polystyrene/Nano-Sio2 Composite Microspheres With Core-Shell Structure*”.
- K. Darkwa, J.S. Kim. (2004) *Heat transfer in neuron composite laminated phase-change drywall*. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part A—J. Power Energy.* 218(A2), 83–88.
- Konuklu, Y. (2008)“*Mikrokapsüllenmiş Faz Değiştiren Maddelerde Termal Enerji Depolama ile Binalarda Enerji Tasarrufu*”, Adana, 2008.
- Köksal, E., Fetiye, G. (2017) “*Kompleks Koaservasyon Yöntemi ile E Vitamini İçeren Mikrokapsül Üretimi*”.

3. Bölüm

KARBON NANOTÜP(KNT) KATKILI KOMPOZİT YAPRAK YAYIN STATİK ANALİZİ VE NÜMERİK ANALİZİ

Arş. Gör. Mehmet Güçlü

*İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Makine Mühendisliği,
mehmet.guclu@iuc.edu.tr*

Prof. Dr. M. Cüneyt FETVACI

*İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Makine Mühendisliği,
fetvacic@iuc.edu.tr*

Doç. Dr. Yener TAŞKIN

*İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Makine Mühendisliği,
ytaskin@iuc.edu.tr*

Fatih TURAN⁴

*⁴ Arş. Gör, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği,
fatihturan@eskisehir.edu.tr*

ÖZET

Bu çalışma kapsamında, taşıt süspansiyon sisteminin önemli bir parçası olan çelik yaprak yaylara alternatif olarak kompozit yaprak yay üretimi ele alınmıştır. Kompozit yaprak yaylar, cam fiber takviyeli(düz, örgü tipi,200gr/m2), epoksi matrisli elle yatırma yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Karbon nanotüp(KNT) etkisinin incelenmesi için epoksinin içine farklı oranlarda KNT(%0-1-2-3) ilave edilerek 100°C sıcaklık ve basınç altında 4 saat kürlenerek soğumaya bırakılarak mekanik özellikleri belirlenmiş ve kıyaslanmıştır. Taşıtlarda yaprak yay kullanıma uygun olacak şekilde, kompozit yaprak yaylara gözler ilave edilerek, tasarlanan ve imal edilen statik test aparatı ile çekme cihazı altında hasara uğratarak,

çıkın sonuçlar çelik yaprak ve kendi arasında kıyaslanmıştır. Ayrıca sonuçlar sonlu elemanlar yöntemi ile bilgisayar(ANSYSv16) ortamında analiz edilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda, kompozit yaprak yaylar çelik yaprak yaylara oranla %70 oranında bir ağırlık kazancı sağlamış ve yaprak yay katsayısı literatüre uygun olarak bulunmuştur. KNT oranı (%1,%2) olan yaprak yayların gerilme dayanımının, KNT'siz yaprak yayya göre arttığı gözlemlenmiş, KNT oranı(%3) olan yaprak yayın gerilme dayanımı KNT'lerin topaklanmasından dolayı düştüğü gözlemlenmiştir.

Anahtar Sözcükler: *Kompozit yaprak yaylar, Karbon nanotüp, Sonlu elemanlar metodu*

GİRİŞ

Taşıt süspansiyon sisteminin önemli bir elemanı olan yaprak yaylar, sürüş esnasında yol düzensizliğinden kaynaklanan titreşimlere ve ani darbelere maruz kalmaktadır. Yaprak yaylar bu görevini enerji depolama ve salıverme kabiliyetleri sayesinde yapmaktadırlar. Yaprak yayların enerji depolama kapasitesini arttırarak, daha verimli bir süspansiyon sistemi elde edilebilir. Kompozit malzemeler yüksek mukavemet, düşük elastisite modüllerine sahip olmalarından dolayı ideal bir yaprak yay malzemesidir.

Kompozit yaprak yaylar ile ilgili son yıllarda birçok çalışma yapılmıştır. Shokrieh ve Rezai (Shokrieh and Rezaei 2003) a composite one made from fiberglass with epoxy resin is designed and optimized using ANSYS. Main consideration is given to the optimization of the spring geometry. The objective was to obtain a spring with minimum weight that is capable of carrying given static external forces without failure. The design constraints were stresses (Tsai-Wu failure criterion cam fiber takviyeli epoksi matrisli kompozit yaprak yay tasarımı ve optimizasyonu ile ilgili, uygulanan statik yük altında mümkün olabilecek en düşük ağırlığa sahip yaprak yay üretmektedir. Çalışmanın sonucunda dört katlı çelik yaprak yay ile kıyaslandığında, kompozit yaprak yayın dayanım ve doğal frekans olarak daha fazla, ağırlık olarak ise %80 daha azdır. Qureshi (Al-Qureshi 2001) çok yapraklı çelik yaylarla aynı mekanik ve geometrik özelliklere sahip olan tek parça cam fiber/epoksi kompozit yaprak yay tasarımı, üretimi ve testleri ile ilgili bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada laboratuvar testlerinin yanında yol test testleri de yapılmıştır. Sancaktar ve Gratton (Sancaktar and Gratton 1999) güneş enerjisi ile çalışan hafif arabalar için cam fiber/epoksi kompozit yaprak yay dizayn ederek üretmişlerdir. Kumar ve Vijayarangan(Kumar and Vijayarangan 2007) aynı boyutlardaki çelik ve cam/epoksi kompozit yaprak yayların statik ve yorulma analizini deneysel ve analitik olarak yapmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki, kompozit yaprak yaylar çelik yaprak yaylara nazaran %67.35 daha az gerilmeye, %64.95 daha fazla katılığa ve %126.98 daha fazla doğal frekansa sahiptir. Patunkar ve Dolas (Patunkar and Dolas 2011) çelik bir yaprak yay ile aynı geometrik özelliklere sahip cam elyaf/epoksi içerikli kompozit yaprak yayın aynı statik yükleme altındaki davranışlarının karşılaştırılması yapılmıştır. Kompozit yaprak yayın statik yükleme altındaki yer değiştirmesi çelik yaprak yay göre daha az çıkmıştır. Kompozit yaprak yay % 84,4 daha hafif olduğu gözlemlenmiştir. Gebremeskel(Gebremeskel 2012) hafif araçlar için elle yatırma metodu ile üretilen cam elyaf/epoksi içerikli kompozit malzemedan yaprak yay tasarımı ve üre-

timi ile ilgili bir çalışma yapmıştır. Üretim ve tasarım kolaylığı adına yaprak yayın uzunluk boyunca sabit kesitli seçilmiştir. Maksimum gerilme hasarı kriterine göre yapılan analizde ortaya çıkan gerilmeler malzemenin mekanik özelliklerinin çok altında ve yorulma ömrünün de $221,16 \times 10^3$ olduğu görülmüştür.

Uzun yıllardır nano parçacıklar kompozit malzemelerin fonksiyonelleştirilmesini sağlamak amacıyla dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır. Böylece kullanılan nanoparçacıkların türlerine ve uygulama şekillerine bağlı olarak, kompozit malzemelerin termal, mekanik ve elektriksel özellikleri artırılabilir. KNT'ler sahip oldukları üstün özelliklerden dolayı en sık kullanılan nano partiküllerden birisidir. KNT'ler, son derece yüksek dayanım ve rijitliğe (Thostenson and Chou 2006) sahip olmakla beraber üstün elektriksel ve termal iletkenlik özelliği sergilemektedirler (Ebbesen, T. W.,1996). Eşsiz mekanik ve fiziksel özelliklerinin yanında sahip oldukları yüksek uzunluk/çap oranı ve düşük yoğunlukları karbon nano tüplerin kompozit malzemeler içerisinde kullanılması için çok geniş bir çalışma alanı oluşturmaktadır. Matris malzemesi içerisinde takviye elemanı olarak görev yapan KNT'ler kompozit malzemelerin tokluğunu, darbe direncini, ve titreşim sönümlenme kabiliyetlerini arttırmaktadırlar (Li et al. 2007). Dharap ve arkadaşları (Dharap et al. 2004) ince bir film içerisinde rastgele dağıtılmış karbon nano tüpler ile üretilmiş sensörler ile ilgili çalışmalar yapmıştır. Zhang ve arkadaşları (Zhang and Tong 2008) çok duvarlı karbon nano tüpler ile takviye edilmiş kompozitlerin şekil değiştirme ölçme sensörü olarak kullanılabilirliğini rapor etmişler ve şekil değiştirmeye bağlı anlık direnç değişiminin çalışma koşullarında gerçek zamanlı şekil değiştirme analizi için kullanılabilirliğini teklif etmişlerdir. Kang ve arkadaşları (Kang et al. 2006) tek duvarlı karbon nano tüpler ile üretilen ince filmlerin gerinim ölçer olarak kullanılabilirliği sonucuna varmışlardır. Thostenson ve arkadaşları (Thostenson and Chou 2006) takviye malzemelerinde geleneksel mikro boyuttan nanobouta geçişin elektriksel iletkenliğin artarak matris baskın olan bir hasar ilerlemesinin tespitinin daha iyi yapılabildiği sonucuna varmıştır. Park ve arkadaşları (Lee et al. 2000) elektromekanik test tekniğini kullanarak nano karbon kompozitlerdeki karbon nano tüplerin düzenli dağılmasının ve matris ile karbon nano tüplerin arayüzey yapışmasının hasar tespitinin performansını iyileştirilmesinde çok önemli faktörler olduğu sonucuna varmıştır.

Bu çalışmanın amacı, KNT takviyesinin kompozit yaprak yayların mekanik özelliklerine olan etkisini incelenmektir. Bu kapsamda sade epoksi matrisli ve farklı oranlarda KNT (%1, %2, %3) katkı epoksi matrisli cam fiber takviyeli kompozit yaprak yaylar, elle yatırma yöntemi ile yekpare olarak üretilmiştir.

