

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

ALANINDA ARAŞTIRMALAR VE DEĞERLENDİRMELER



EDİTÖRLER

Prof. Dr. Ertaç HÜRDOĞAN - Doç. Dr. Nurullah GÜLTEKİN

ARALIK 2025

YAYLIK 3032

gece
kitaplığı

İmtiyaz Sahibi / Yaşar Hız
Yayına Hazırlayan / Gece Kitaplığı

Birinci Basım / Aralık 2025 - Ankara
ISBN / 978-625-8570-42-7

© copyright

Bu kitabın tüm yayın hakları Gece Kitaplığı'na aittir.
Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin almadan hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Gece Kitaplığı

Kızılay Mah. Fevzi Çakmak 1. Sokak
Ümit Apt No: 22/A Çankaya/ANKARA
0312 384 80 40
www.gecekitapligi.com / gecekitapligi@gmail.com

Baskı & Cilt

Bizim Büro
Sertifika No: 42488

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ALANINDA ARAŞTIRMALAR VE
DEĞERLENDİRMELER**

ARALIK 2025

EDİTÖRLER

Prof. Dr. Ertaç HÜRDOĞAN

Doç. Dr. Nurullah GÜLTEKİN

gece
kitaplığı

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1

BORAKS DEKAHİDRAT VE BORAKS PENTAHİDRAT KATKILI PMMA VE PS'NİN AKIŞKANLIKLARINDAKİ DEĞİŞİMLERİN İNCELENMESİ

Yılmaz KISMET 9

BÖLÜM 2

DİKDÖRTGEN KAP DERİN ÇEKME PROSESİNDE BASKI PLAKASI KUVVETİNİN ŞEĞİLLENDİRME DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Engin ÜNAL 19

BÖLÜM 3

DERİN ÇEKME KALİTESİNİN İLCEL PARÇA ÇAPI İLE İLİŞKİSİ: AA7075-T4 ALAŞIMI ÜZERİNE BİR SİMÜLASYON ÇALIŞMASI

Faruk KARACA 31

BÖLÜM 4

BORAKS VE DOĞAL DOLGU TAKVİYELİ ABS'NİN ERİYİK AKIŞ İNDEKSİNDEKİ DEĞİŞİMLERİN İNCELENMESİ

Yılmaz KISMET 43

BÖLÜM 5

BİYOMEDİKAL UYGULAMALAR İÇİN HİDROKSİAPATİT ÜRETİM STRATEJİLERİ: SENTETİK VE DOĞAL KAYNAKLARIN İNCELEMESİ

Ali İhsan BAHÇEPINAR, İbrahim AYDIN, Can GÖNENLİ 55

BÖLÜM 6

MAKİNE TASARIMI VE KONSTRÜKSİYONU, TEMEL İLKELER VE YAKLAŞIMLAR: ÖRNEK BİR UYGULAMA

Cebeli ÖZEK 67

BÖLÜM 7

KUMLAMA TEKNİĞİ: TEMELLER VE ETKİLERİ

Ali İhsan BAHÇEPİNAR, İbrahim AYDIN, Can GÖNENLİ 83

BÖLÜM 8

EĞİTİM KURUMLARINDA TERMAL KONFOR VE İÇ HAVA KALİTESİNİN SAĞLIK VE AKADEMİK PERFORMANS AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

Hande UFAT 97

BÖLÜM 9

MÜHENDİSLİK EKONOMİSİNDE PAZARLAMA İLKELERİ VE DAĞITIM KANALLARI YÖNETİMİ

Hakan MUMCU, Murat ÖZALP 109

BÖLÜM 10

ARAMİD FİBER TAKVİYELİ KOMPOZİTLERİN MEKANİK, DİNAMİK, BALİSTİK, TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİ, ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ VE YAPAY ZEKA UYGULAMALARI

Benek HAMAMCI 127

BÖLÜM 11

YENİ KURULACAK BİR MOBİLYA FABRİKASININ MÜHENDİSLİK EKONOMİSİ AÇISINDAN ANALİZİ

Hakan MUMCU, Murat ÖZALP 141

BÖLÜM 12

ÜNİVERSİTELERDE SÜRDÜRÜLEBİLİR EĞİTİMİN ENTEGRASYONU: MÜHENDİSLİK VE TEKNOLOJİ FAKÜLTELERİNDE EĞİTİM-ÖĞRETİM MODELİ

Cebeli ÖZEK 157

BÖLÜM 1

BORAKS DEKAHİDRAT VE BORAKS PENTAHİDRAT KATKILI PMMA VE PS'NİN AKIŞKANLIKLARINDAKİ DEĞİŞİMLERİN İNCELENMESİ

Yılmaz KISMET¹

¹ Doç. Dr., Munzur Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Tunceli/Türkiye, Orcid: 0000-0003-3145-6214, ykis-
met@munzur.edu.tr

Giriş

Termoplastik polimerler; düşük yoğunlukları, geri dönüştürülebilir olmaları, farklı şekillendirme tekniklerine uyum sağlamaları ve geniş sıcaklık aralığında işlenebilirlik özellikleri nedeniyle günümüz mühendislik uygulamalarında giderek daha fazla önem kazanmaktadır (Ravve, 2012). Moleküler zincir düzenlerine bağlı olarak amorf veya yarı kristal yapı sergileyen termoplastikler, tekrarlı ısıtma-soğutma döngülerinde kimyasal olarak bozulmadan şekillendirilebilmekte ve bu yönleriyle metal ve seramik gibi geleneksel mühendislik malzemelerine önemli bir alternatif oluşturmaktadır (Osswald & Menges, 2012; Ehrenstein, 2001). Amorf termoplastikler optik berraklık, boyutsal kararlılık ve iyi yüzey kalitesi gibi özellikleriyle dikkat çekerken; yarı kristal olanlar daha yüksek mekanik dayanım, aşınma direnci ve kimyasal dayanıklılık göstermektedir (Crawford & Martin, 2020). Sahip oldukları bu çeşitlilik sayesinde termoplastikler otomotiv, elektronik, biyomedikal, savunma, ambalaj ve mimari uygulamalarda geniş bir kullanım alanı bulmaktadır.

Termoplastiklerin bu çok yönlü özellikleri, özellikle amorf yapıda olan bazı polimerlerin endüstride kritik roller üstlenmesine de zemin hazırlamıştır. Bu bağlamda optik, kimyasal ve mekanik performanslarıyla öne çıkan polimetil metakrilat (PMMA) ve polistiren (PS), mühendislik ve ticari termoplastikler içerisinde iki önemli sınıfı temsil etmektedir. Dolayısıyla termoplastiklerin genel özelliklerine ilişkin değerlendirmeler, PMMA ve PS'nin malzeme bilimi ve uygulama alanları açısından neden önemli olduğunu daha iyi anlamaya da yardımcı olmaktadır.

Amorf yapısı sayesinde yüksek optik geçirgenlik, düşük yoğunluk, iyi yüzey sertliği ve UV dayanımı sunan PMMA, ışık geçirgenliği bakımından camın yerini alabilen en önemli polimerlerden biridir. Aydınlatma ekipmanları, optik lensler, otomotiv sinyal sistemleri, medikal cihazlar ve mimari tasarımlar gibi birçok alanda yaygın kullanılan PMMA; kimyasal stabilitesi ve kontrollü üretim teknikleriyle hem ticari hem de mühendislik uygulamalarında yüksek performans göstermektedir (Feldman, 2018; Osswald & Menges, 2012). Bununla birlikte PMMA'nın doğal kırılma kırılganlığı, polimer matrisin kauçuk partikülleri veya dolgu maddeleri ile modifiye edilmesine yönelik araştırmaların artmasına neden olmuş; bu çalışmalarla darbe dayanımı geliştirilmiş PMMA varyantları ortaya çıkmıştır. Böylece PMMA hem optik hem de mekanik açıdan üstün özelliklerin bir arada arandığı uygulamalarda tercih edilen bir malzeme hâline gelmiştir.

Polistiren (PS) ise düşük maliyet, işlenebilirlik, boyutsal kararlılık ve elektriksel yalıtkanlık özellikleriyle dünya genelinde en fazla kullanılan ticari termoplastikler arasındadır. Sert ve kırılma bir yapıya sahip olan PS; paketleme sektöründen tek kullanımlık ürünlere, elektronik gövde elemanlarından ısı yalıtım malzemelerine kadar geniş bir kullanım yelpazesine sahiptir (Strong, 2006; Mark, 2013). Yüksek camsı geçiş sıcaklığı sayesinde şekil stabilitesi iyi olan PS; aynı zamanda kolay köpüklenebilme kabiliyetiyle EPS (expanded polystyrene) gibi hafif ürünlerin üretiminde önem taşımaktadır. PMMA'da olduğu gibi PS'nin de kırılma kırılganlık sorununu gidermek üzere polibütadien katkılı darbe dayanımlı polistiren (HIPS) gibi varyantlar geliştirilmiştir. Böylece PS, hem ucuz hem de performans açısından optimize edilebilir bir polimer hâline gelmiştir.

PMMA ve PS, kimyasal açıdan farklı yapılara sahip olsalar da her ikisi de doldurulabilir, modifiye edilebilir ve kompozit üretimine uygun polimerlerdir. Literatürde PMMA'nın cam tozu, seramik nanopartiküller, bor bileşikler ve doğal liflerle güçlendirildiği; PS'nin ise mineral dolgu maddeleri, karbon esaslı katkıları ve çeşitli modifikasyon ajanlarıyla mekanik ve termal özelliklerinin geliştirildiği pek çok çalışma bulunmaktadır (Sorrentino vd., 2015; Boulos vd., 2019). Bu nedenle PMMA ve PS, hem malzeme mühendisliği hem de kompozit tasarımı açısından önemli araştırma alanları sunmaya devam etmektedir.

Termoplastiklerin işlenebilirliği üzerinde belirleyici olan önemli parametrelerden biri eriyik akış davranışdır. Ekstrüzyon ve enjeksiyon gibi eriyik hâlde şekillendirme süreçlerinde görülen yüzey bozuklukları, gözenek oluşumu, kısa dolum, kalıptan geç ayrılma veya dolgu maddelerinin heterojen dağılması gibi üretim kusurları çoğunlukla polimerin yetersiz akışkanlığından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle akışkanlığı iyileştirmek, ısıl kararlılığı artırmak ve mekanik özellikleri optimize etmek amacıyla polimer matrislere doğal lifler, inorganik partiküller, metal oksitler, karbon esaslı yapılar veya sentetik dolgu maddeleri eklenmektedir (Li & Wolcott, 2004; AlMaadeed vd., 2014; Nofar & Park, 2019). Kalsiyum karbonat (kalsit) düşük maliyeti ve yaygın bulunabilirliği nedeniyle en sık tercih edilen inorganik dolduruculardan biri olurken; bor bileşikler, seramik nanopartiküller, kil türevleri ve silika esaslı katkıları da polimer matrislerde ısıl, mekanik ve morfolojik iyileştirmeler sağlamak amacıyla kullanılmaktadır (Şen & Erboz, 2018; Gupta vd., 2020; Papageorgiou vd., 2022).

Son yıllarda bor ve bor türevlerinin termoplastik sistemlerde kullanımına yönelik çalışmalar da dikkate değer şekilde artmıştır. Örneğin bor nitrür (BN) katkısının polipropilen ve polistiren matrislerde ısıl iletkenliği artırdığı, aynı zamanda sürtünme katsayısını azaltarak tribolojik performansı iyileştirdiği bildirilmiştir (Kim vd., 2017; Zhi vd., 2019). Bor oksit (B_2O_3) ve borik asit katkılarının ise PMMA ve PS gibi amorf polimerlerde termal bozunmayı geciktirdiği ve camsı geçiş sıcaklığını yükselttiği çeşitli çalışmalarda gösterilmiştir (Hao vd., 2021; Al-Harhi vd., 2015). Ayrıca boraks ($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$) ilavesinin polietilen ve polistiren gibi termoplastiklerde alev geciktirici etki oluşturduğu, karbonizasyon derecesini artırarak ısıl kararlılığı geliştirdiği rapor edilmiştir (Kandola & Horrocks, 2000). Bu bulgular, bor ve türevlerinin yalnızca dolgu görevi görmediğini, aynı zamanda ısıl ve alev geciktirici fonksiyonlarıyla polimer matris özelliklerinde çok yönlü iyileştirmeler sağladığını ortaya koymaktadır.