KNT oran etkisinin incelenmesi için, KNT'ler epoksi içerisinde yüksek hızlı homojenizatör ile dağıtılmıştır. Üretimi yapılan KNT dolgulu kompozit yaprak yaylar statik teste maruz bırakılarak her bir yayın kuvvet-çökme miktarı grafiği elde edilerek yay katsayıları hesaplanmıştır. Her bir oran için çekme testi ile tespit edilen mekanik özellikler kullanılarak yaprak yayların statik olarak sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Deneysel sonuçlar ile sonlu elemanlar yönteminden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

MALZEME VE DENEYSEL METOT

Malzeme Seçimi

Bu çalışma kapsamında, polimer matris malzemesi olarak Duratek firmasının ürettiği Duratek 1000 kodlu epoksi esaslı laminasyon reçine sistemi kullanılmıştır. Duratek 1000 reçine sistemi, DTE 1000 kodlu reçine ve yavaş kürlenme imkânı tanıyan DTS 1105 kodlu kürlendirici ajan olmak üzere iki komponentten oluşmaktadır. DTE 1000+DTS 1105 sisteminden oluşan reçinenin bazı fiziksel özellikleri Tablo 1'de verilmektedir. DTE 1000 ve DTS 1105 komponentleri üretici firmanın tavsiyesi doğrultusunda 1:3 oranında karıştırılarak kullanılmıştır.

Tablo 1. Duratek 1000 reçine sisteminin fiziksel özellikleri

Özellik	DTE 1000 + DTS 1105
Yoğunluk (g/cm³)	1.1
Vizkosite (mPas)	600
Raf Ömrü (dk)	360

Yaprak yaylarda takviye elemanı olarak olarak 200 gr/m² yoğunluk ve 0.2 mm kalınlığa sahip cam dokuma elyaflar kullanılmıştır. Takviye malzemesinin dokuma seçilmesinin sebebi 0° ve 90° yönlerinde dayanım sağlamasıdır.

KNT tipi olarak Timesnano firmasından temin edilen endüstriyel tip hidroksil ile fonksiyonelleştirilmiş çok duvarlı karbon nanotüp kullanıldı (ÇDKNT-OH). KNT'lerin epoksi içerisinde karışımının zor olması ve karışım esnasında topaklanma oluşmasından dolayı, hidroksil ile fonksiyonelleştirilmiş KNT kullanıldı.

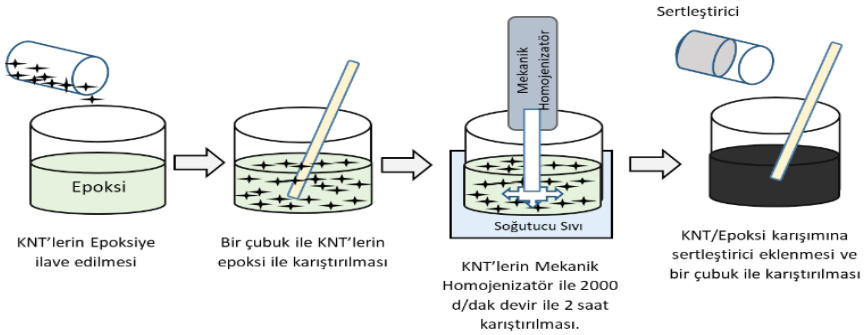
mıştır. Firma tarafından verilen KNT malzemesinin özellikleri tablo 2’de verildi.

Tablo 2. Fonksiyonelleştirilmiş çok duvarlı karbon nanotüplerin fiziksel özellikleri

Fiziksel Özellikler	ÇDKNT-OH
Ortalama Çapı(nm)	15
Ortalama Uzunluk(mm)	~ 30
OH Oranı(%)	2.48
Yüzey Alanı (m ² /g)	140

Karbon Nanotüp(KNT) Karıştırma Prosesi

Karbon nanotüpün epoksi ile karıştırılması yüksek devirli Wisetis HG-15D marka mekanik homojenizatör ile yapıldı (Bauhofer and Kovacs 2009)-(Li et al. 2007).Şekil 1’de KNT’lerin epoksi içerisindeki homojenizasyon prosedürü görülmektedir.

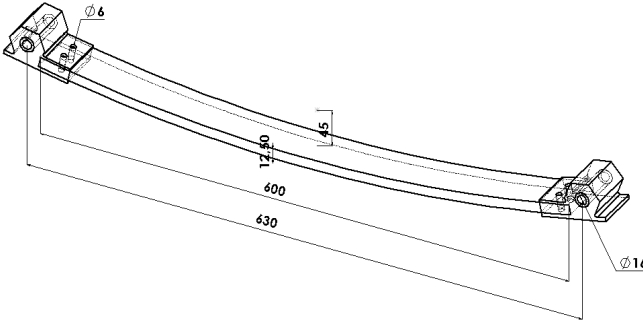


Şekil 1 . KNT karıştırma prosesi

KOMPOZİT YAPRAK YAYLARIN ÜRETİLMESİ

Yaprak Yay Modelinin Oluşturulması

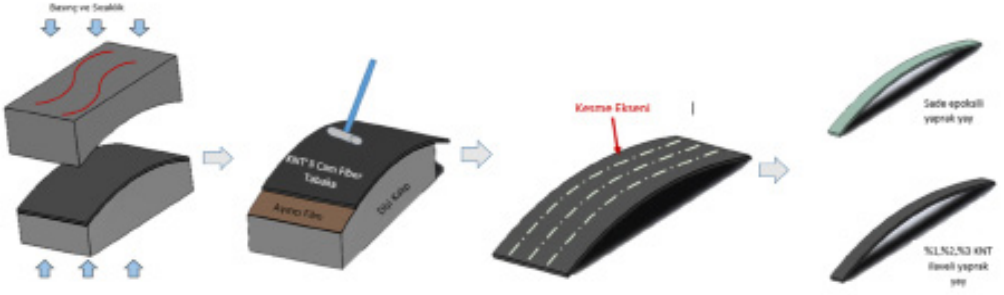
Yaprak yaylar, kompozit gövde ve çelik gözlerden oluşmaktadır. Kompozit yaprak yaylar, iki göz arası mesafe 630mm, kavis çapı 45mm, genişlik 50mm ve kalınlık 12.5 mm olacak şekilde tasarlanmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. Yaprak Yay Modeli

Yaprak Yayın Üretilmesi

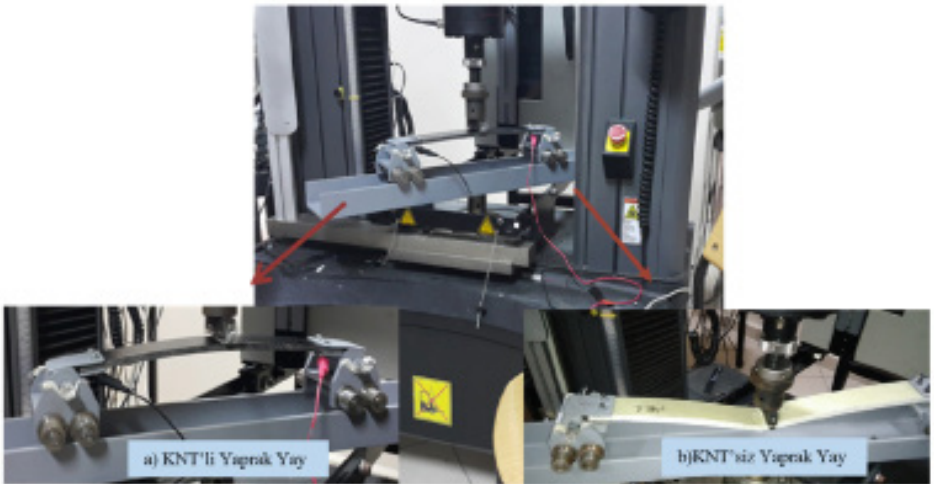
Tasarım parametreleri belirlenen yaprak yayların, elle yatırmaya uygun tek seferde 8 adet yaprak yay imalatına uygun olacak şekilde, dişi ve erkek kalıplar imal edilmiştir. Şekil 3’de gösterildiği gibi kalıbın üzerine ayırıcı film konularak, bir fırça yardımıyla matris malzemesi(KNT’li, KNT’siz epoksi) sürülerek 70 kat fiberler üst üste konularak toplam 12.5 mm kalınlık elde edilecek şekilde imalat gerçekleştirilmiştir. Üzerine erkek kalıp konularak basınç ve sıcaklık altında imalat gerçekleştirilerek, yaprak yay imal edilmiştir. Kurlenme işleminden sonra, yan testere ile 50 mm kesilerek yaprak yaylar elde edilir.



Şekil 3. Yaprak yay üretim şablonu

YAPRAK YAYLARIN STATİK TESTLERİ

Yaprak yayların statik analizi için çekme cihazına uygun olarak bir test aparatı tasarlanmıştır. Şekil 4' de çekme cihazıyla uyumlu çalışan statik test aparatının montajlı katı modelini göstermektedir. Statik test aparatı, bir adet kızak, kızaklar üzerinde az bir sürtünme ile kayabilen iki adet tekerlekli arabadan oluşmaktadır. Yaprak yaylar, her iki uçtaki gözlerinden, bir mil aracılığıyla arabaların üzerinde bulunan yuvalara sabitlenmektedir. Miller, arabanın yuvasında ve burçların gözlerinde serbest olarak hareket edebilmektedir. Böylece yaprak yayın orta noktasına uygulanan kuvvet sonucu yaprak yay uçlarından esneyebilecektir.

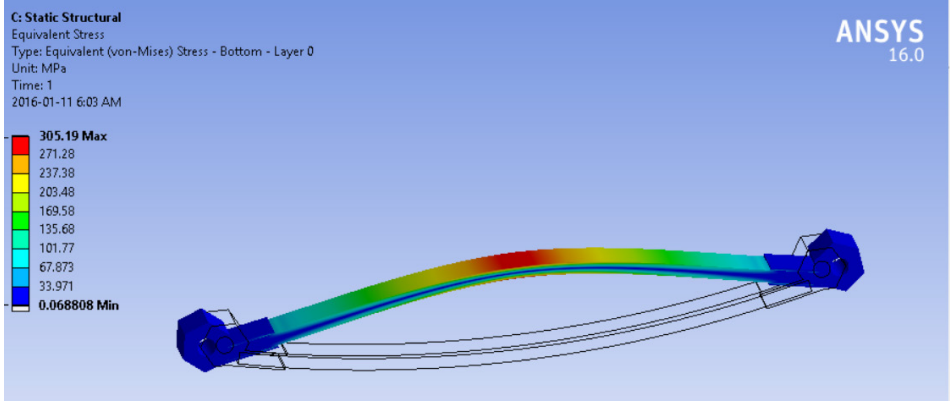


Şekil 4. Statik test a) KNT'li b) KNT'siz Yaprak yay

Şekil 4’de statik test aparatı, 5mm/dk hız ile 4 farklı tipte 16 adet numune hasara uğrayıncaya kadar uygulandı. Sonuçlar kuvvet-uzama grafiğine aktarılarak, KNT oranlarının etkisi incelendi.

SONLU ELEMENLAR ANALİZİ

Testler sonucu elde edilen mekanik özellikler, ANSYS ACP v16 programı kullanılarak, bilgisayar ortamına aktarılmış, 3 boyutlu model oluşturularak, deneysel modeldeki gibi x-y yönünde serbest z yönünde kısıtlanarak, yayın orta noktasından kuvvet uygulanmıştır(Şekil 5). Statik analiz sonucu ortalama maksimum kuvvetler baza alınarak, maksimum çökme miktarları tablo 3’de verilmiştir.



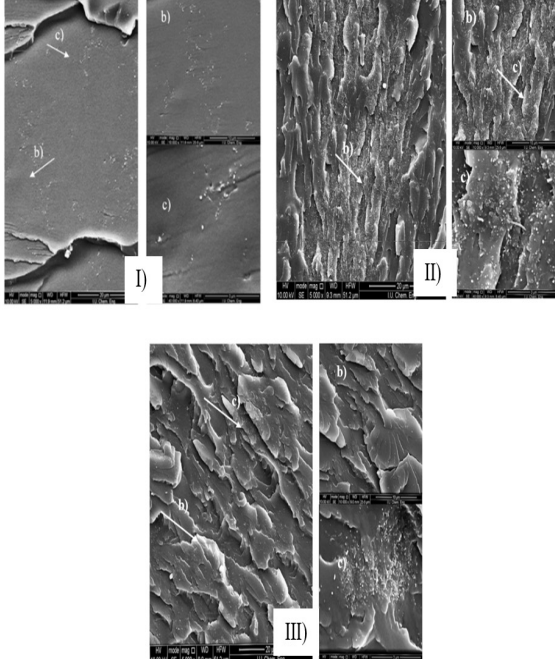
Şekil 5. Yaprak yayın 3 boyutlu çizimi ve sonlu elemanlar analizi

SONUÇ VE TARTIŞMALAR

Taramalı Elektron Mikroskop Analizleri

KNT’lerin epoksi içerisindeki dağılım seviyeleri taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir. KNT katkılı epoksi kompozitlerin yüzeyleri hasara uğratarak, şarj etkisini azaltmak için 5-8nm kalınlığında metalik altın ile kaplanarak, JEOL marka JSM 5600 cihaz ile hasarlı yüzeylerden görüntüler alınmıştır. Şekil 6’da sırasıyla %1, %2 ve % 4 KNT takviyeli epoksi kompozitlerin SEM görüntüleri yer almaktadır. %1 oranındaki KNT dağılımının epoksi içerisindeki dağılımının

daha homojen olduğu görülürken %2 ve %3 KNT oranlarında topaklanma miktarı ve topaklanma miktarına bağlı olarak da yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmektedir.



Şekil 6. I) % 1 KNT katkıli epoksi karışımı 5000 X büyütmeli II) . % 2 KNT katkıli epoksi karışımı 5000 X büyütmeli. III) % 3 KNT katkıli epoksi karışımı 5000 X büyütmeli b) 10000 X büyütmeli c) 40000 X büyütmeli SEM görüntüleri.

Yaprak Yay Malzemelerinin Mekanik Özellikleri

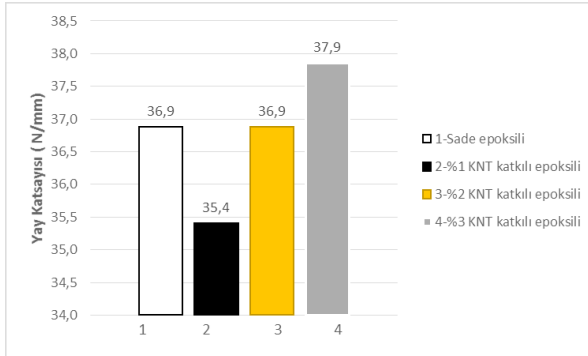
Tablo 3’de KNT oranının cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin mekanik özelliklerine etkisi görülmektedir. KNT oranı arttıkça elastisite modülünün arttığı görülürken çekme dayanımının düştüğü görülmektedir. Kompozit yapı içerisinde dağılan KNT’ler ve KNT topakları rijitliği artırıcı bir etkide bulunurken topakların gerilme yığılması oluşturması sebebiyle çekme dayanımını düşürmektedir.

Tablo 3. Yaprak yay malzemelerinin mekanik özellikleri

ÖZELLİK	SEMBOL (BİRİM)	SAF EPOKSİ	%1 KNT KATKILI	%2 KNT KATKILI	% 3KNT KATKILI
Fiber Yönü Elastisite Modülü	E_1 (GPa)	18	18.849	19.14	20.185
Fiber Yönüne Dik Elastisite Modülü	E_2 (GPa)	18	18.849	19.14	20.185
Fibere 45° Yönündeki Elastisite Modülü	E_{45} (GPa)	10.843	11.374	10.303	11.5
Kayma Modülü	G_{12} (GPa)	3.69	3.89	3.41	3.84
Poisson Oranı	ν_{12}	0.117	0.11	0.09	0.12
Fiber Yönü Çekme Mukavemeti	X_c (MPa)	350	320	305	280
Fiber Yönü Basma Mukavemeti	X_b (MPa)	192	203	210	205
Fiber Yönüne Dik Çekme Mukavemeti	Y_c (MPa)	350	320	305	280
Fiber Yönüne Dik Basma Mukavemeti	Y_b (MPa)	192	203	210	205
Kayma Mukavemeti	S (MPa)	55	50	73	63

Yaprak Yay Katsayılarının Belirlenmesi

Yaprak yay katsayıları statik test sonucu elde edilen, kuvvet-çökme grafiklerinde elastik bölgenin eğimin olduğu bölge alınacaktır. Tüm yay numunelerinde 500N' luk kuvvet altında çökmenin meydana geldiği noktadaki çökme bulunup, kuvvetin çökmeye bölünmesi ile elde edildi ($k_1 = \text{N/mm}$). Aşağıda şekil 7 'de bulunan yaprak yay katsayıları verildi. Yaprak yay katsayıları 20-40 N/mm aralığında çıktığından dolayı, kompozit yaprak yaylar taşıt süspansiyon sisteminde kullanılabilir.



Şekil 7. Yaprak yay katsayıları.

Yaprak Yayların Statik Analiz Sonuçları

Tablo 4’de yaprak yay numunelerinin statik test ve sonlu elemanlar analiz sonuçları özet olarak listelenmiştir. Yaprak yaylarda meydana gelen maksimum gerilmeler incelendiğinde ise % 1 ve % 2 KNT takviyesinin sırasıyla % 15 ve % 11 dayanım artışı meydana getirdiği görülürken, % 3 oranındaki KNT takviyesinde yaprak yay dayanımının % 3.7 oranında azaldığı görülmektedir. Bunun temel nedeni, KNT oranı belli bir değerden arttıktan sonra, topaklanmaların meydana gelmesi ve dolayısıyla malzeme içerisinde bu topaklar kusur gibi davranarak mekanik özelliklerde zayıflamaya yol açmasıdır. Bir diğer yandan %1 ve % 2 oranındaki KNT takviyesinin hasar oluşum mekanizmalarını geciktirerek yaprak yaylardaki dayanımı arttığı görülmektedir. Sonlu elemanlar analiz sonuçlarının deneysel analiz sonuçlarına yakın çıktığı görülmektedir. Bu da sonlu elemanlar yöntemiyle KNT takviyeli kompozit yapılarda mekanik özellikler doğru tespit edildiği takdirde statik analizlerinin güvenilir bir şekilde yapılabileceğini göstermektedir.

Tablo 4. Yaprak yay numunelerinin statik test ve sonlu elemanlar analizi sonuçları

			Deneysel Analiz		Sonlu Elemanlar Analizi	
	Kalınlık (mm)	Kuvvet (N)	Çökme Miktarı (mm)	Gerilme (Mpa)	Çökme Miktarı (mm)	Gerilme (Mpa)
Sade Epoksi Matrisli Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Yaprak Yay	12.5	2500	88.13	296.48	89.64	305.19
%1 KNT katkılı Epoksi Matrisli Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Yaprak Yay	12.95	3036	97.30	341.60	95.67	344.42
%2 KNT katkılı Epoksi Matrisli Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Yaprak Yay	13.3	2986	89.71	328.60	85.74	322.5
%3 KNT katkılı Epoksi Matrisli Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Yaprak Yay	14.25	3119	90.08	285.88	68.68	292.24

Literatürde yapılan çalışmalar dahilinde 680 mm uzunluğunda 60 mm genişliğinde ve 12 mm kalınlığında 55Cr3 DIN 4620 yay çeliği ile imal edilen çelik yaprak yayın toplam ağırlığı 5620 gr gelmektedir(Esen, Balikoğlu, and Arslan 2012).Benzer ölçülerle yapmış olduğumuz çalışmada gözsüz sade epoksili yaprak yay ağırlığı ortalama olarak 595 gr, %1 KNT katkılı epoksili 613 gr, %2 KNT epoksili 626 gr, % 3 KNT epoksili 637 gr gelmektedir. Her bir göz ağırlığı 500 gr olup toplam ağırlıklar minimum 1595 gr ve 1637 gr gelmektedir. Literatürde verilmiş yaprak yaya göre kompozit yaprak yay % 72 ila % 70 arasında bir ağırlık kazancı sağlamaktadır.