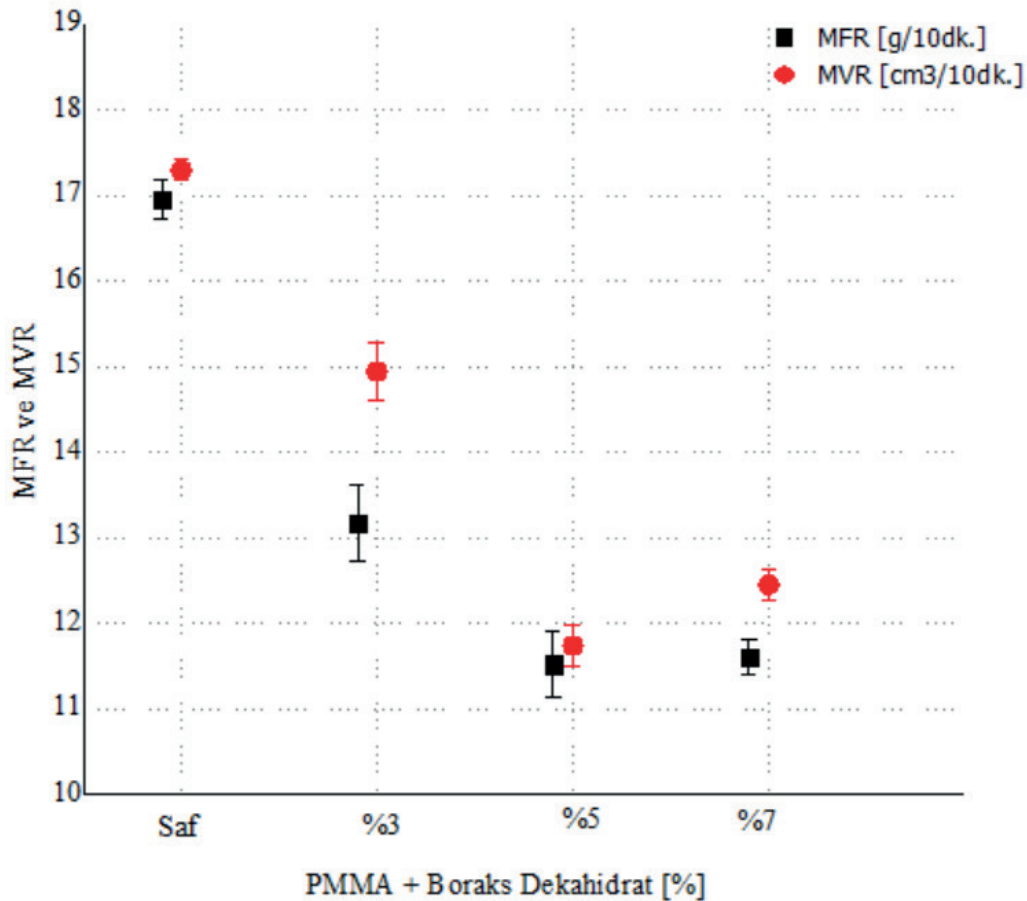
Organik dolgu maddeleri açısından bakıldığında; keten, kenevir, kolza ve pirinç kabuğu gibi lignoselülozik liflerin PMMA, PP ve PS gibi termoplastiklerle kullanılarak mukavemet-ağırlık oranını artırdığı ve çevresel sürdürülebilirlik sağladığı belirtilmektedir (Faruk vd., 2012; Satyanarayana vd., 2009). Bunun yanında grafen, karbon nanotüp gibi karbon esaslı katkıların hem PMMA hem de PS matrislerde elektriksel iletkenlik, mekanik dayanım ve termal stabiliteyi önemli ölçüde artırdığı gösterilmiştir (Liu vd., 2018; Chhetri vd., 2020). Ancak dolgu miktarının artmasıyla polimer zincir hareketliliğinin sınırlanması, eriyik viskozitesinin yükselmesine ve buna bağlı olarak eriyik akış indeksinin düşmesine yol açmaktadır. Literatürde birçok çalışma, yüksek dolgu oranlarının akış davranışını olumsuz etkilediğini ve belirli bir eşik değerin üzerinde mekanik özelliklerde de düşüşe neden olduğunu bildirmektedir (Khatun vd., 2023; Du vd., 2016; Xiang vd., 2024; Fu vd., 2011). Bu durum, PMMA ve PS gibi amorf termoplastiklerde optimum dolgu oranlarının belirlenmesinin kritik olduğunu ve kompozit tasarımında akış-mukavemet dengesi gözetilerek malzeme mühendisliği yaklaşımının uygulanması gerektiğini göstermektedir.

Bu çalışma kapsamında PMMA ve PS'nin akışkanlıklarına dolgu maddesi olarak kullanılan boraks dekahidrat ve boraks pentahidratın etkileri incelenmiştir. Ağırlıkça %3, %5 ve %7 dolgu maddesi içeren PMMA ev PS'nin kütle ve hacimsel akışkanlıkları eriyik akış indeks cihazı (MFI) kullanılarak tespit edilmiştir.

Araştırma ve Bulgular

Yapılan deneylerde matris malzemesi olarak “Solarene” firmasına ait “GPPS G-144” ürün kodu ile PMMA, “Dongguan Liangsu Masterbatch” firmasına ait olan “LSM R6109” ürün kodu ile PS kullanılmıştır. Dolgu maddesi olarak ise boraks dekahidrat ve boraks pentahidrat ayrı ayrı PMMA ve PS ile karıştırılmıştır.

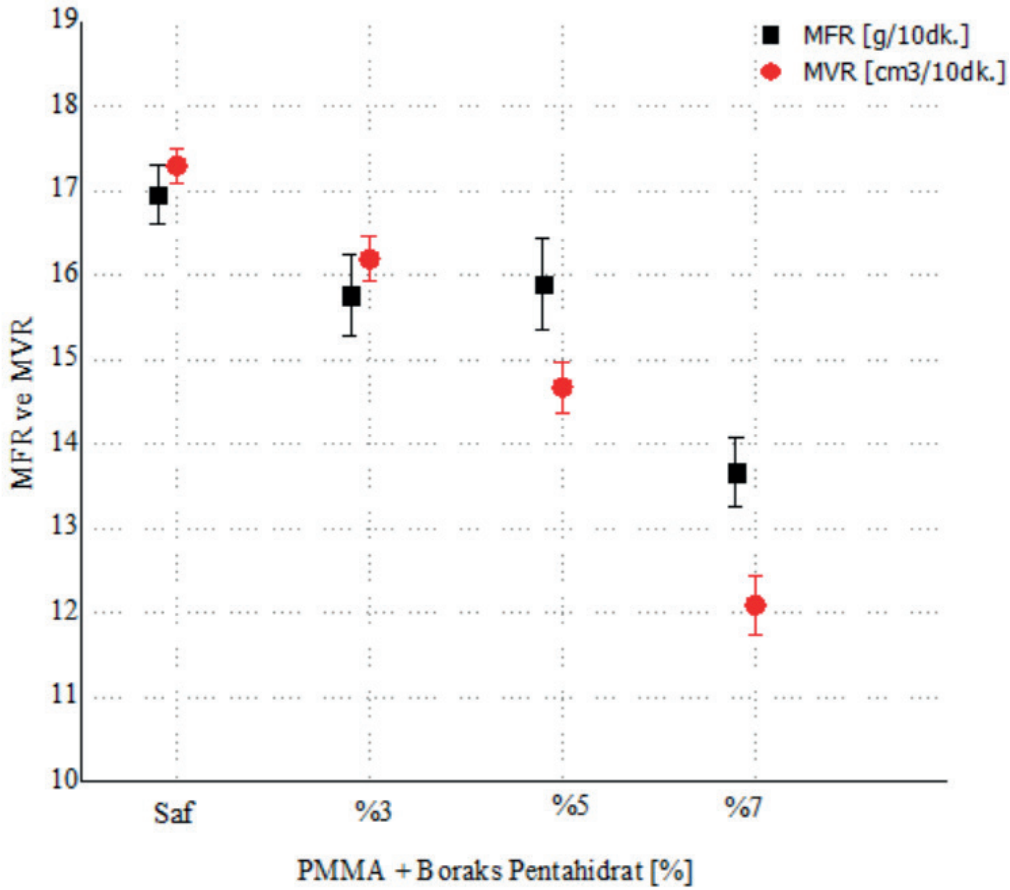
Ağırlıkça %3, %5 ve %7 oranlarında dolgu maddeleri ayrı ayrı matris malzemeler ile mekanik olarak karıştırılmıştır. Oluşturulan bu karışımların kütle ve hacimsel akışkanlıkları ayrı ayrı eriyik akış indeksi cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Her bir karışım oranında yaklaşık 8 ila 10 gram arasında malzeme analizde kullanılan “JPT EQUIPMANT-XRL-400A” marka model cihazın önceden ısıtılmış haznesine bir huni vasıtası ile dökülmektedir. Deneyler ISO 1133 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmekte olup, PMMA için 230 °C sıcaklık ve 3,80 kg ağırlık ve PS için 200 °C sıcaklık ve 5,00 kg ağırlık kullanılmıştır. Yapılan analizlerde cihazın besleme kısmından ısıtma haznesine dökülen malzemeye öncelikle 0,325 kg ön yükleme uygulanmış olup yaklaşık 5 ila 10 dk. sonrasında malzemenin cihazın alt kısmında bulunan memeden akması ile birlikte PMMA için +3,474 kg ve PS için ise 4,675 kg ana yüklemeler uygulanmıştır (Kismet, 2015). Analizler belirlenen ölçün aralığında gerçekleştirilmiş olup memeden akan malzemeler her 10 saniye’de bir kesilmiştir. Kesilen parçaların ağırlıkları ayrı ayrı hassa terazide ölçülerek ortalama ağırlıklar belirlenmiştir. Belirlenen ortalama ağırlık MFI cihazının dijital ekranında ilgili yere girilerek karışımlara ait kütle ve hacimsel akışkanlıklar ile yoğunluklar tespit edilmiştir. Her bir karışım oranı için deneyler üçer defa gerçekleştirilmiş ve sonuçlar grafikler ile sunulmuştur.



Şekil 2. Boraks dekahidrat takviyeli PMMA’nin kütle ve hacimsel akışkanlığındaki değişimler

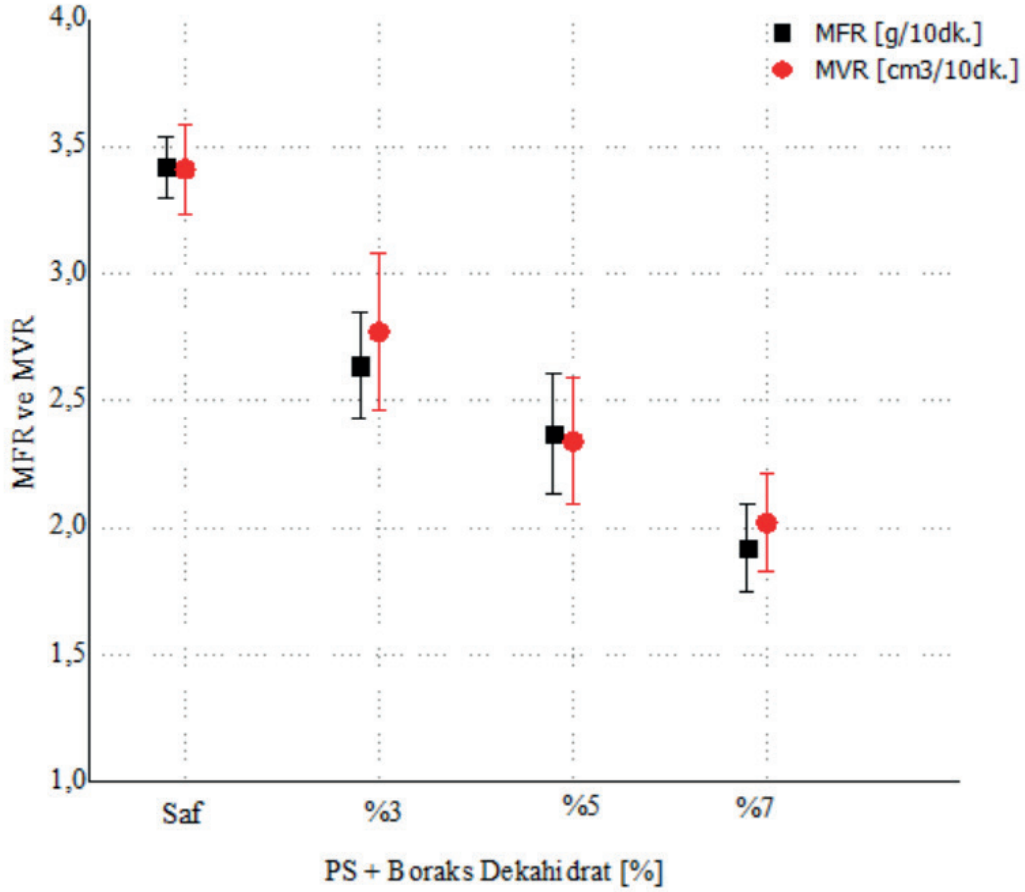
Şekil 2’de boraks dekahidrat takviyeli PMMA’nın kütle ve hacimsel akışkanlık değerleri incelendiğinde, dolgu miktarının artışıyla birlikte kütle ve hacimsel akış indeksi belirgin bir azalma gözlenmiştir. Saf PMMA’nın kütle ve hacimsel akışkanlığı 16,95 g/10dk. ile ölçülmüş olup, boraks dekahidrat katkısı eklenmeden polimerin temel akış davranışını göstermektedir. Dolgu miktarının artırılmasıyla kütle ve hacimsel akış belirgin şekilde düşmektedir: dolgu miktarının artmasıyla değerler sırasıyla 13,17, 11,52

ve 11,61 g/10dk. gerilemektedir. Bu düşüş, boraks partiküllerinin PMMA zincirleri arasına girerek polimer zincirlerinin serbest hareketini kısıtlaması ve eriyik hâlde akışı zorlaştırmasıyla açıklanabilir. Standart sapmaların düşük olması, ölçümlerin güvenilir olduğunu desteklemektedir. Hacimsel akış indeksinde de benzer bir azalma gözlenmektedir. Saf PMMA'de hacimsel akış 17,29 g/10dk. iken, boraks katkısıyla 14,94, 11,74 ve 12,45 g/10dk. düşmektedir. Bu durum, dolgu miktarının artmasıyla matris yoğunluğunun yükseldiğini ve dolayısıyla polimer eriyiğinin kalıpta daha zor hareket ettiğini göstermektedir.



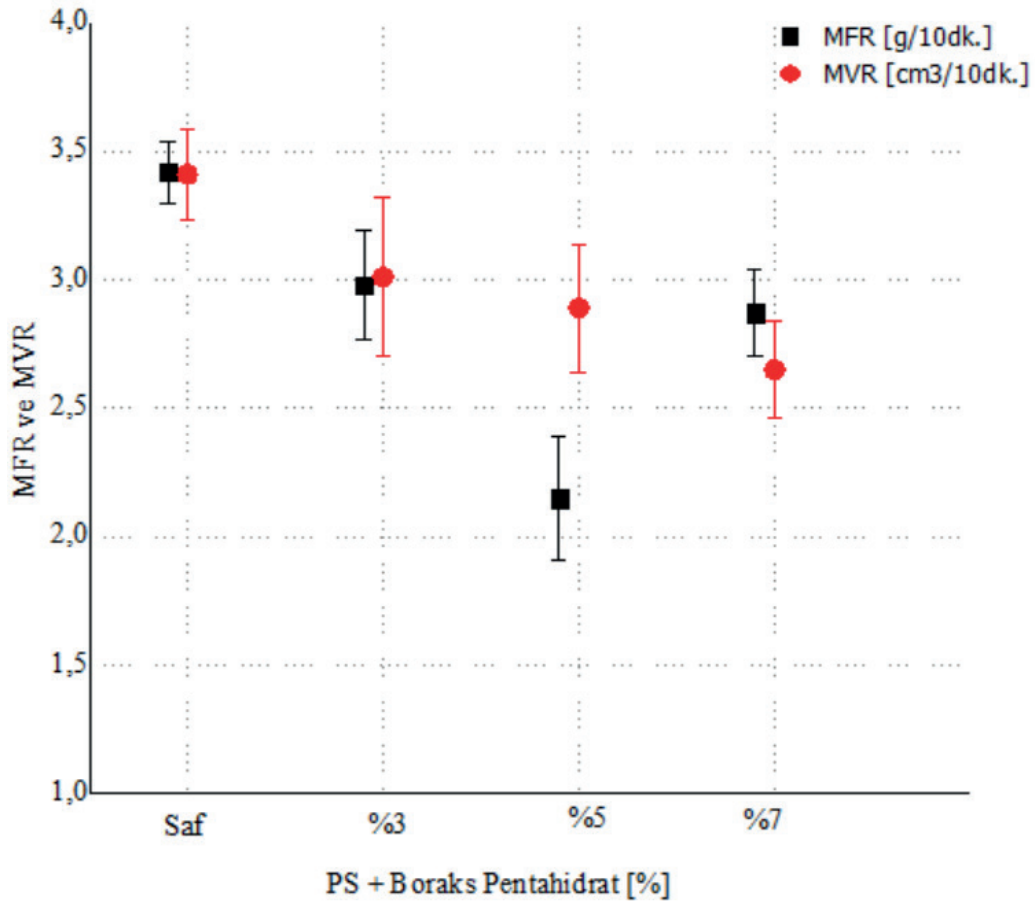
Şekil 3. Boraks pentahidrat takviyeli PMMA'nin kütle ve hacimsel akışkanlığındaki değişimler.

Şekil 3'de boraks pentahidrat ile takviye edilen PMMA'nin kütle ve hacimsel akışkanlık değişimleri incelendiğinde, dolgu miktarına bağlı olarak kütle akış indeksinin genel olarak başlangıç değerine yakın veya biraz üzerinde kaldığı gözlemlenmektedir. Saf PMMA'nin kütle akışkanlığı 16,95 g/10dk. iken, düşük dolgu miktarlarında hafif bir artışla 17,29 g/10dk.'ye ulaşmakta, dolgu miktarı arttıkça küçük dalgalanmalarla 15,76 ve 15,89 g/10dk. seviyelerinde kalmaktadır. Yani kütle akışkanlık dolgu artışına rağmen nispeten dengeli bir seyir göstermektedir. Hacimsel akış indeksinde ise belirgin bir düşüş gözlenmektedir. Saf PMMA'nin hacimsel akışkanlığı 17,29 cm³/10dk.'dan başlamış, dolgu arttıkça kademeli olarak azalarak 12,09 cm³/10dk.'ye kadar düşmektedir. Bu durum, boraks pentahidratın PMMA matrisine eklenmesinin hacimsel akışkanlığı sınırladığını ve dolayısıyla matrisin yoğunluğunu ve viskozitesini artırdığını göstermektedir. Sonuç olarak, boraks pentahidrat dolgusunun PMMA'nin kütle akışkanlığı üzerinde belirgin bir değişime etkisi görülmezken, hacimsel akışkanlıkta dolgu miktarına bağlı azalma eğilimi söz konusudur. Bu, kompozit tasarımında akış ve dolgu optimizasyonunun önemini vurgulamaktadır.



Şekil 4. Boraks dekahidrat takviyeli PS'nin kütle ve hacimsel akışkanlıktaki değişimler.

Saf PS'nin kütle ve hacimsel akışkanlığı 3,42 g/10dk ile başlamaktadır ve boraks dekahidrat ilavesiyle kademeli olarak azalmaktadır; dolgu miktarı arttıkça kütle ve hacimsel akışkanlık önce 2,64 g/10dk'ye, ardından 2,37 g/10dk'ye ve son olarak 1,92 g/10dk'ye düşmektedir. Bu azalma, PS matrisinde boraks dekahidratın polimer zincirlerinin hareketliliğini kısıtlayarak eriyik akışkanlığını düşürdüğünü göstermektedir. Hacimsel akışkanlık da benzer bir trend sergilemektedir. Saf PS'nin hacimsel akışkanlığı 3,41 cm³/10dk'den başlamış, dolgu ilavesiyle önce 2,77 cm³/10dk'ye, daha sonra 2,34 cm³/10dk'ye ve en sonunda 2,02 cm³/10dk'ye düşmüştür. Hacimsel akışkanlıktaki bu azalma, polimer matrisin yoğunlaşmasına ve boraks dekahidratın yer kaplamasına bağlı olarak eriyik akışkanlığının sınırlandırıldığını göstermektedir. Kütle ve hacimsel akışkanlıktaki bu düşüşler, dolgu maddesi miktarının artmasıyla birlikte polimerin işlenebilirliğinin kısıtlandığını ve optimum dolgu oranının belirlenmesinin önemini ortaya koymaktadır. Ayrıca hacimsel akışın kütle ve hacimsel akışa oranı, dolgu ile birlikte yoğunluğun arttığını ve polimer matrisin sıkıştığını doğrulamaktadır.



Şekil 4. Boraks pentahidratın takviyeli PS'nin kütle ve hacimsel akışkanlığındaki değişimler.

Boraks pentahidrat katkılı PS'de kütle ve hacimsel akışkanlık değişimleri Şekil 4'de verilmiş olup incelendiğinde, saf PS'nin kütle akış indeksi 3,42 g/10dk olarak tespit edilmiştir. Boraks pentahidrat miktarının artmasıyla kütle akışkanlık önce ağırlıkça %10 takviyeli karışımlarda 2,98 g/10dk. düşmüş, ardından 2,15 g/10dk. gerilemiş ve ağırlıkça %30 dolgu karışımlarda ise 2,87 g/10dk. yükselmiştir. Bu değişim, düşük dolgu oranlarında polimer zincirlerinin hareketliliğinin kısmen kısıtlanmasıyla akışın azaldığını, yüksek dolgu miktarında ise dağılımın düzensizleşmesi nedeniyle kütle akışın bir miktar toparlandığını göstermektedir. Standart sapmalar 0,12–0,24 aralığında olup, ölçümlerin güvenilirliğini desteklemektedir. Hacimsel akış indeksi ise saf PS'de 3,41 cm³/10dk. olarak başlamış, dolgu miktarının artmasıyla önce 3,01 cm³/10dk. yükselmiş, ardından 2,89 cm³/10dk. ve son olarak ağırlıkça %30 dolgu karışımlarında ise 2,65 cm³/10dk. düşmüştür. Bu değişim, boraks pentahidratın PS matrisindeki dolgu etkisinin hacimsel akış üzerinde belirleyici olduğunu, düşük dolgu oranlarında partiküllerin düzenli dağılımının kısa süreli akış artışı sağlarken, yüksek dolgu oranlarında hacimsel akışın azalmasına neden olduğunu ortaya koymaktadır.

Sonuçlar

Boraks dekahidrat ve pentahidrat takviyeli PMMA ile PS'nin kütle ve hacimsel akışkanlıkları incelendiğinde, hem polimer türüne hem de boraks formuna bağlı belirgin değişimler gözlemlenmiştir. Saf PMMA ve PS'nin kütle ve hacimsel akış indeksleri başlangıç değerlerinde yüksek olurken, boraks katkısının artmasıyla her iki polimerde de kütle ve hacimsel akışta genel olarak düşüş veya küçük dalgalanmalar meydana gelmiştir. Bu durum, boraks partiküllerinin polimer matris içinde zincir hareketliliğini kısmen kısıtlaması ve dolgu artışıyla akışın mekanik engellenmesinden kaynaklanmaktadır. Özellikle yüksek dolgu oranlarında PMMA'da kütle ve hacimsel akış daha belirgin şekilde azalırken, PS'de dolgu miktarına bağlı olarak kütle ve hacimsel akış bazı adımlarda sınırlı bir toparlanma göstermiştir.

Hacimsel akış indeksleri açısından değerlendirildiğinde ise hem PMMA hem de PS'de dolgu miktarının artışıyla hacimsel akışın genellikle azaldığı, düşük dolgu oranlarında bazı küçük artışların gözlemlendiği tespit edilmiştir. Bu trend, boraksın polimer matrisinde dağılımının dolgu miktarına ve partikül türüne bağlı olarak hacimsel akışkanlık üzerinde farklı etkiler yaratabileceğini göstermektedir. Dekahidrat ve pentahidrat formları arasındaki karşılaştırmada, pentahidrat katkılı polimerlerde hacimsel akışın dolgu artışıyla daha belirgin bir azalma eğilimi sergilediği, kütle ve hacimsel akışta ise bazı adımlarda hafif toparlanma eğilimlerinin görüldüğü belirlenmiştir.