KAYNAKÇA

- Al-Qureshi, H. a. 2001. "Automobile Leaf Springs from Composite Materials." *Journal of Materials Processing Technology* 118(1-3):58-61.
- Bauhofer, Wolfgang, and Josef Z. Kovacs. 2009. "A Review and Analysis of Electrical Percolation in Carbon Nanotube Polymer Composites." *Composites Science and Technology* 69(10):1486-98.
- Dharap, Prasad, Zhiling Li, Satish Nagarajaiah, and E. V Barrera. 2004. "Nanotube Film Based on Single-Wall Carbon Nanotubes for Strain Sensing." *Nanotechnology* 15(3):379-82.
- Ebbesen, T. W., Lezec H. J., Hiura H., Bennett J. W., Ghaemi H. F, Thio T. 1996. "Electric Conductivity of Individual Carbon Nanotubes." *Nature* 382:54-56.
- Esen, Özden, Fatih Balikoğlu, and Nurettin Arslan. 2012. "Yorulma Analizi." 496-510.
- Gebremeskel, Shishay Amare. 2012. "Design, Simulation, and Prototyping of Single Composite Leaf Spring for Light Weight Vehicle." *Global Journal of Researches in Engineering Mechanical and Mechanics Engineering* 12(7).
- Kang, Inpil, Mark J. Schulz, Jay H. Kim, Vesselin Shanov, and Donglu Shi. 2006. "A Carbon Nanotube Strain Sensor for Structural Health Monitoring." *Smart Materials and Structures* 15(3):737-48.
- Kumar, Mouleeswaran Senthil, and Sabapathy Vijayarangan. 2007. "Analytical and Experimental Studies on Fatigue Life Prediction of Steel and Composite Multi-Leaf Spring for Light Passenger Vehicles Using Life Data Analysis." 13(2):141-46.
- Lee, Jeong-O., C. Park, Ju-Jin Kim, Jinhee Kim, Jong Wan Park, and Kyung-Hwa Yoo. 2000. "Formation of Low-Resistance Ohmic Contacts between Carbon Nanotube and Metal Electrodes by a Rapid Thermal Annealing Method." *Journal of Physics D: Applied Physics* 33(16):1953-56.
- Li, Jing, Peng Cheng Ma, Wing Sze Chow, Chi Kai To, Ben Zhong Tang, and Jang Kyo Kim. 2007. "Correlations between Percolation Threshold, Dispersion State, and Aspect Ratio of Carbon Nanotubes." *Advanced Functional Materials* 17(16):3207-15.
- Patunkar, M. M., and D. R. Dolas. 2011. "Modelling and Analysis of Composite Leaf Spring under the Static Load Condition by Using FEA." 1(1):2-5.
- Sancaktar, Erol, and Mathieu Gratton. 1999. "Design, Analysis, and Optimization of Composite Leaf Springs for Light Vehicle Applications." *Composite Structures* 44(2-3):195-204.

- Shokrieh, Mahmood M., and Davood Rezaei. 2003. "Analysis and Optimization of a Composite Leaf Spring." *Composite Structures* 60(3):317–25.
- Thostenson, Erik T., and Tsu W. Chou. 2006. "Carbon Nanotube Networks: Sensing of Distributed Strain and Damage for Life Prediction and Self Healing." *Advanced Materials* 18(21):2837–41.
- Zhang, Lei, and Geng Shu Tong. 2008. "Elastic Flexural-Torsional Buckling of Thin-Walled Cantilevers." *Thin-Walled Structures* 46(1):27–37.

5. Bölüm

AUTOMED:

Çoklu İlaç Takibi Sağlayan Akıllı İlaç Takip Otomatı ve Mobil Uygulaması

Arş. Gör. Ersin ERTÜRK

*İstanbul Üniversitesi- Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi,
ersin.erturk@iuc.edu.tr
0000-0002-7198-9210*

Furkan GÜNEŞ

*Öğrenci, Atatürk Üniversitesi, Tıp Fakültesi,
dr.furkangunes@hotmail.com
0000-0002-6733-6997*

Mehmet Enes ONUŞ

*Öğrenci, Sabancı Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi,
eonus@sabanciuniv.edu
0000-0002-7386-2918*

Nureddin KAMADAN

*Öğrenci, Sabancı Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi,
nkamadan@sabanciuniv.edu
0000-0002-9548-3601*

ÖZET:

Dünya sağlık örgütü verileri insanların yaşı ilerledikçe, hastalıkların tedavisinde kullanılan ilaç sayısının arttığını ortaya koymaktadır. İlaç kullanımının insanların kaliteli ömür sürmesinde önemli bir yere sahip olduğu bilinmektedir. Ancak ilaç kullanımının düzenli ve doğru bir şekilde yapılmaması halinde is-

tenmeyen durumlar ortaya çıkmaktadır. Bu kapsamda insanların ilaç kullanım- larını düzenlemeye ve takip etmeye yönelik çalışmalar da giderek önem kazan- maktadır. İlaç alma düzeninde sorunlar yaşayan yaşlı bireyler, kimi zaman ilaç içmeyi unutturken kimi zaman doz hatası yapmaktadır. Mevcut sistemler, bu gibi durumlar için yetersiz kalmakla birlikte alınan ilaçların takip edilmesinde de çok sınırlı çözümler sunmaktadır. Burada özel bir başlık da Covid-19 döneminde ai- lelerinden uzak kalan yaşlı bireyler için açılabilir. Bu bireylerin, salgın döne- minde ilaçlarının takip edilmesi bir hayli güçleşmiştir. Bu çalışmada her yaştan bireyin ilaçlarını düzenli alabilmesini sağlayacak olan AUTOMED isimli plat- form kurulmuştur. Platform, elektronik ilaç otomatı ve bu cihazla entegre çalışan mobil uygulama olmak üzere iki ana bileşenden oluşmaktadır. İlaç otomatına 6 farklı ilaç konulabilmektedir. Sistem vakti gelen ilaçları kullanıcıya otomatik ola- rak sunacak şekilde tasarlanmıştır. İlaç alma zamanlarında mobil uygulamadan bildirim gelmekte ve ilaçların zamanı geçmeden alınması sağlanmaktadır. Sistem yanlış doz ve zamanlama gibi problemleri ortadan kaldırmaktadır. Bunun için özel bir mekanik sistem tasarımı yapılmış olup bu sistem gerekli gömülü donanım yazılımları ile desteklenmiştir. Bununla birlikte sahip olduğu mobil uygulama entegrasyonu sayesinde; alınmayan ilaçların takibi yapılabilmekte ve bildirim gönderilerek hasta yakınları uyarılabilmektedir.

Anahtar Sözcükler: İlaç takibi, tedavi, polifarmasi, doz hataları, yaşlılar

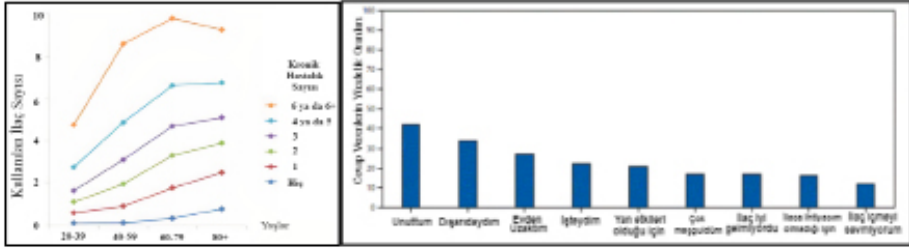
GİRİŞ

Birleşmiş Milletler'in 2017 verilerine göre, dünyada 60 yaş ve üzerinde yaklaşık 962 milyon birey bulunmakta olup Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ), 60 yaş ve üzerindeki bireyleri 'yaşlı' olarak tanımlamaktadır (WHO, 1999). 2050 yılına kadar 2 milyar nüfusa sahip olacağı tahmin edilen yaşlı bireyler, kronik hastalıklara en çok yakalanan kitleyi oluşturmaktadır. Araştırmalara göre yaşlıların %91'i en az bir, %73'ü ise iki veya daha fazla kronik rahatsızlığa sahiptir (NCOA, 2012). Hipertansiyon, yüksek kolesterol, iskemik kalp, diabetes mellitus, kalp yetmezliği, Alzheimer en yaygın görülen kronik hastalıklardır (NCOA, t.y.). Yaşlıların büyük çoğunluğunda görüldüğü tespit edilen kronik hastalıklar; genel olarak 1 yıl veya daha uzun süren ve sürekli tıbbi müdahale gerektiren hastalıklar olarak tanımlanmaktadır (CDC, t.y.). DSÖ verilerine göre, tüm ölümlerin neredeyse %60'ını ve küresel hastalık yükünün %43'ünü bu hastalıklar oluşturmaktadır. Yapılan araştırmalara göre her yaştan birey, kronik hastalıklara sahip olabilmekte ve insanlar yaşlandıkça kronik hastalıkları artmaktadır (CMS, 2012).

Kronik hastalıkların tedavisinde; ameliyat, fizik tedavi, psikolojik terapi ve radyoterapi gibi farklı yöntemler kullanılmakta olup en yaygın tedavi yöntemi ise ilaç tedavisidir (Sav ve diğ., 2015). Bu doğrultuda; yaşlılar başta olmak üzere milyonlarca insan, hastalıklarının tedavisi sürdüğü müddetçe çeşitli ilaçları kullanarak hayatlarına devam etmektedir. Yapılan çalışmalar ise yaş ile kullanılan ilaç sayısı arasında doğru orantı olduğunu göstermekte olup şekil 1'de görülmektedir (Payne, 2016). Buradan dünya nüfusunun önemli bir kısmının düzenli olarak ilaç kullandığı anlaşılmaktadır.

Tek bir hasta tarafından aynı anda beş veya daha fazla ilaç kullanılması ise 'Polifarmasi' olarak tanımlanmaktadır (Jaul ve Barron 2017). Şekil 1'e göre polifarmasi, 20 yaşından itibaren insanlarda görülebilmektedir. Bununla beraber dünyada, 75 yaşın üzerindeki yaşlılarda polifarmasi olan birey sayısı yaklaşık olarak 320 milyondur (Chrischilles ve diğ., 2007). Sonuç olarak her 2 ila 3 yaşlıdan birinin sürekli kullanması gereken birden fazla ilacın olduğu gözlemlenmektedir. Ayrıca yapılan çalışmalar, orta yaşlı (40-60 yaş) ve yaşlı popülasyonlarda polifarmasinin giderek yaygınlaştığını da göstermektedir (Cadogan ve diğ., 2016). Yaşamlarına her gün düzenli olarak kullanması gereken ilaçlarla devam eden hastalar, genellikle ilaçlarını doğru kullanma konusunda sorunlar yaşamaktadır.

Yapılan araştırmalardan hastaların neredeyse %50'sinin ilaçlarını reçete edildiği şekilde kullanmadığı anlaşılmaktadır (Brown ve diğ., 2011). Bununla beraber hastaneye başvuran her 10 kişiden 1'inin hastaneye başvuru nedeninin 'yanlış ilaç kullanımı' olduğu bilinmektedir (Edlund,2004). Şekil 2'de, ilaçları reçetelendiği şekilde almayan hastaların, ilaçlarını kullanmayı ihmal etme nedenleri gösterilmektedir (Neiman ve diğ., 2017). Veriler incelendiğinde ilacını vaktinde kullanmayan hastaların ilaçlarını alamama nedenlerinin başında 'unutkanlık' gelmektedir. Bunu 'dışarıda olma' ve 'evden uzak olma' nedenleri takip etmektedir. Yapılan bir başka araştırmaya göre en sık görülen ilaç hatası, ilacın yanlış dozda veya periyotta kullanılmasıdır (Braun, t.y.). Bu tür ilaç hatalarının %41'i klinik olarak olumsuz sonuçlanmaktadır (Fitzgerald, 2009). Ayrıca yanlış ilaç kullanımının, yılda en az 1,5 milyon hastanın sağlığına zarar verdiği tahmin edilmektedir (Edlund, 2004). Bunun sonucunda hastalar, önemli sağlık sorunlarına ek olarak psikolojik sorunlar yaşamakta ve fiziksel ağrılar çekmektedir (Tam ve diğ., 2005).



Şekil 1. Dünya Genelinde Kronik Hastalıkların Yüzelik Dağılımları (Payne, 2016)

Şekil 2. ABD'de Hastaların İlaçlarını Doğru Kullanmama Nedenleri ve Yüzelikleri (Neiman ve diğ., 2017)

Yapılan ilaç hataları, ciddi sağlık problemlerinin yanında yüksek maddi kayıplar ile de sonuçlanmaktadır. İlaç hatalarının, yılda yaklaşık 100 milyar dolarlık maddi bir kayba neden olduğu tahmin edilmektedir (Brown ve diğ. 2011). Ayrıca polifarmasi hastalarının ilaçlarını kullanım şekli, ilacın tedaviye etkisini etkilemektedir. Özellikle dozların reçetelendiği şekilde alınmamasının ilacın klinik etkinliğini düşürdüğü gözlemlenmektedir (Palleria ve diğ., 2013). Bununla beraber ilaçların birbirine teması sonucu oluşabilen ilaç-ilaç etkileşimleri, tedavinin başarısını olumsuz etkileyebilmektedir (Palleria ve diğ., 2013). Dolayısıyla hastanın, ilaçlarının birbirine uzun süreli teması konusunda dikkatli olması ve ilaçlarını reçete edildiği şekilde kullanması tedavi süreci için önem

arz etmektedir.

Görüldüğü üzere hastalıkların tedavisinde önemli bir yere sahip olan ilaçların özellikle yaşlı bireyler tarafından hatalı kullanımları çok sık karşılaşılan bir durum olup, önemli sağlık problemlerine yol açmaktadır. Bu problemleri ortadan kaldıracak teknolojik çözümlerin geliştirilmesi gerektiği açık bir şekilde ifade edilebilir. Buradan hareketle yapılan çalışmada; ilaç kullanan bireylerin ilaçlarını düzenli ve doğru dozda almalarını sağlayacak bir akıllı cihaz üretilmiş olup bu cihazla entegre çalışan bir mobil uygulama geliştirilmiştir. Bu sistem sayesinde; hastalar reçetelenen ilaçları doğru kullanabilecek böylece tedavi uyumları üst seviyelere çıkacaktır. Ek olarak hastaların ilaç takipleri kolaylaşacak, yanlış kullanımlar sonucu ortaya çıkan maddi zararlar ortadan kalkacaktır.

İlaç Takibi İçin Geliştirilmiş Ürün ve Hizmetler

İlaç takibi ile ilgili çözüm arayışı daha önce de araştırmacıların ve mühendislerin dikkatini çekmiş olup bu alanda ürün ve hizmet çalışmaları farklı gruplar ve şirketler tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu alanda yapılan çalışmalar detaylı bir şekilde incelenerek mevcut sistemlerin eksikleri tespit edilmiştir. İncelenen çalışmalardan öne çıkanların, farklı firmalar tarafından üretilen benzer görünüş ve mekanizmaya sahip ürünler oldukları tespit edilmiştir. Yapılan çalışmalardan ‘Ellie-Smart Pill Box’ isimli ticari ürün, ilaç takibi için geliştirilmiş olmasına rağmen polifarmasi hastalarına hitap edememiştir (EllieGrid, t.y.). Birçok şirketin benzer tasarımda ürettiği alarmlı yuvarlak sistemlerde ise polifarmasi hastalarına hitap edilebilmesine karşın ilaç-ilaç temaslarının önüne geçilememiştir. Küçük boyutuyla taşınabilirlikte ön plana çıkan ‘Memo Box’ isimli ticari ürün ise az sayıda ilaç takibiyle özellikle yaşlı hastaların kullanımında yetersiz kalmıştır (Tinylogics, t.y.).

Genel bir değerlendirme yapıldığında bu sistemler, cihazın alarm vermesinin ardından yalnızca açılan belli bölmelerden ilaç alınmasına izin verecek şekilde tasarlanmıştır. Ancak aynı bölmeden birkaç ilaç alınmasının önüne geçilmemiş ve ilaçların birbiriyle temasının kesilmemiş olması doz hatalarıyla birlikte ilaç deformasyonlarına yol açmaktadır. Ek olarak ilaçların alınıp alınmadığına dair kontrol mekanizmaları bulunmamaktadır. Bu sistemler, 100-250 dolarlık fiyat etiketlerine sahiptir.

AMAÇ

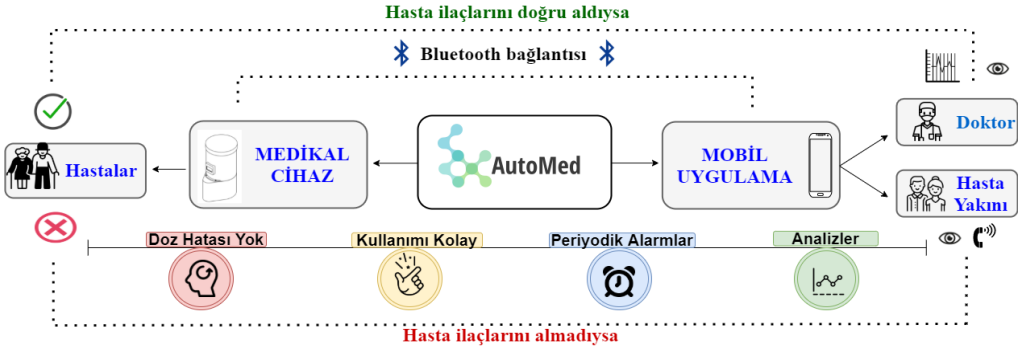
Bu çalışmada ilaç kullanan bireyler için; altı farklı ilaca kadar ilaçların programlanan vakitlerde alınmasını otomatik bir şekilde sağlayan ve ilaç kullanım istatistiklerini bulut sisteminde depolayarak bu verileri hasta yakınının ve hekimin ulaşmasına imkân veren bir ilaç otomatının üretilmesi ve entegre çalıştığı mobil uygulamanın geliştirilmesi hedeflenmiştir.

Geliştirilen sistemin ile;

- Bireylerin ilaçlarını düzenli ve doğru dozda almalarını sağlamak,
- Polifarmasi hastalarının tüm ilaçlarının aynı anda takibini sağlamak (6 farklı ilaç takibi),
- Alzheimer-demans hastaları ve yaşlıların yaptığı ilaç hataları başta olmak üzere yapılan tüm ilaç-doz hatalarının engellenmesi,
- Hastalar ve hasta yakınları üzerindeki ilaç takip yükünü kaldırmak,
- Hasta yakını ve doktor nerede olursa olsun hastanın ilaç içme verilerine ulaşmasını sağlamak ve hasta ilacını içmediğinde kayıt tutulmasını sağlamak,
- Hastaların ilaç tedavisine uyumunun %50'den daha yüksek seviyelere çıkmasını sağlamak,
- İlaçların birbirleriyle ve oksijenle temasını azaltılarak ilacın deforme olmasının önüne geçilmesi hedeflenmiştir.