Genel olarak, hem PMMA hem de PS'nin akışkanlık davranışı, boraks formu ve miktarına duyarlıdır. Kütle ve hacimsel akış arasındaki değişimler, dolgu oranının optimum seviyede belirlenmesinin önemini ortaya koymaktadır. Bu bulgular, dolgu modifikasyonu ile termoplastiklerin işlenebilirliğinin iyileştirilmesi ve mekanik özelliklerin optimize edilmesi açısından rehber niteliğindedir. Özellikle üretim süreçlerinde boraks katkısı kullanılırken, dolgu oranı ve formunun akışkanlık üzerinde önemli etkiler oluşturduğu dikkate alınmalıdır.

Kaynaklar

- Ravve, A., 2012. Principles of Polymer Chemistry, third ed., Springer, New York
- Al-Harthi, S. H., Al-Masoudi, M., & Al-Sabagh, A. M. (2015). Thermal properties of boric acid reinforced polymers. *Journal of Applied Polymer Science*, 132(14), 41789.
- AlMaadeed, M., Masood, S. H., & Saleh, T. A. (2014). Polymer composites: Manufacturing, properties and applications. *Polymer Composites*, 35(12), 2203–2212.
- Boulos, R., Smith, J., & Taylor, P. (2019). Advances in polystyrene composites: Mechanical and thermal properties. *Materials Today Communications*, 19, 10–20.
- Chhetri, R. K., Singh, P., & Sharma, S. (2020). Carbon-based fillers in PMMA and PS composites: A review. *Composites Part B*, 188, 107867.
- Crawford, R. J., & Martin, R. (2020). *Materials science of polymers*. Elsevier.
- Du, F., Li, G., & Wang, Y. (2016). Effect of filler content on polymer melt flow and mechanical properties. *Journal of Polymer Research*, 23, 101.
- Ehrenstein, G. W. (2001). *Polymer materials: Structure, properties, applications*. Hanser.
- Faruk, O., Bledzki, A. K., Fink, H. P., & Sain, M. (2012). Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. *Progress in Polymer Science*, 37(11), 1552–1596.
- Feldman, D. (2018). *Polymer history and applications*. Springer.
- Fu, J., Krantz, M., Zhang, H., Zhu, J., Kuo, H., Wang, Y. M., & Lis, K. (2011). Investigation of the recyclability of powder coatings. *Powder Technology*, 211(1), 38–45.
- Gang, Y., Zuohu, L., Yi, Z. (2005). Dehydration of tetrahydrate potassium pentaborate in fluidized bed. *Journal of Chemical Engineering and Processing*, 44, 1216–1220.
- Gupta, N., Singh, R., & Kumar, P. (2020). Influence of inorganic fillers on thermal and mechanical properties of polymer composites. *Journal of Polymer Materials*, 37, 1213–1225.
- Hao, L., Wang, X., & Liu, Y. (2021). Thermal stabilization of PMMA and PS by bor oxide additives. *Polymer Degradation and Stability*, 190, 109602.
- Kandola, B. K., & Horrocks, A. R. (2000). Flame retardant properties of borax-containing polymers. *Polymer Degradation and Stability*, 68(3), 353–360.
- Kim, S., Lee, J., & Park, S. (2017). Effect of boron nitride on the thermal conductivity of polymer composites. *Composites Science and Technology*, 152, 173–181.
- Khatun, S., Alam, S., & Rahman, M. (2023). Influence of filler content on melt flow index and mechanical properties of thermoplastics. *Materials Today: Proceedings*, 70, 204–212.
- Li, S., & Wolcott, M. P. (2004). Fiber-reinforced thermoplastics: Processing, properties and applications. *Journal of Applied Polymer Science*, 91(1), 327–336.

- Liu, H., Zhao, Y., & Chen, L. (2018). Graphene reinforced PMMA and PS composites: Mechanical and electrical properties. *Composites Science and Technology*, 154, 144–152.
- Mark, J. E. (2013). *Polymer data handbook*. Oxford University Press.
- Nofar, M., & Park, C. B. (2019). Processing and properties of filled polymer composites. *Polymer Engineering & Science*, 59(3), 443–459.
- Osswald, T. A., & Menges, G. (2012). *Materials science of plastics: Theory and practice*. Hanser.
- Papageorgiou, D. G., Kinloch, I. A., & Young, R. J. (2022). Reinforced polymer composites with inorganic fillers. *Composites Science and Technology*, 224, 109372.
- Satyanarayana, K. G., Guimarães, J. L., & Wypych, F. (2009). Studies on lignocellulosic fibers: Structure, properties and applications. *Composites Part A*, 40(7), 1037–1051.
- Şen, U., & Erboz, M. (2018). Influence of inorganic additives on thermoplastic polymers. *Polymer Composites*, 39(5), 1542–1552.
- Sorrentino, A., Gorrasi, G., & Vittoria, V. (2015). Polymer nanocomposites: Preparation, properties and applications. *Progress in Polymer Science*, 48, 1–31.
- Strong, A. B. (2006). *Plastics: Materials and processing*. Pearson.
- Xiang, W., Zhou, H., & Li, X. (2024). Effect of filler content on melt flow and mechanical properties of amorphous thermoplastics. *Journal of Materials Science*, 59, 1123–1135.
- Zhi, C., Li, J., & Wang, H. (2019). Thermal and tribological properties of boron nitride reinforced polymer composites. *Composites Part B*, 162, 489–497.
- Kismet, Y. (2015). Hidrolize edilmiş elektrostatik toz boya atık miktarına bağlı olarak poliamid 6 (PA6) ve polioksimetilenin (POM) eriyik akış indeksleri ve yoğunluklarındaki değişimlerin incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(4), 241-245.

BÖLÜM 2

DİKDÖRTGEN KAP DERİN ÇEKME PROSESİNDE BASKI PLAKASI KUVVETİNİN ŞEKİLLENDİRME DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Engin ÜNAL¹

¹ Prof. Dr., Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği, ORCID: 0000-0002-0501-3690

GİRİŞ

Sac metal şekillendirme, özellikle otomotiv, havacılık ve savunma sanayilerinde hafif ve karmaşık geometriye yapısal bileşenlerin üretimi için vazgeçilmez bir imalat yöntemlerinden biridir. Bu yöntemler arasında, düz sac boşlukların (blank) tek bir pres vuruşuyla derin boşluklu, üç boyutlu parçalara dönüştürüldüğü derin çekme prosesi, yüksek üretim hızları ve ikincil işlem ihtiyacını minimize etmesi nedeniyle seri üretimde yaygın olarak benimsenmektedir [1]. Prosesin temel mekanizması, sacı şekillendirilmiş bir kalıp içine doğru iten bir zımba ile, flanş bölgesindeki malzeme akışını kontrol etmek için ayarlanabilir normal basınç uygulayan bir baskı plakasından (blank holder) oluşur. Ancak, prosesin başarısı ve nihai parça kalitesi; malzeme özellikleri, kalıp geometrisi, tribolojik koşullar (sürtünme, aşınma, yağlama) ve proses parametreleri gibi birbiriyle karmaşık etkileşim halindeki çok sayıda değişkene son derece duyarlıdır [2], [3]. Özellikle yüksek mukavemetli alüminyum alaşımları ve gelişmiş yüksek mukavemetli çelikler gibi modern malzemelerin şekillendirilmesinde, aşırı gerilimler yırtılma ve aşırı incelmeye, yetersiz gerilimler ise buruşukluk veya tam olmayan şekillendirmeye yol açabilmektedir [4], [5], [6]. Bu nedenle, prosesin optimizasyonu ve kalıp ömrünün uzatılması, hem deneysel hem de sayısal araştırma yöntemlerinin ekileşimli kullanımını gerektiren çok yönlü bir mücadele alanı olarak ortaya çıkmaktadır.

Derin çekmede performansı ve kalıp ömrünü doğrudan etkileyen en kritik faktörlerden biri, kalıp-iş parçası ara yüzeyinde gerçekleşen tribolojik etkileşimdir. Sürtünme katsayısı, yalnızca gerekli şekillendirme kuvvetini ve enerji tüketimini değil, aynı zamanda malzeme akışının homojenliğini, kalınlık dağılımını ve dolayısıyla parça kalitesini de belirler [7]. Geleneksel olarak, sonlu elemanlar (FE) simülasyonlarında Coulomb sürtünme modeli kullanılsa da, bu modelin sabit bir sürtünme katsayısı değeri varsayması, gerçek proses koşullarını yeterince temsil etmemektedir. Çünkü sürtünme katsayısı, lokal temas basıncı, kayma hızı, yüzey sıcaklığı, yüzey pürüzlülüğü ve yağlama durumu gibi parametrelere bağlı olarak dinamik bir şekilde değişir [8]. Bu sorunu aşmak için geliştirilen çok faktörlü sürtünme modelleri (MFFM) özel yazılımlar aracılığıyla simülasyon doğruluğunu önemli ölçüde artırmaktadır. Örneğin, Shafiee Sabet vd. [8], alüminyum alaşımları için yaptıkları çalışmada, MFFM kullanımının, farklı baskı plakası kuvvetleri altında zımba kuvveti ve kalınlık dağılımı tahminlerini Coulomb modeline kıyasla belirgin şekilde iyileştirdiğini göstermiştir. Tribolojik performansı iyileştirmenin bir diğer etkili yolu da kalıp yüzeylerine fiziksel buhar biriktirme (PVD) ile kaplama uygulamaktır. İnce film kaplamalar, yüksek sertlik, düşük sürtünme katsayısı ve üstün aşınma direnci sağlayarak kalıp ömrünü uzatır ve proses verimliliğini artırır [9]. Edis vd. [3], yaptıkları deneysel ve sayısal çalışmada, CrTiN kaplamanın, CrN kaplamaya ve kaplanmamış yüzeylere kıyasla daha iyi aşınma direnci, daha düşük şekillendirme kuvveti ve enerji tüketimi sağladığını ortaya koymuştur. Bu tür kaplamalar, yüksek üretim adetlerinde ortaya çıkan adezif ve abrazif aşınmayı azaltarak, ürün kalitesinin sürdürülebilirliğine ve hurda oranının düşmesine katkıda bulunur [10], [11].

Proses verimliliğini ve parça geometrisinin karmaşıklığını artırmaya yönelik ileri yöntemler sürekli geliştirilmektedir. Bu yöntemlerden biri, sacın belirli bölgelerinin lokal olarak ısıtılma işleminden geçirilerek yumuşatıldığı ve böylece şekillendirilebilirliğin yerel olarak artırıldığı "örtülü ısıtılma işlemi görmüş saclar" (Tailor Heat Treated Blanks - THTB) teknolojisidir [12]. Lazer ısıtılma işlemi, bu amaçla kullanılan en esnek ve kontrollü yöntemlerden biridir. Pereira vd. [13], DP1000 çeliğinden karmaşık şekilli bir endüstriyel parçanın çoklu şekillendirmesinde lazer ısıtılma işleminin etkinliğini araştırmış ve doğru parametrelerle uygulanan lokal yumuşatmanın, parçanın şekillendirilebilirliğini belirgin şekilde iyileştirdiğini AutoForm simülasyonları ve deneysel deneylerle doğrulamıştır. Benzer şekilde, dikdörtgen kap gibi köşe yarıçapının küçük olması gereken parçalarda, sacın sadece belirli bölgelerini kalınlaştıran "lokal kalınlaştırılmış saclar" kullanılmaktadır. Bu yöntem, köşe doluluk oranını artırırken, genel sac kalınlığını ve dolayısıyla parça ağırlığını artırmadan, kritik bölgelerdeki aşırı incelmeyi önler [14], [15], [16]. Li vd. [16], AA2024 alüminyum alaşımı ile dikdörtgen kap şekillendirmede, kalınlaştırma parametrelerinin taban yarıçapı ve şekillendirme kuvveti üzerindeki

etkisini ABAQUS FE simülasyonları ve deneylerle incelemiş, optimizasyon sonucunda 5 mm gibi küçük bir yarıçapa sahip parçaların üretilebildiğini göstermiştir.