YÖNTEM VE BULGULAR

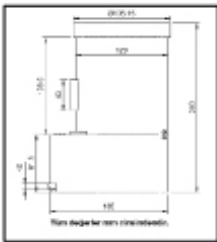
Çalışma kapsamında bir ilaç otomatının tasarlanması ve prototip cihazın üretilmesi hedeflenmiştir. Üretimi gerçekleştirilen ve AUTOMED adı verilen sistem; ilaç kullanan bireylerin ilaçlarını düzenli ve doğru dozda almalarını sağlayan bir otomat ve bununla entegre çalışan bir mobil uygulamadan oluşmaktadır. Şekil 3'te çalışmanın genel şeması verilmiştir. Çalışma kapsamında prototipi geliştirilen sistemin yapım basamakları; endüstriyel tasarım, elektromekanik tasarım ve mobil uygulama olmak üzere 3 ana başlık altında incelenebilir.



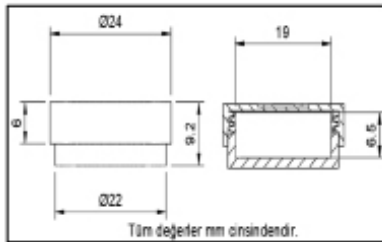
Şekil 3. AUTOMED'in Genel Şeması

Endüstriyel Tasarım

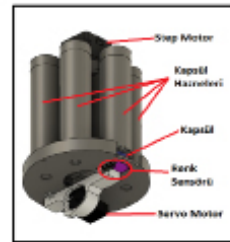
Çalışma kapsamında ilaç otomatının tasarlanması için Autodesk Fusion 360 isimli 3 Boyutlu modelleme programı kullanılmıştır. Prototip olarak hazırlanan ve ilerleyen aşamada çok daha küçük boyutlara getirilecek olan ilaç otomatının en-boy-yükseklik olarak ölçüleri; 135x168x232 mm'dir. Çalışmanın boyutlarının gösterildiği teknik çizimler Şekil 4'te paylaşılmıştır. Çalışmada özel olarak içine bir ilaç konulacak şekilde hava geçirmeyen ilaç kapsülleri tasarlanmıştır. 6 farklı renkte tasarlanan kapsüllerin renkleri; siyah, kırmızı, yeşil, mavi, turuncu ve gridir. Kullanıcının görme engelli olma ihtimaline karşın kapsüllerin üstlerinde harf kabartmaları yapılmış, bu sayede kapsüllerin tanınması kolaylaştırılmıştır. İlaç kapsüllerinin her biri aynı boyutta olup kapsül, draje ve tablet şeklinde olan ilaçların standart boyutları göz önünde bulundurularak tasarlanmıştır (Capsule Supplies, t.y.). Buna göre her bir kapsülün boyutu 24x24x9,2 mm olup Şekil 5'te kapsüllerin boyutları gösterilmiştir.



Şekil 4. İlaç Otomatının Teknik Çizimi ve Ölçüleri



Şekil 5. İlaç kapsüllerinin boyutları

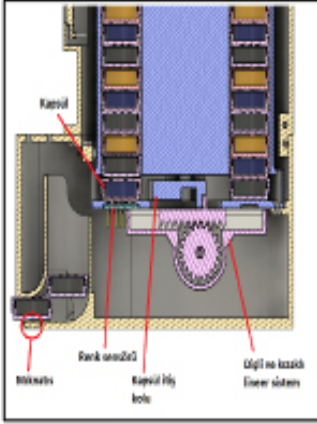


Şekil 6. İlaç Kapsül Hazneleri ve diğer iç parçaları

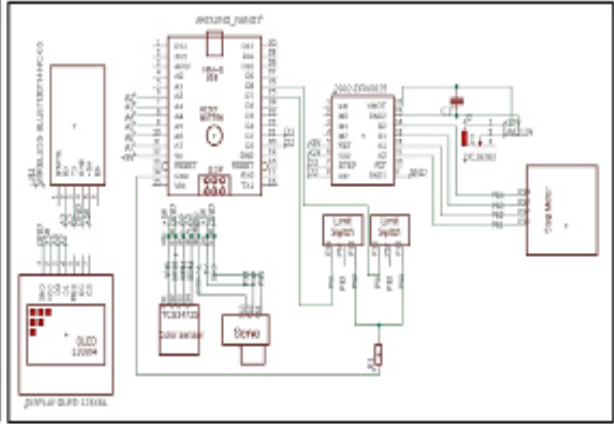
Şekil 6’da gösterilen silindirik görünümündeki kapsül hazneleri on dört adet ilaç kapsülü kapasitesine sahiptir. 6 adet hazne bulunmaktadır. Dolayısıyla ilaç otomatı, toplamda 84 adet ilaç kapasitesine sahiptir. Cihazın çalışma prensibi; aynı renkteki kapsüllere, aynı ilacın konulması üzerine inşa edilmiştir. Bu sayede cihaz, 6 farklı ilacı aynı anda hava teması olmayacak şekilde muhafaza edebilmekte ve ilaç-ilaç teması olmadığı için olası deformasyonların önüne geçebilmektedir. Cihazın kullanıcıya ilaçlarını vermesini sağlayacak kurulum işlemi ise mobil cihaz aracılığıyla alarm kurularak yapılmaktadır. Hangi ilacın hangi renkteki kapsülde olduğu bilgisi mobil cihaza kullanıcı tarafından girilir ve kapsüllerin rengi ile ilaçlar mobil uygulamada eşleştirilir. Ayrıca cihazın çalışma mekanizması, mobil uygulamadan cihazın bluetooth sensörüne gelen kapsül rengi bilgisi üzerine kurulmuştur. Mobil cihazdan gelen renk bilgisi doğrultusunda kapsül hazneleri renk sensörü aracılığıyla taranır ve doğru renk tespit edildiğinde kapsül cihaz çıkışına gönderilir. Tarama işlemi haznelerin dairesel hareketler yaparak sırayla renk sensörünün üstüne gelmesi ve renk sensörünün var olan kapsülün rengini tanıması şeklinde yapılmaktadır. 6 hazne olduğu için her bir tarama için 60 derecelik bir dairesel hareket yapılır ve bu hareket step motor aracılığıyla sağlanmaktadır. Dairesel hareketin kontrol mekanizması, step motorla yapılan 60 derecelik dönüşlere ek olarak bir adet limit switch ile desteklenmiştir. Bu kontrol mekanizması sayesinde kalibrasyon sorunlarının yaşanması engellenmiştir. Kapsülün cihaz çıkışına gönderilmesi, Şekil 7’de gösterilen dişli ve kızak sistemine bağlı olan servo motorun itiş kolu yardımıyla gerçekleşir. Cihazın kapsül çıkışı, tek seferde bir kapsül alımına izin verecek şekilde tasarlanmıştır. Kapsüllerin içinde ve kapsül çıkışında bulunan mıknatıs aracılığıyla çıkışa gelen kapsüllerin sabit kalması sağlanmıştır. Aynı zamanda çıkışta bulunan limit switch aracılığıyla ilacın alınıp alınmadığı sürekli olarak kontrol edilmektedir. Böylece alınması gereken ilacın takibi yapılmakta ve ilaç kullanım istatistikleri tutulabilmektedir. Bu istatistiki bilgiler mobil uygulamaya analiz edilmek ve depolanmak üzere gönderilmektedir. Şekil 7’de kapsül çıkış haznesi ve çıkış mekanizması gösterilmiştir. Cihaz içerisinde kullanılan elektronik parçalar dinlenme halinde 0.3-0.8 watt/saat, motorlar çalışır haldeyken 6-10 watt/saat arası elektrik tüketimi yapmaktadır. Ayrıca cihaz, tek şarjda 86 saat bekleme süresi sunmaktadır.

Elektromekanik Tasarım ve Uygulama

Cihazın çalışma mekanizması Atmega328 mikro kontrolcüsüne sahip olan Arduino Nano aracılığıyla yönetilmektedir. Devre içerisinde 1 adet Arduino Nano, 1 adet DRV8825 Step motor sürücüsü, 1 adet NEMA 14 step motor, 1 adet HC06 bluetooth sensörü, 1 adet TCS34725 RGB renk sensörü, 2 adet limit switch, 1 adet OLED ekran, 1 adet 2600 mAh 11.1V li-ion pil ve 1 adet servo bulunmaktadır. Şekil 8’de cihazın elektronik devre şeması bulunmaktadır. Cihazın kodlanması Arduino IDE üzerinde yapılmıştır. Cihazın mobil cihazlarla iletişime geçmesi ise Bluetooth aracılığıyla sağlanmaktadır. Cihazın çalışma algoritmasında ilk cihaz açılışında step motorların kalibrasyonu ve diğer sensör ve switchlerin çalışma durumu kontrol edilmekte, herhangi bir hata varsa bu hata OLED ekranda gösterilmektedir. Sonrasında cihaz bekleme moduna geçmekte ve Bluetooth üzerinden uyarılmayı beklemektedir. Bluetooth üzerinden verilen uyarı kendi içerisinde hastaya verilecek kapsül rengini de barındırmaktadır. Kapsül rengi bilgisi alındıktan sonra renk sensörü devreye girer ve görünürde var olan kapsülü tarayarak işleme başlar. Eğer var olan kapsül istenen renkte ise kapsül, servo motorla çalışan lineer sistem tarafından çıkışa doğru itilir ve hastanın kapsülü alması beklenir, kapsül istenen renkte değilse step motor devreye girer ve 60 derecelik dönüşler yaparak doğru kapsülün bulunmasını sağlar. 5 dönüş sonunda istenen kapsül rengi bulunamazsa cihaz “Kapsül bulunamadı” hatası verir ve bunu OLED ekranda belirtir. Eğer istenen kapsül bulunduysa OLED ekran üzerinde çıkışta bulunan ilacın ismi ve kapsül rengi yazar. Kapsül çıkışında kapsül bulunduğu sürece kapsül çıkış borusunun kenarında bulunan limit switch uyarılmış halde bulunur ve bu uyarılma hali anlık olarak değişirse kapsülün çıkıştan alındığı bilgisi kaydedilerek var olan ilacın alındığı bilgisi bluetooth aracılığıyla mobil cihaza yollanır. Burada gerekli kayıtların mobil uygulamada tutulması sağlanır. Eğer ilaç belirli bir süre ilaç alınmazsa hasta yakınına bildirim gönderilir ve OLED ekran aracılığıyla uyarı mesajı verilir.