Tüm bu proses ve malzeme geliştirmelerinin güvenilir bir şekilde tasarlanabilmesi ve optimize edilebilmesi, gelişmiş sayısal simülasyon araçlarına bağlıdır. Günümüzde AutoForm, PAM-STAMP, ABAQUS, ANSYS gibi yazılımlar, prosesin sanal ortamda modellenmesi, potansiyel kusurların (yırılma, buruşukluk, aşırı incelme) öngörülmesi ve kalıp tasarımının iyileştirilmesi için vazgeçilmez hale gelmiştir. Şekillendirme limit diyagramları (ŞLD), parçanın güvenli şekillendirme bölgesini belirlemede temel araç olsa da, özellikle gerinme yolunun değiştiği, eğilme-gerilme kombinasyonlu karmaşık yüklemelerde yetersiz kalabilmektedir [17], [18], [19]. Bu sorunu aşmak için, "eğilme-gerilme oranı" (ρ) gibi yeni parametreler tanımlanmakta ve geleneksel ŞLD'ler bu parametrelerle modifiye edilmektedir. Pham vd. [17], DP800 ve AA6016 sacları için yaptıkları çalışmada, ρ parametresini kullanarak kalibrasyon yapılmış bir şekillendirme limit eğrisini AutoForm R10'da başarıyla uygulamış ve deneysel sonuçlarla uyumlu tahminler elde etmiştir. Ayrıca, proses kontrolü ve kalite tahmini için, sac kenarının çekilme miktarı gibi geleneksel gözlemlenebilir parametrelere ek olarak, malzeme akışının daha hassas olduğu bölgelerde (kalıp yarıçapı civarı) ölçüm yapmanın önemi vurgulanmaktadır [20]. Bu kapsamda, derin çekme prosesinin karmaşıklığı, ancak malzeme bilimi, triboloji, ısıtma işlem ve ileri sayısal modellemenin kesişiminde yürütülen multidisipliner araştırmalarla aşılabilmektedir.

Sonlu Elemanlar Analizine Hazırlık ve Model Aktarım Süreci

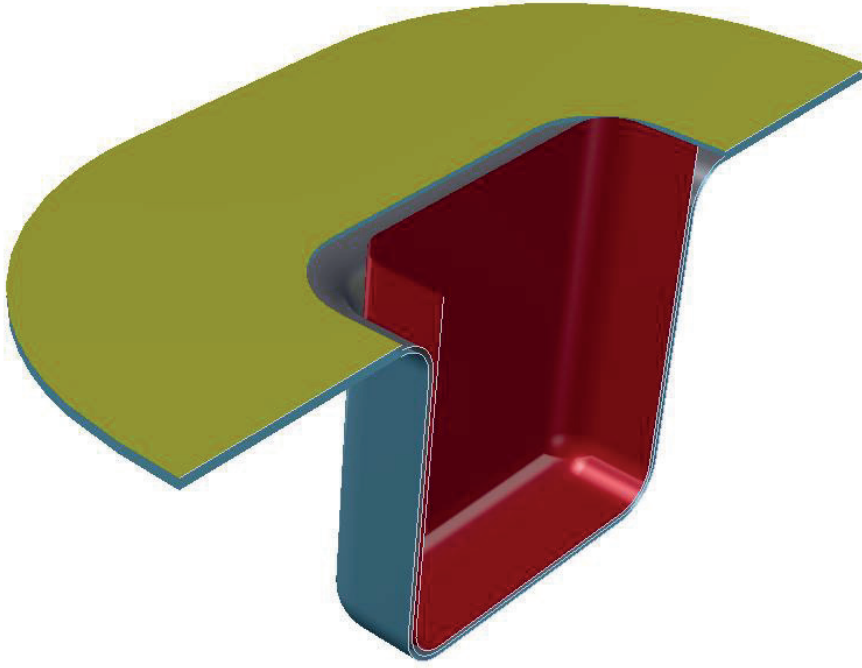
Bu çalışmada, baskı plakasının farklı değerlerinde şekillendirilen kaplardaki kuvvet-yer değiştirme ve kalınlık değişimini analiz etmek için sonlu elemanlar (FE) simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Paslanmaz çelik sacın şekillendirme prosesi için ticari FE yazılımı AUTOFORM® kullanılmıştır. Simülasyonda modellemeyi basitleştirmek için izotropik elastik ve izotropik plastik sertleşme modellerine dayanan klasik elastik plastisite kullanılmıştır. İzotropik akma fonksiyonu olarak von Mises akma fonksiyonu kullanılmıştır [21].

Tablo 1'de, elastik özellikler olan Young modülü $2.1 \cdot 10^5$ Mpa ve Poisson oranı 0.3 ile üç Swift sertleşme model parametresi sunulmuştur. Kap çekme simülasyonu, kalınlığı 0.7 mm olan AISI 316 paslanmaz seçilmiştir. Presleme hızı 50 mm/s, çekme yüksekliği 55 mm ile sınırlandırılarak gerçekleştirilmiştir. Baskı plakası kuvvetleri 2, 4, 6, 8, ve 10 kN olarak alınmış ve sürtünme katsayısının 0.3 olduğu varsayılmıştır.

Tablo 1. AISI 316 paslanmaz çeliğinin simülasyon malzeme verileri [22]

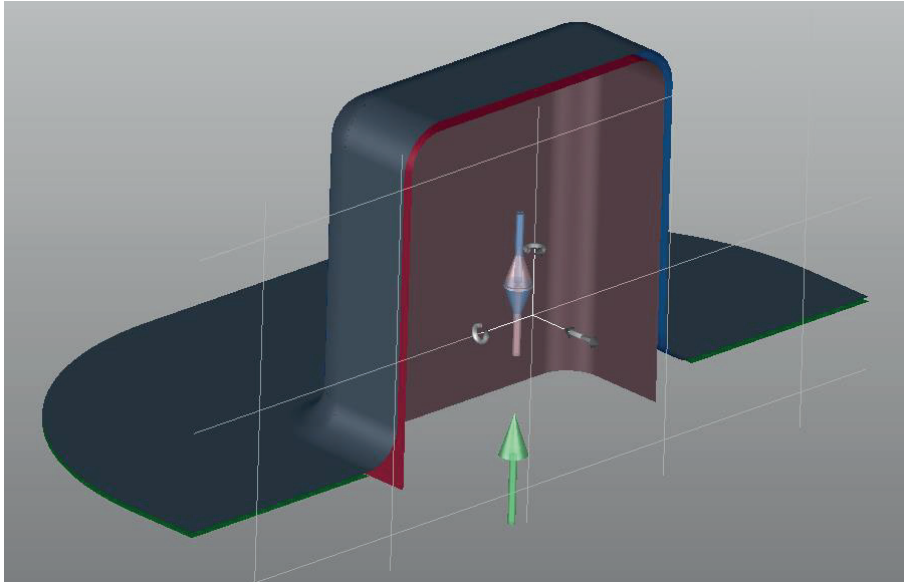
Kategori	Parametre	Değer
Basic Properties	Young's Modulus	2.1E+05 MPa
	Poisson's Ratio	0.3
	Specific Weight	7.680 kg/m ³
Thermal Properties	Volumetric Heat Capacity	3.64 MJ(m ³ ·K) ⁻¹
	Conductivity	15 mW(mm·K) ⁻¹
	Thermal Dilatation	Phase Independent
Hardening Curve	Type	Swift . Hockett-Sherby
Swift Model	e ₀	0.05
	m	0.47
	σ ₀	1400 MPa
Hockett-Sherby	σ ₀	353 MPa
	σ _{sat}	1237 MPa
	n	2.73
	p	0.98
	α	0.75
Variation (Flow Curve)	σ ₀ ^s	350.4 MPa
	R _{min}	638.2 MPa
	n ₀ -n _g	0.285
Yield Surface	Model	BBC 2005
r-Values	r ₀	0.55
	r ₄₅	1.25
	r ₉₀	1
Stresses (Relative)	σ ₁ /σ ₀	1.073
	σ ₄₅ /σ ₀	1.175
	σ ₉₀ /σ ₀	0.9904
	Biaxial σ _b /σ ₀	0.454
	Biax Ratio	1.02
	M	6

Derin çekme deneylerinin sayısal olarak modellenmesi ve sonlu elemanlar analizine hazırlanması sürecinde, ilk adım olarak deney düzeneğindeki tüm fiziksel bileşenlerin; matris (die), baskı plakası (blankholder), zımba (punch) ve hedef parça geometrisi (kap) üç boyutlu katı modelleri, Catia CAD yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur (Şekil 1). Modelleme aşamasında, deneysel kalıp takımının tüm boyutsal ve geometrik özellikleri bire bir yansıtılarak parametrik ve hassas 3B CAD modelleri hazırlanmıştır.



Şekil 1. Catia CAD yazılımı kullanılarak oluşturulan kalıp modeli.

Bu dijital prototiplerin sonlu elemanlar analizinde kullanılabilmesi için, Catia ortamında oluşturulan kalıp bileşenlerinin geometrisi, yaygın kabul gören bir veri değişim formatı olan IGES (Initial Graphics Exchange Specification) uzantısı ile kaydedilmiştir. Ardından, bu IGES dosyaları, sac metal şekillendirme simülasyonları için uzmanlaşmış bir yazılım olan AutoForm'a aktarılmıştır. Aktarım sonrası AutoForm ortamında, kalıp geometrileri sonlu elemanlar ağ yapısına (mesh) uygun hale getirilmiş, temas çiftleri (contact pairs) tanımlanmış ve malzeme özellikleri atanarak analize hazır tam bir sanal derin çekme düzeneği oluşturulmuştur (Şekil 2).

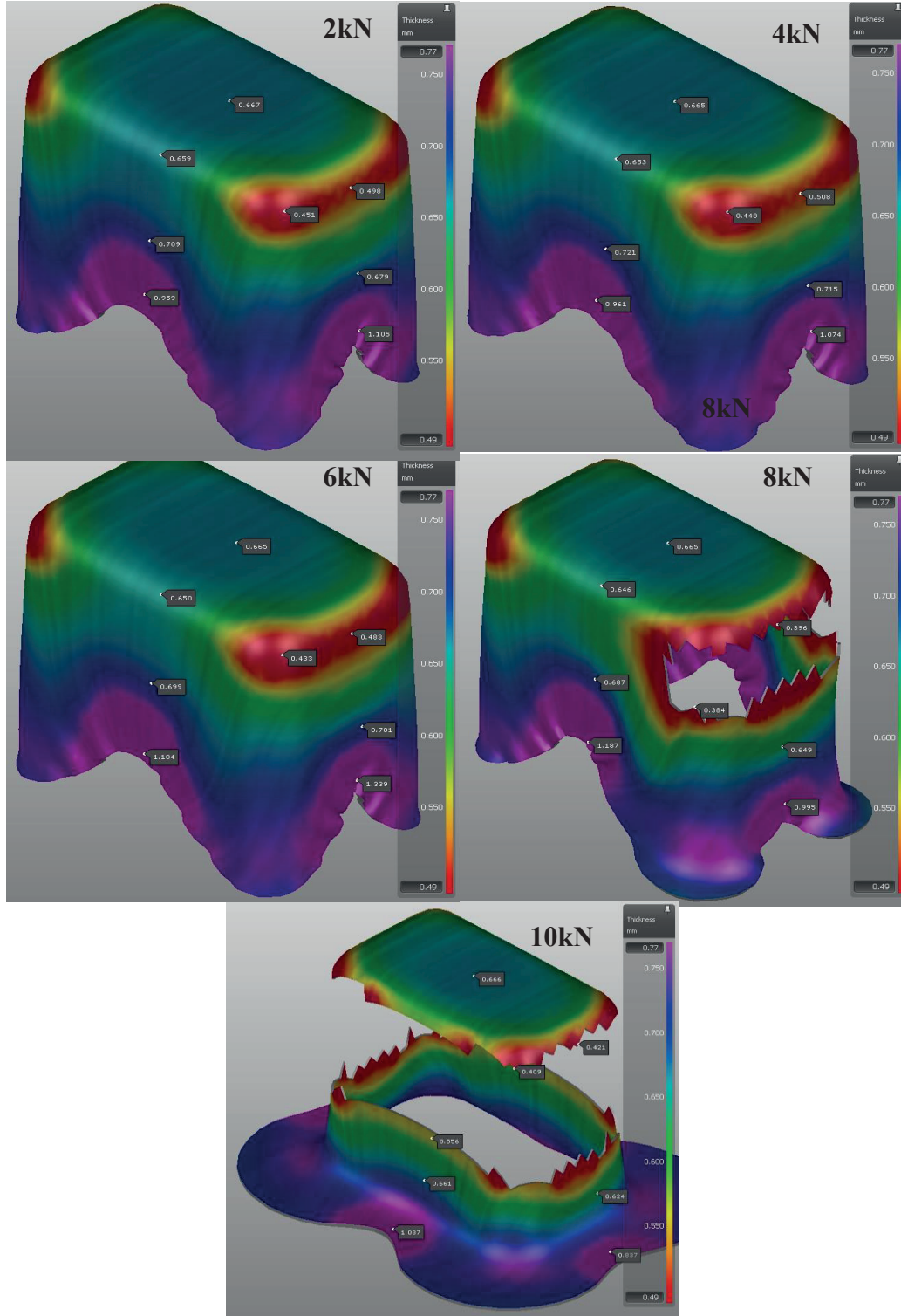


Şekil 2. AutoForm ortamında derin çekme simülasyonunun oluşturulması

Çözümü yapılan modelde kalınlık değişim haritaları, AutoForm ortamında değişen Baskı Plakası Kuvveti (BPK) değerleri (2, 4, 6, 8 ve 10 kN) altında AISI 316 paslanmaz çelik bir kabın simüle edilen et kalınlığı dağılımını göstermektedir (Şekil 3). Yaklaşık 0.49 mm (en ince, genellikle

kırmızı) ile 0.77 mm (en kalın, genellikle mavi/mor) arasında değişen renk skalası, çekilen parçanın üzerinde oluşan malzeme incelmesi ve kalınlaşmasını görselleştirmektedir.

Derin çekme prosesinde BPK, flanştan kalıp boşluğuna doğru gerçekleşen malzeme akışını doğrudan kontrol eder ve bu nedenle et kalınlığı profilini kritik ölçüde etkiler [3], [23], [24]. BPK değerinin 2 kN'dan 10 kN'a doğru artmasıyla birlikte malzeme akışı üzerindeki kısıtlama da artmaktadır:

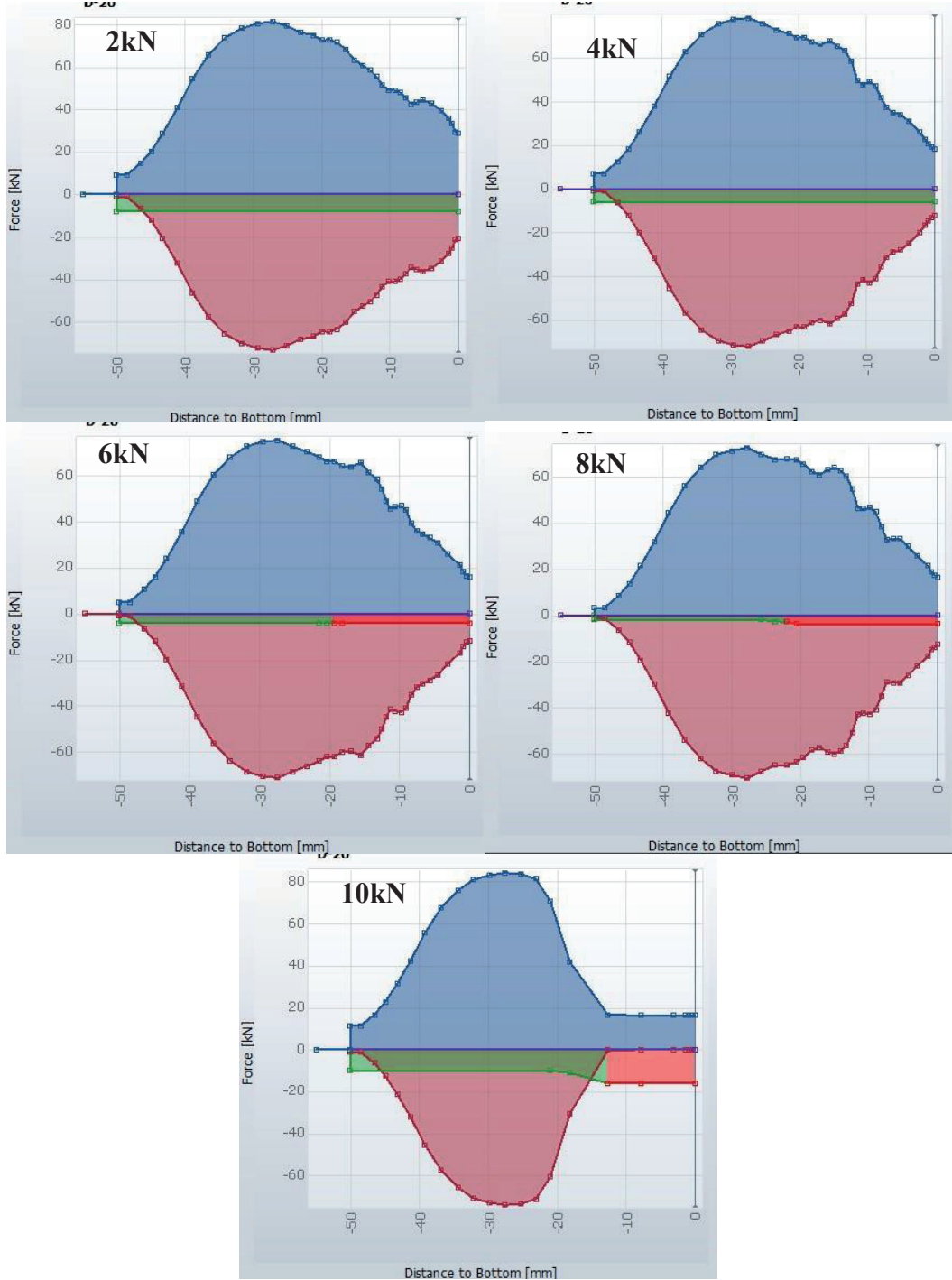


Şekil 3. Baskı plakası kuvvetlerine bağlı kalınlık değişim haritaları.

Daha yüksek BPK değerleri (örneğin 8 kN ve 10 kN), deformasyon bölgesine ulaşan malzeme miktarını sınırlar. Bu durum, özellikle kalıp radyüsü yakınındaki yan duvar gibi yüksek radyal çekme gerilmelerinin olduğu bölgelerde daha belirgin incelmeye neden olur ve ilgili kalınlık değişimi haritalarında daha düşük minimum et kalınlığı değerleri olarak gözlemlenir [16], [23].

Buna karşılık, daha düşük BPK değerleri (örneğin 2 kN ve 4 kN), malzemenin kalıp köşesi veya taban bölgesinde daha fazla birikmesine izin verir. Bu durum yan duvarda incelmenin daha az olmasına yol açsa da, diğer bölgelerde artmış kalınlaşmaya veya malzeme akışının aşırı serbest kalması durumunda buruşma riskine neden olabilir [16].

Simülasyon sonuçları, uygulanan BPK ile nihai et kalınlığı dağılımı arasında doğrudan bir ilişki olduğunu göstermekte ve bu parametrenin optimize edilmesinin, özellikle sıcaklık duyarlı malzemeler olan AISI 316 gibi çeliklerin şekillendirilmesi sırasında incelme veya buruşma gibi hataları önlemek için kritik olduğunu doğrulamaktadır [13], [25].



Şekil 4. Baskı plakası kuvvetlerine bağlı Kuvvet-Yer değiştirme grafikleri.

Şekil 4 değişen baskı plakası kuvvetiyle elde edilen şekillendirme davranışını gösterir; mavi alan (kalıp) dar bir aralıkta düşük bir pozitif değer, kırmızı alan (zımba) ise hafif bir negatif eğilim sergiler. Yeşil çizgi, baskı plakası tarafından uygulanan kuvvetin sıfır civarında sabit kalmasını ifade eder. 2 kN ve 4 kN’luk kuvvetler seviyesinde deformasyon sınırlıdır ve malzemenin elastik bölgesi içinde kalır, bu da gerilme-eğilme eğrisinin çok hafif bir yayılımına işaret eder.

Orta seviyedeki 6 kN ve 8 kN baskı plakası kuvvetleri, mavi alanın genişlemesini ve tepe noktasının yaklaşık 25 mm konumunda 70-80 kN civarında artmasını sağlar. Kırmızı alan ise daha belirgin bir negatif dalga göstererek zımba etkisinin arttığını ortaya koyar [19], [26], [27]. Yeşil çizgi hâlâ sıfırda kalmakla birlikte, toplam şekillendirme kuvveti artışı malzemenin akma sınırına yaklaşmasını ve plastisite bölgesine geçişi işaret eder.

En yüksek 10 kN baskı plakası kuvveti, grafikte mavi bölgenin en yüksek tepeye (≈ 80 kN) ulaşması ve kırmızı bölgenin aynı anda daha derin bir negatif değer almasıyla karakterizedir. Bu durum, kalıp ve zımba arasındaki etkileşimin maksimum seviyeye çıktığını, aynı zamanda malzemenin büyük bir elastik-plastik deformasyon yaşadığını gösterir. Yeşil çizgi hâlâ denge noktasını temsil eder, fakat toplam kuvvet dağılımının simetrik olmaması, şekillendirme sırasında lokal gerilme konsantrasyonlarının oluştuğunu ortaya koyar.

Genel Sonuçlar

Bu çalışmada, AISI 316 paslanmaz çelik sac malzemenin derin çekme prosesi, farklı baskı plakası kuvveti (BPK) değerleri (2, 4, 6, 8 ve 10 kN) altında AutoForm® yazılımı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle simüle edilmiştir. Simülasyonlar, BPK'nın et kalınlığı dağılımı, şekillendirme kuvveti ve malzeme akışı üzerindeki etkilerini sistematik olarak değerlendirmeyi amaçlamıştır.

Elde edilen bulgulara göre:

- Et kalınlığı dağılımı, BPK'ya bağlı olarak önemli ölçüde değişmektedir. Düşük BPK değerlerinde (2 kN ve 4 kN) malzeme akışı daha serbest olduğundan, radius bölgelerindeki kalınlık artışı belirginleşmiş, ancak buruşma riski artmıştır.
- Yüksek BPK değerlerinde (8 kN ve 10 kN) ise malzeme akışı kısıtlanmış, özellikle kalıp radyüsü çevresinde daha fazla incelme gözlemlenmiştir. Bu durum, yırtılma riskini artıran bir faktör olarak öne çıkmıştır.
- Şekillendirme kuvveti grafikleri, BPK arttıkça hem kalıp hem de zımba kuvvetlerinin belirgin şekilde arttığını göstermiştir. 10 kN BPK değerinde, plastik deformasyonun maksimum seviyeye ulaştığı ve lokal gerilme konsantrasyonlarının oluştuğu tespit edilmiştir.
- Optimum BPK aralığının 6 kN civarında olduğu, bu değerlerde hem incelme hem de kalınlaşmanın dengeli dağıldığı ve şekillendirme kalitesinin en yüksek seviyede korunduğu görülmüştür.