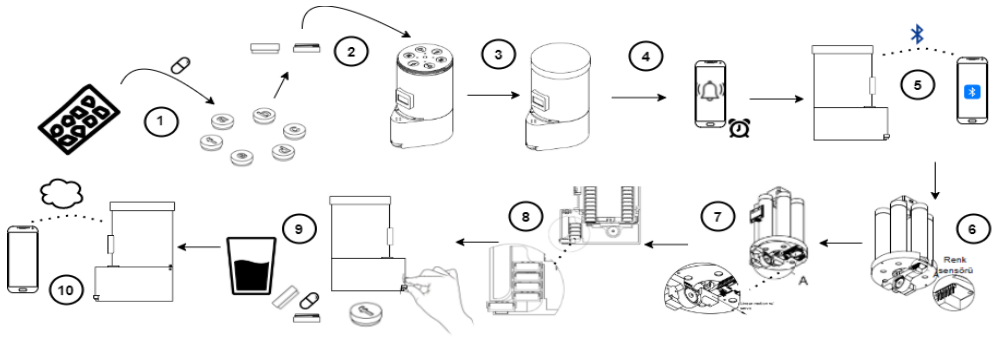
Şekil 7. İlaç Otomatının Kapsül Çıkış Haznesi



Şekil 8. AUTOMED İlaç Otomatının Elektronik Devre Şeması

Mekanik Sistemin Çalışma Mekanizması

AUTOMED ilaç otomatının mekanik sistemi, kullanıcının rahatça kullanılabileceği şekilde tasarlanmıştır. Kullanıcının sistemi kullanırken gerçekleşen işlemlere ait akış şeması Şekil 9’da gösterilmiştir.



Şekil 9. AUTOMED Mekanik Sisteminin Kullanım Adımları

AUTOMED sisteminin kullanım adımlarına(şekil-9) dair açıklamalar aşağıda sunulmuştur;

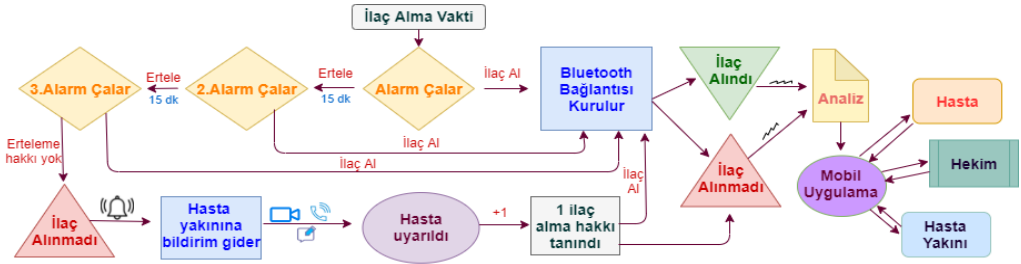
1- Hasta ya da hasta yakını ambalajından ilaçları çıkartıp aynı tip ilaçları aynı

- renkteki ilaç kapsüllerine koyar. (Bu ilaçlar mobil uygulamada kullanıcı tarafından doğru renklere tanımlanmıştır)
- 2- Kapsüllere konulan ilaçlar, ilaç kapsüllerinin kapakları sıkıca kapatıldıktan sonra cihazın kapsül haznelere konulur.
 - 3- Cihazın kapağı kapatılır. Cihaz kapağını mobil uygulamadan ilaç doldurma emri gelinceye kadar kilitler.
 - 4- İlaç alma vakti geldiğinde mobil uygulamanın alarmı çalar.
 - 5- Mobil uygulamadan “ilaç alımını kabul et” tuşuna bastığında bluetooth bağlantısı yoksa kullanıcı, cihaz ile mobil platform arasında bluetooth bağlantısı kurar. Ertele tuşuna basılırsa 15 dk erteleme yapılır.
 - 6- Mobil uygulamadan ‘ilaç al’ tuşuna basıldığında cihaz, ilgili ilaç kapsülünü, rengini taradığı ilaç kapsülleri arasından bulur.
 - 7- Alınması gereken ilaç kapsülünün tespit edilmesinin ardından lineer sistem harekete geçer ve alınacak ilaç kapsülünü ilaç çıkışına ittirir.
 - 8- İlaç çıkışına giren ilaç kapsülü mıknatıs sayesinde çıkışa doğru çekilir ve limit switch vasıtasıyla ilacın alınıp alınmadığı kontrol edilir.
 - 9- Hasta ilaç kapsülünü ve kapsüllerini cihazdan alır, kapakları açar ve ilacını içer.
 - 10- Hangi ilaçların içilip içilmediği bilgisi analiz edilmek üzere mobil uygulamaya veri olarak gönderilir. 6., 7., 8. basamaklar o anda alınması gereken her bir ilaç için tekrarlanır. O anda alınması gereken 5 ilaç var ise kullanıcı, aynı ekranda çıkan 5 farklı butona basar. Bu sayede ilaçlar hastaya sırasıyla verilir ve hangi ilaçların alınıp alınmadığı bilgisi de edinilmiş olur.

Mobil Uygulama

Geliştirilen donanımın işlevsel bir şekilde kullanılabilmesi için kullanıcı kolaylığı ve çeşitliliği gözetilerek bir mobil uygulama geliştirilmiştir. Geliştirilen mobil uygulama donanım ile Bluetooth bağlantısı kurarak haberleşmektedir. Uygulama aracılığıyla kullanıcılar ilaçları için alarm kurabilmekte ve bu sayede ilaçlar için zaman yönetimini otomatikleştirmektedirler. Aynı zamanda mobil uygulamayla entegre çalışan donanım sayesinde; hastaların hangi ilacı alacaklarını

karıştırmaları önlenmektedir. Mobil uygulamaya ait akış diyagramını Şekil 10'da sunulmuştur.



Şekil 10. AUTOMED Mobil Uygulamasının Akış Diyagramı

Çalışmanın mobil uygulaması Android Studio platformu kullanılarak geliştirilmiştir. Mobil uygulama 4 ana kısımdan oluşmaktadır. Bunlar; giriş ekranı, alarmı kurulmuş ilaçların sergilendiği sayfa, ilaçlar için alarm kurma sayfası ve Bluetooth bağlantı sayfasıdır.

Mobil uygulamada kullanıcı ve ilaç bilgilerinin depolanabilmesi için Firebase gerçek zamanlı veri tabanı sistemi kullanılmaktadır. Firebase, bulut destekli bir NoSQL veri tabanı sistemidir. Bu sistem, bulut destekli olması ve Google'ın güvencesi altında olması nedeniyle birçok avantaj sağlamaktadır. Bu avantajlardan en önemlisi, verilerin güvencesi ve iyi geliştirilmiş bir dokümantasyona sahip olmasıdır. Buna ek olarak artan kullanıcı sayısı ile veri tabanının yeniden ölçeklendirilmesi de kolay bir şekilde yapılabilmektedir.

Mobil Uygulamanın Geliştirilmesi

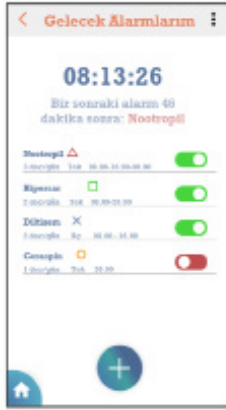
Donanımla entegre hale getirilmiş bulunan mobil uygulama Android Studio platformunda minimum SDK API:19 Android 4.4 (Kitkat) olacak şekilde geliştirilmiştir. Seçilen minimum SDK değerine göre geliştirilen mobil uygulamanın Dünya genelindeki Android cihazların yaklaşık olarak %98,1'inde çalışması öngörülmektedir. Bu API seçiminin yapılmasında geliştirilen cihazı kullanması öngörülen kişilerin yaş ortalaması ve buldukları gelir düzeyi etkili olmuştur. Geliştirilen uygulama Google şirketinin bulut destekli gerçek zamanlı veri tabanı sistemi olan Firebase ile entegre edilmiştir. Kullanıcıların kayıt bilgileri, ilaç bil-

gileri ve uygulama içi istatistikleri bu veri tabanında saklanmaktadır.

AUTOMED mobil uygulamasında sayfalar arasındaki hiyerarşinin ve sayfalar arasındaki gezintinin kolay ve anlaşılır olması hedeflenmiştir. Aplikasyonun 3 farklı hesaptan oluşmaktadır. Bu hesaplar şu şekildedir: Hasta hesabı, Doktor hesabı, Hasta yakını hesabı.