Sonuç olarak, derin çekme prosesinde baskı plakası kuvvetinin doğru seçimi, parça kalitesi, malzeme verimi ve proses güvenilirliği açısından kritik öneme sahiptir. Bu çalışma, BPK'nın etkisini sayısal olarak modellenmesine dayanarak optimize edilmiş proses parametreleri önermekte ve endüstriyel uygulamalara yönelik pratik bir rehber sunmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] C. Özek and E. Ünal, “The effect of die/blank holder angles on limit drawing ratio and wall thickness in deep drawing of square cups,” *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, vol. 27, no. 3, pp. 615–622, 2012, Accessed: Mar. 11, 2022. [Online]. Available: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/gazimmfd/issue/6700/88677>
- [2] T. Trzepieciński, “Approaches for Preventing Tool Wear in Sheet Metal Forming Processes,” *Machines*, vol. 11, no. 6, p. 616, Jun. 2023, doi: 10.3390/machines11060616.
- [3] R. Edis, T. Sinmazcelik, and A. T. Erturk, “Measuring applied force and energy consumption in deep drawing die Sets: An experimental and numerical analysis of CrN and CrTiN PVD coating effects,” *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, vol. 224, no. November 2023, p. 113841, 2024, doi: 10.1016/j.measurement.2023.113841.
- [4] K. Barth, M. Afrasiabi, and M. Bambach, “Exploring forming limit of stainless steel below room temperature by Nakazima tests using an actively cooled additively manufactured punch,” *Mechanics of Materials*, vol. 207, no. March, p. 105392, 2025, doi: 10.1016/j.mechmat.2025.105392.
- [5] E. ÜNAL, B. AKIN, and F. KARACA, “Kare Profilli Kapların Açılı Derin Çekme İşlem Parametrelerinin Etkilerinin Bulanık Mantık ile Modellenmesi,” *International Journal of Innovative Engineering Applications*, vol. 6, no. 2, pp. 334–339, Dec. 2022, doi: 10.46460/ijiea.1176199.
- [6] C. OZEK and H. AKKELEK, “Investigation of Deep Drawability of Rectangular Shaped Cups in Deep Drawing Dies,” *International Journal of Innovative Engineering Applications*, vol. 5, no. 2, pp. 187–194, Dec. 2021, doi: 10.46460/ijiea.1006144.
- [7] K. Seshacharyulu, C. .Bandhavi, B. B. Naik, S. S. Rao, and S. K. Singh, “Understanding Friction in sheet metal forming-A review,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, no. 9, pp. 18238–18244, 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2018.06.160.
- [8] A. Shafiee Sabet *et al.*, “Tribological investigations on aluminum alloys at different contact conditions for simulation of deep drawing processes,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 68, pp. 546–557, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.jmapro.2021.05.050.
- [9] A. A. Emamverdian, Y. Sun, C. Cao, C. Pruncu, and Y. Wang, “Current failure mechanisms and treatment methods of hot forging tools (dies) - a review,” *Engineering Failure Analysis*, vol. 129, p. 105678, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.engfailanal.2021.105678.
- [10] S. Ataş Bakdemir, D. Özkan, C. Türküz, and S. Salman, “Wear performance under dry and lubricated conditions of duplex treatment TiN/TiCrN coatings deposited with different numbers of CrN interlayers on steel substrates,” *Wear*, vol. 526–527, p. 204931, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.wear.2023.204931.
- [11] F. KARACA and G. T. GÜNGÖR, “AISI 304 ÖSTENİTİK PASLANMAZ ÇELİK ÜZERİNE ELEKTROKİMYASAL SERAMİK KAPLAMANIN ARAŞTIRILMASI,” in *3RD INTERNATIONAL BLACK SEA MODERN SCIENTIFIC RESEARCH CONGRESS*, Samsun, 2023, pp. 349–350.
- [12] C. ÖZEK and F. KARACA, “Makine Mühendisliğinde Malzemeler, Kullanım Yerleri ve Çeliklerin Isıl İşlemleri,” in *MÜHENDİSLİKTE GÜNCEL YAKLAŞIMLAR*, 1st ed., B. AKDEMİR and U. ÖZKAYA, Eds., İzmir, 2023, ch. 7, pp. 141–184.
- [13] R. Pereira, N. Peixinho, S. L. Costa, V. Blanco, V. Carneiro, and S. Cortez, “Parametric study

of local laser heat treatment technology on multi forming of advanced-high strength steel (AHSS) part with complex shape,” *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, vol. 7, no. 2, pp. 248–259, 2024, doi: 10.1016/j.ijlmm.2023.10.002.

- [14] C. OZEK and H. AKKELEK, “Investigation of Deep Drawability of Rectangular Shaped Cups in Deep Drawing Dies,” *International Journal of Innovative Engineering Applications*, vol. 5, no. 2, pp. 187–194, Dec. 2021, doi: 10.46460/ijiea.1006144.
- [15] Z. Liu, L. Li, G. Wang, J. Chen, and J. Yi, “Springback behaviors of extruded 6063 aluminum profile in subsequent multi-stage manufacturing processes,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 109, pp. 1–13, 2020.
- [16] J. Li, X. Chen, X. Chen, H. Liu, and X. Liu, “Deep drawing of a rectangular cup with a small radius at the bottom circular arc by employing a locally-thickened plate,” *Manufacturing Review*, vol. 9, p. 16, Jul. 2022, doi: 10.1051/mfreview/2022015.
- [17] Q. T. Pham, M. S. Islam, A. Barlo, M. Sigvant, L. P. Caro, and K. Trana, “Modeling the strain localization of shell elements subjected to combined stretch–bend loads: Application on automotive sheet metal stamping simulations,” *Thin-Walled Structures*, vol. 188, p. 110804, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.tws.2023.110804.
- [18] F. Karaca, “Effect of turning parameters of AISI 316 stainless steel on temperature and cutting forces with finite element model,” *Thermal Science*, vol. 26, no. 1, pp. 61–66, 2002.
- [19] C. Özek and V. Taşdemir, “Derin çekme işlemi sonrası malzemede oluşan sertlik dağılımı üzerine kalıp yüzey açısı, sıcaklık ve baskı plakası kuvveti etkilerinin incelenmesi,” *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, vol. 6, no. 3, pp. 35–41, 2018, doi: 10.21541/apjes.376495.
- [20] M. Ryser, P. Hora, and M. Bambach, “Algorithmic determination of measurement locations for surface point markers in sheet metal forming and application in inverse modelling – A numerical and experimental study,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 312, p. 117848, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2022.117848.
- [21] C. Özek, A. Haşçalık, U. Çaydaş, F. Karaca, and E. Ünal, “Turning OF AISI 304 Austenitic Stainless Steel,” *Journal of Engineering and Natural Sciences*, vol. 2006, no. 2, pp. 117–121, 2006.
- [22] E. Ünal, F. Karaca, and F. Sarsılmaz, “Investigation of interface microstructure properties of AISI 316L/AISI 4140 steel couple welded by friction welding process,” *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, vol. 34, no. 2, pp. 701–708, 2019, doi: 10.17341/gazimmfd.416528.
- [23] T. Altınbalık and A. Tonka, “Numerical and Experimental Study of Sheet Thickness Variation in Deep Drawing Processes,” *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, vol. IV, no. 2, pp. 2067–3604, 2012.
- [24] C. Özek and E. ÜNAL, “The Effect of Surface Angle of Flowing Sheet on The Limit Drawing Ratio and The Wall Thickness Change in Drawing of Spherical Bottom Cups,” *Afyon Kocatepe University Journal of Sciences and Engineering*, vol. 18, no. 3, pp. 1149–1157, Dec. 2018, doi: 10.5578/fmbd.67820.
- [25] E. Ünal and C. Özek, “A study on the wall thickness in the angular deep drawing process,” *Materialpruefung/Materials Testing*, vol. 59, no. 2, pp. 178–182, Feb. 2017, doi: 10.3139/120.110980.
- [26] C. Özek and V. Taşdemir, “Alüminyum Alaşımının Derin Çekilmesine Sıcaklığın Etkisinin

Deneyisel ve Sayısal Olarak Araştırılması,” *Journal of Polytechnic*, Feb. 2018, doi: 10.2339/politeknik.392126.

- [27] Ö. SEÇGİN and V. TAŞDEMİR, “Finite Element Analysis of Angular Deep Drawing Process without Blank Holder,” *International Journal of Innovative Research in Applied Sciences and Engineering*, vol. 4, no. 6, pp. 789–792, Dec. 2020, doi: 10.29027/IJIRASE.v4.i6.2020.789-792.

BÖLÜM 3

DERİN ÇEKME KALİTESİNİN İLKEL PARÇA ÇAPI İLE İLİŞKİSİ: AA7075-T4 ALAŞIMI ÜZERİNE BİR SİMÜLASYON ÇALIŞMASI

Faruk KARACA¹

¹ Prof. Dr., Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0003-1874-9274

Derin çekme, düz boşlukları yüksek üretim hızlarıyla karmaşık üç boyutlu parçalara dönüştürebildiği için en yaygın olarak kullanılan sac şekillendirme işlemlerinden biridir [1]. Tipik derin çekme bileşenleri arasında otomotiv gövde panelleri, mutfak lavabo evyeleri, içecek kutuları ve havacılık braketleri bulunur ve bunların tümü 6 mm'den daha ince saclardan üretilir [2]. Bu işlem, tek bir pres vuruşuyla kapalı bir şekil geometrisi oluşturulabilirken malzeme kalıp ile sürekli temas halinde kaldığından dolayı ikincil işlem ihtiyacını en aza indirdiği için seri üretim ortamlarında kullanımını cazip kılmaktadır. Bununla birlikte, derin çekme parçanın geometrisi, sac levha kalıp boşluğuna çekilirken oluşan plastik gerilimin dağılımına oldukça duyarlıdır; aşırı gerilim yırtılma, incilmesi veya kırışmaya neden olabilirken, yetersiz gerilim ise çekme işleminin eksik kalmasına neden olur. Sonuç olarak, bir levhanın derin çekilme kabiliyeti genellikle şekillendirme sınır testleri ile deneysel olarak ve sonlu elemanlar (SE) simülasyonları ile sayısal olarak değerlendirilir. Bu simülasyonlar, belirli bir sacın kalan şekillendirme potansiyelini tahmin etmek için şekillendirme kriterleri ile birleştirilen gerilme ve gerinim diyagramları sağlar [2].

Derin çekmenin temel mekanizması, sacı şekillendirilmiş kalıba doğru iten sert bir zımba ile pot çemberi malzeme akışını sınırlamak için kontrol edilebilir normal basınç uygulamasıdır. Zımba basıncı malzemenin akma gerilmesini aştığında, sac büyük bir plastik deformasyona uğrar ve kalıp profilini takip eden bir eğrilik oluşturur; bu işlem normalde ortam sıcaklığında gerçekleştirilir, çünkü ticari çeliklerin ve alüminyum alaşımlarının çoğu ek ısıtma olmadan yeterli süneklik gösterir [3], [4]. Uygulanan yük, sacı kalıp yarıçapı boyunca gerdirmek için yeterince yüksek, ancak kalıp omuz bölgesinde aşırı incilmesi önlemek için yeterince düşük olmalıdır. Kabın çıkarılmasından sonra meydana gelen doğal elastik geri kazanım, genellikle geri yaylanma olarak adlandırılır. Özellikle yüksek mukavemetli çelikler ve yüksek akma modülü oranlarına sahip alüminyum alaşımları için nihai bükülme açısını veya kab yarıçapını değiştirebileceğinden, tasarımda ek bir zorluk oluşturur [3]. Birincil yükleme dizisine ek olarak, derin çekme işlemi çekme, şekillendirme ve boşaltma aşamalarına bölünebilir; bu aşamaların her biri genel gerinim yoluna katkıda bulunur ve süreç modellenmesinde doğru bir şekilde yapılmalıdır.

Derin çekme parçalarının kalitesi ve tekrarlanabilirliği çok sayıda proses değişkeni tarafından belirlenir. Akma mukavemeti, deformasyon sertleşmesi üssü, anizotropik r değerleri ve gerinim hızı duyarlılığı gibi malzeme özellikleri, sacın uygulanan eğrilikleri bozulmadan sürdürme kabiliyetini etkiler [5]. Takım geometrisi, özellikle kalıp yarıçapı, zımba yarıçapı ve omuz açısı, gerinim dağılımını ve malzeme akışı için gereken eğilme momentinin büyüklüğünü doğrudan etkiler [6], [7]. Tribolojik koşullar da aynı derecede önemlidir: boşluk ile kalıp veya zımba arasındaki sürtünme, yağlama varlığı ve takımın yüzey kalitesi, etkili çekme kuvvetini değiştirir ve kırışıklık veya yırtılma gibi kusurları bastırabilir veya şiddetlendirebilir [6]. Son araştırmalar, kalıbın yüzey mühendisliğinin (örneğin, CrN, CrTiN veya TiAlN fiziksel buhar biriktirme kaplamalarının uygulanması) aşınmayı azaltabileceğini, sürtünme katsayısını düşürebileceğini ve dolayısıyla gerekli şekillendirme kuvvetini ve enerji tüketimini azaltabileceğini, böylece boyutsal doğruluğu iyileştirebileceğini göstermiştir [8], [9]. Ek olarak, zımba ve kalıp arasındaki boşluk, boşluk tutucu basıncı ve çekme hızı, malzeme akışını incilmesi ile dengelemek için ayarlanabilen proses parametreleridir, ancak bunların etkileşimi oldukça doğrusal değildir ve genellikle deneysel kalibrasyon gerektirir.