Şekil 11. Örnek
'İlaçlarım' Sayfası



Şekil 12. Gelecek
Alarmlarım Sayfası



Şekil 13. İlaç Uyum
Grafığı

Hasta ana sayfasında 4 alt menü bulunur. Bu menüler şu şekildedir: İlaçlarım, Gelecek Alarmlarım, İlaç Alım Şekillerim, Geçmiş. 'İlaçlarım' menüsünde alarmı en yakın olan ilaç, alarm saati ve ilacın bulunduğu kapsüle dair bilgiler bulunmaktadır. Bu sayfada kişinin kullandığı tüm ilaçlar alt alta sıralanmıştır. Şekil 11, ilaçlarım sayfasına ait görsel bulunmaktadır. 'Gelecek Alarmlarım' menüsünde alarmı en yakın olan ilaçlar, alarm saatleri ve ilaçların bulunduğu kapsüle dair bilgiler bulunmaktadır. Şekil 12'de 'Gelecek Alarmlarım' örnek sayfası gösterilmiştir. Şekil 13'te ilaç uyum grafiği sayfası örneği bulunmaktadır. Hasta yakını ve doktor sayfasından ise hastanın ilaç kullanım istatistikleri detaylı şekilde takip edilebilmektedir.

SONUÇLAR

Elektronik mekanizmanın çalışma hassasiyetinin test edilmesi amacıyla deneyler yapılmıştır. Yapılan deneylerde renk sensörünün renk tarama doğruluğu ve step motorun açma değerlerinin doğruluğu test edilmiştir. Deneyler sırasında cihazın çalışması simüle edilerek farklı zaman aralıklarında farklı sinyaller gönderilerek cihazdan geri gelen dönüşlerin doğruluk oranları kaydedilmiştir. Alınan geri dönüşler doğrultusunda; mekanik sistemin kodları üzerinde, kapsül renklerinde ve tasarımda gerekli değişiklikler yapılmış ve optimum çalışma doğruluğuna ulaşılmaya çalışılmıştır.

Tablo 1. Mekanik Sistem Üzerinde Yapılan Deneyler ve Sonuçları

1. Deney (50 kez)	2. Deney (25 kez)	3. Deney (100 kez)
Renk sensörünün doğru kapsülü tespit etme oranı: %86	Renk sensörünün doğru kapsülü tespit etme oranı: %92	Renk sensörünün doğru kapsülü tespit etme oranı: %100
Step motor ortalama açma sapması: 2 derece	Step motor ortalama açma sapması: 1 derece	Step motor ortalama açma sapması: <1 derece
Sonuç: Renk sensörü ve step motorda hassas ayarlamalar ve kalibrasyon yapıldı.	Sonuç: Renklere atanan RGB değer aralıkları büyütüldü. Step motor limit switch ile desteklendi.	Sonuç: Cihazın hatasız çalışmasını sağlayacak çalışma olanaklarına ulaşıldı.

Tablo 1’de mekanik sistem üzerinde yapılan 3 farklı deneye ait sonuçlar ve tespit edilen hataların giderilmesi için yapılan çalışmalar gösterilmiştir.

Bu çalışmada her yaşta bireyin ilaçlarını düzenli alabilmesini sağlayacak olan AUTOMED isimli platform kurulmuştur. Üretilen cihaz ve geliştirilen mobil uygulama ile ilaç kullanım hatalarının önüne geçilmekte, tedaviye uyumun artmasına katkı sağlanmaktadır. Geliştirilen cihazla entegre çalışan mobil uygulama sayesinde hasta yakınlarının ve hekimlerin hastaların ilaç kullanım verilerine ulaşabilmesi planlanmaktadır. Bu sayede hekimin tedavi planlamasında hastanın ilaç kullanım verilerini kullanabilmesi ve hasta yakınlarının bilgilendirilmesi hedeflenmiştir. Bununla beraber sistemde sunulan hangi ilacın alındığı bilgisi ve

cihaz kapağı kilidi sayesinde Alzheimer (Tip 1) ve demans hastaları gibi unutkan kullanıcıların doz hatalarının önüne geçilecektir. Ayrıca üzerinde kabartmalı harfler bulunan ilaç kapsülleri ve sistemden yapılan sesli bilgilendirmeler sayesinde görme engellilerin cihazı kolayca kullanımı sağlanmıştır.

Geliştirilen sistem daha küçük tasımlara entegre edilerek taşınabilir hale getirilebilir. Veri depolama ve mobil cihazlar ile haberleşmenin daha etkin yapılabilmesi için cihazın internet bağlantısı ile çalışabilmesine olanak sağlayacak teknolojik iyileştirmeler yapılabilir. Buna ek olarak İlaç otomatının mobil uygulamadan bağımsız şekilde çalışabilmesine yönelik yenilikler yapılabilir.

Gelinen noktada Automed, ilaç kullanan bireylere ilaç takip hizmeti sunmaktadır. Sistemin fizibilite çalışmaları için mekanik sistem üzerinde testler yapılmış olup geliştirilen sistemin başarılı bir şekilde bu hizmeti sunabileceği tespit edilmiştir.

KAYNAKÇA

1. Braun. (t.y.). Medication Errors. Erişim tarihi: 23.06.2021, <https://www.bbraun.com/en/products-and-therapies/b-braun-for-safety/medication-error.html#health-consequences>
2. Brown, M. T., & Bussell, J. K. (2011). Medication adherence: WHO cares?. *Mayo Clinic proceedings*, 86(4), 304–314. <https://doi.org/10.4065/mcp.2010.0575/>
3. Cadogan, C. A., Ryan, C., & Hughes, C. M. (2016). Appropriate Polypharmacy and Medicine Safety: When Many is not Too Many. *Drug safety*, 39(2), 109–116. <https://doi.org/10.1007/s40264-015-0378-5>
4. Capsule Supplies. (t.y.). Understanding the Sizing of Capsules: Critical for professionals and Individuals. Erişim tarihi: 10.05.2021, <https://www.capsulesupplies.com/capsule-size-chart/>
5. CDC (Centers for Disease Control and Prevention) (t.y.). About Chronic Disease. Erişim Tarihi: 30.04.2021, <https://www.cdc.gov/chronicdisease/about/index.htm>
6. Chrischilles, E., Rubenstein, L., Van Gilder, R., Voelker, M., Wright, K., & Wallace, R. (2007). Risk factors for adverse drug events in older adults with mobility limitations in the community setting. *Journal of the American Geriatrics Society*, 55(1), 29–34. <https://doi.org/10.1111/j.1532-5415.2006.01034.x>
7. CMS (Centers for Medicare and Medicaid Services). (2012). Chronic Conditions among Medicare Beneficiaries, Chartbook, 2012 Edition. Baltimore,
8. Edlund Barbara J. *Journal of Gerontological Nursing*. (2004). Erişim tarihi: 22.06.2021, <https://journals.healio.com/doi/full/10.3928/0098-9134-20040701-03>
9. EllieGrid. (t.y.). Smart Pill Box. Erişim tarihi: 20 Haziran 2021, <https://elliegrid.com/products/ellie-smart-pill-box>
10. Fitzgerald R. J. (2009). Medication errors: the importance of an accurate drug history. *British journal of clinical pharmacology*, 67(6), 671–675. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2125.2009.03424.x>
11. Jaul E., Barron, J. (2017). Age-Related Diseases and Clinical and Public Health Implications for the 85 Years Old and Over Population. *Frontiers in public health*, 5, 335. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2017.00335>
12. NCOA(National Council On Aging). (2012). Chronic Disease Self Management. Was-

- hington. [Adobe Acrobat Reader sürümü]. Erişim adresi: <https://www.aarp.org/content/dam/aarp/livable-communities/old-learn/health/ncoa-chronic-disease-self-management-fact-sheet-aarp.pdf>
13. NCOA(National Council On Aging). (t.y.). Chronic Conditions for Older Adults The Top 10 Most Common Chronic Conditions in Older Adults. Erişim tarihi: 23.05.2021, <https://www.ncoa.org/blog/10-common-chronic-diseases-prevention-tips/>
14. Neiman, A., Ruppert, T., Ho, M., Garber, L., Weidle, P., Hong, Y., Thorpe, P. (2017). CDC Grand Rounds: Improving Medication Adherence for Chronic Disease Management — Innovations and Opportunities. *Morbidity and Mortality Weekly Report*, 66(45), 1248-1251.
15. Palleria, C., Di Paolo, A., Giofrè, C., Caglioti, C., Leuzzi, G., Siniscalchi, A., De Sarro, G., & Gallelli, L. (2013). Pharmacokinetic drug-drug interaction and their implication in clinical management. *Journal of research in medical sciences : the official journal of Isfahan University of Medical Sciences*, 18(7), 601–610.
16. Rupert A. Payne (t.y.). The epidemiology of polypharmacy. Cambridge.(Yayınlanmamış veri) [Adobe Acrobat Reader sürümü]. Erişim tarihi: 13.06.2021, <https://pdfs.semanticscholar.org/2fa1/98a4a2d5f089b2c79baec0279fe5fbb59742.pdf>
17. Sav, A., King, M. A., Whitty, J. A., Kendall, E., McMillan, S. S., Kelly, F., Hunter, B., & Wheeler, A. J. (2015). Burden of treatment for chronic illness: a concept analysis and review of the literature. *Health expectations : an international journal of public participation in health care and health policy*, 18(3), 312–324. <https://doi.org/10.1111/hex.12046>
18. Tam Vincent C. , Knowles Sandra R. , Cornish Patricia L., Fine Nowell, Marchesano Romina, Etchells Edward E.. (2005). Frequency, type and clinical importance of medication history errors at admission to hospital: a systematic review, 2005 173 (5) 510-515; DOI: <https://doi.org/10.1503/cmaj.045311>
19. Tariq, R. A., Vashisht, R., Sinha, A., & Scherbak, Y. (2021). Medication Dispensing Errors And Prevention. In *StatPearls*. StatPearls Publishing.
20. Tinylogics. (t.y.). Memo Box Smart Pill Box. Erişim tarihi: 17 Mayıs 2021, <https://pillbox.tinylogics.com/>
21. WHO (World Health Organization) (1999). Men, Ageing and Health. Cenevre.[Adobe Acrobat Reader sürümü] Erişim adresi: https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/66941/WHO_NMh_NPH_01.2.pdf;jsessionid=