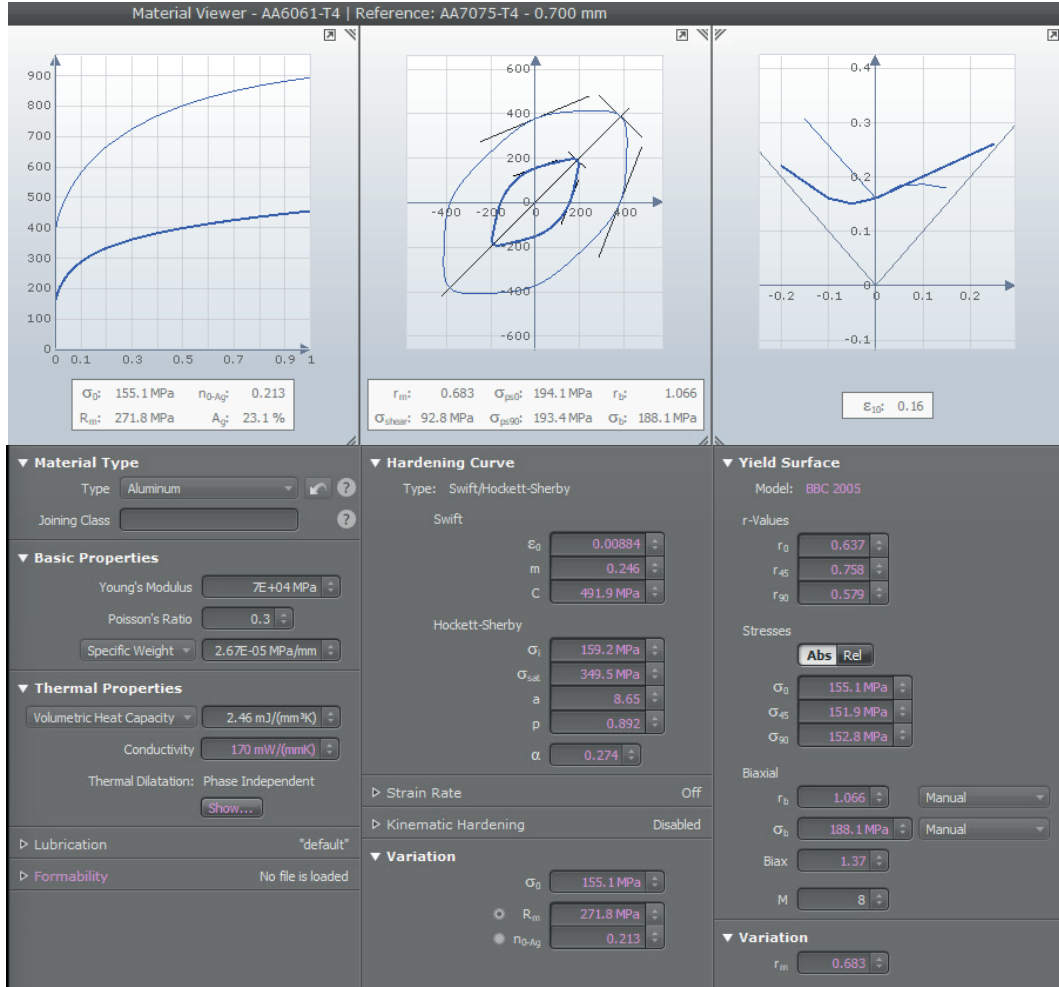
Derin çekme, karmaşık ve birleşik bir mekanik işlem olduğundan, modern araştırmalar, takım tasarımı ve işlem optimizasyonuna rehberlik etmek için giderek daha fazla tahminsel sayısal araçlara güvenmektedir. Genellikle ANSYS gibi açık çözücülerle veya AutoForm gibi ticari sac

metal paketleriyle gerçekleştirilen sonlu eleman analizleri, yüksek mukavemetli alaşımlarda gözlemlenen yükleme-boşaltma histerezisini yeniden üretmek için sofistike yapısal modeller (izotropik, kinematik, karışık sertleşme veya değişken elastik modül formülasyonları) içerir [2], [3], [10]. Doğru SE tahminleri, tek eksenli çekme testleri, döngüsel yükleme deneyleri ve gerektiğinde doğrusal olmayan elastik geri kazanımı yakalamak için kalibre edilmiş akor modülü eğrilerinden elde edilen hassas malzeme verilerini gerektirir [3]. Derin çekme sırasında geçici kuvvet, sürtünme ve enerji tüketimini ölçmek için tamamlayıcı deney düzenekleri geliştirilmiştir; bu düzenekler, simüle edilmiş kuvvet zaman grafiklerinin doğrudan doğrulanmasını sağlar ve sürtünme ısısının takım aşınmasına katkısı hakkında bilgi verir [9]. Ölçülen kuvvet/yer değiştirme verilerinin SE'den elde edilen gerinim alanlarıyla entegrasyonu, mühendislerin belirli bir sac metal sınıfına özgü şekillendirme sınır diyagramları oluşturmaya olanak tanır, böylece fiziksel denemelerden önce boyunlanma veya buruşmanın başlangıcını tahmin edebilirler. Sonuç olarak, titiz deneyler, gelişmiş malzeme modelleme ve yüksek doğruluklu simülasyonun sinerjik kullanımı, çağdaş derin çekme teknolojisinin temelini oluşturur ve sürecin günümüz otomotiv ve havacılık endüstrilerinin sıkı tolerans ve ağırlık azaltma hedeflerini karşılayabilmesini sağlar [11], [12], [13].

Sonlu Elemanlar Simülasyonu

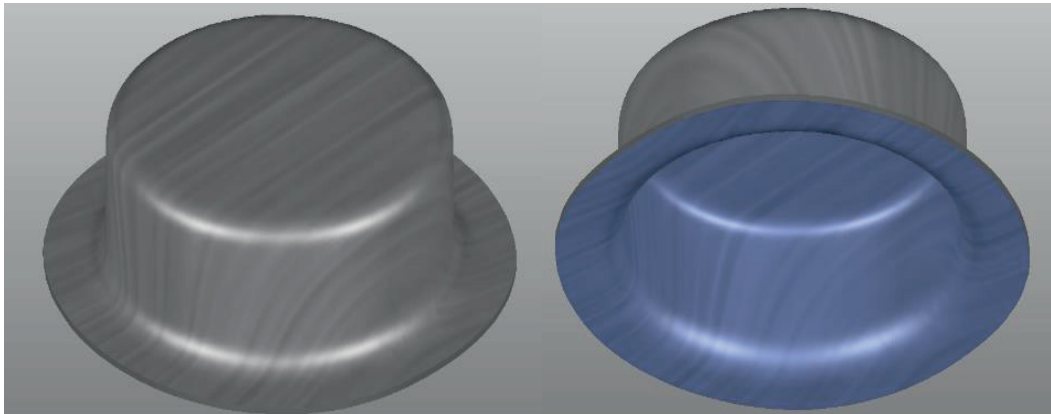
Derin çekme deneylerinin sonlu elemanlar metodu ile yapılmasında öncelikle matris, baskı plakası, zımba ve oluşması istenen kap Solidworks programı kullanılarak modellenmiştir. Burada deneylerde kullanılan kalıp elemanlarının bütün geometrik özellikleri dikkate alınarak 3 boyutlu olarak modellenmiştir. Sayısal ortamda 3 boyutlu olarak modellenen kalıp elemanları AutoForm programında kullanılmak üzere iges formatında kaydedilmiştir. İges uzantısı ile kaydedilen kalıp elemanları Autoform programına aktararak sonlu elemanlar metodunun veri yapısına uygun hale getirilmiştir.

Sonlu elemanlar metodu paket programına aktarılan kalıp seti için öncelikle her bir kalıp parçası için gerekli malzeme ataması yapılır. Bu işlemden sonra derin çekme işleminde kalıp malzemeleri arasında oluşan temaslar programa eklenir. Ardından bütün deney seti için ağ yapısı oluşturulur. Derin çekme işleminde kullanılan kuvvet ve ilerleme miktarı gibi sınır şartları eklenerek gerekli çözümleme işlemi yapılır. İlkel parça için kullanılacak olan malzeme 0.7mm kalınlığında AA7075 T4 olarak yazılım kütüphanesinden seçilerek alınmıştır. Seçilen malzemenin mekanik özellikleri Şekil 1 'de verilmiştir.

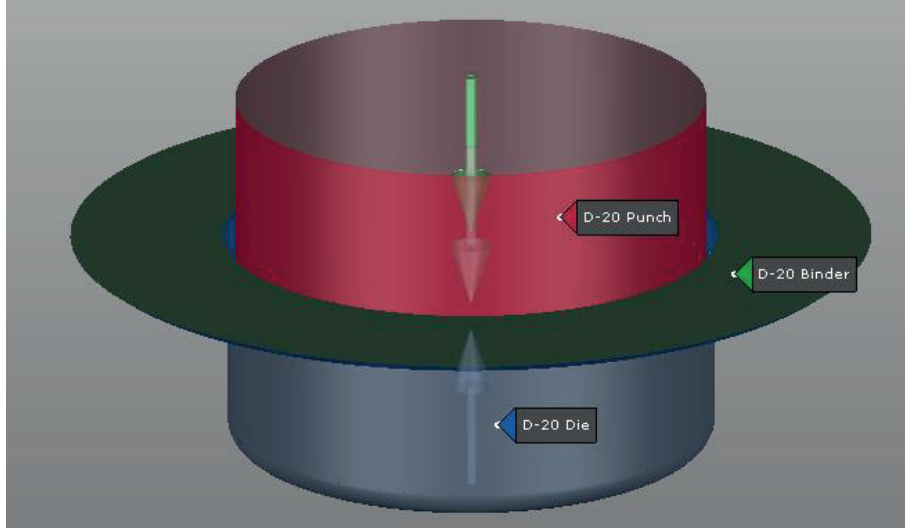


Şekil 1. Sonlu elemanlar metodu analizlerinde kullanılan AA7075 T4 malzemesin mekanik özellikleri

Sonlu elemanlar metodunda şekillendirilecek kabın görünümü Şekil 2 de ve matris, baskı plakası, zımbaya ait görünümler Şekil 3’de gösterilmiştir.

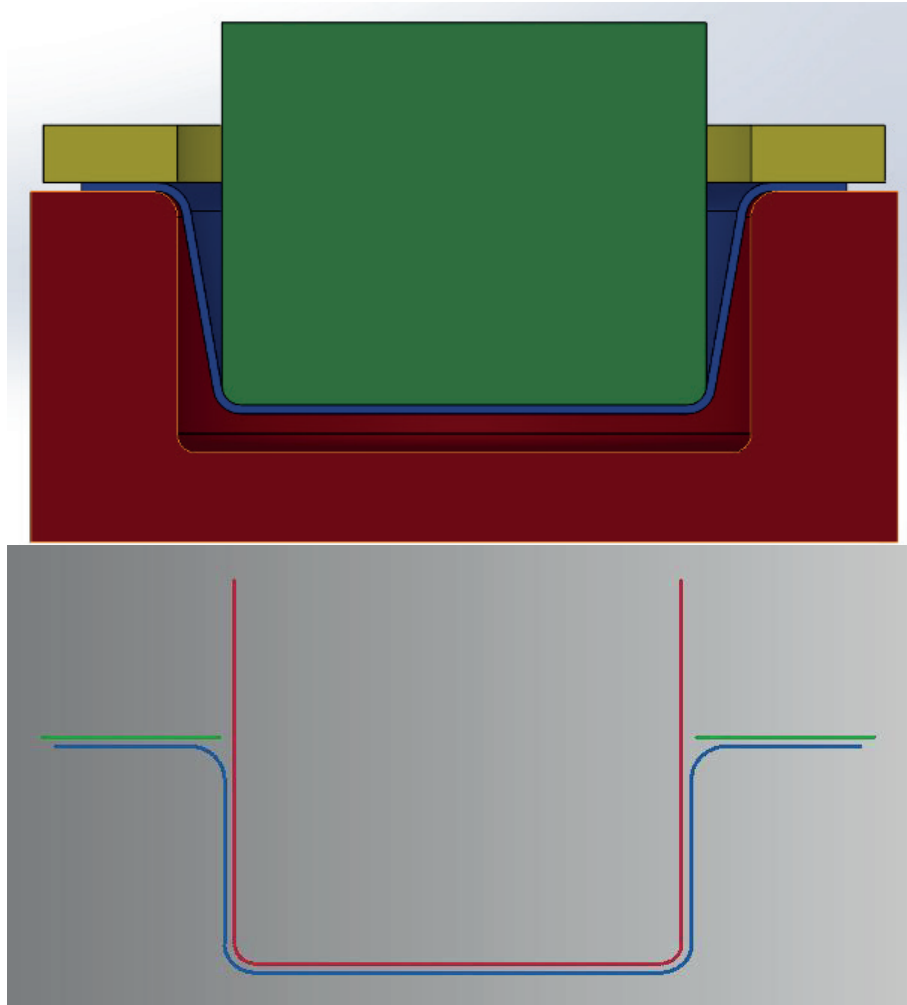


Şekil 2. Üretilecek kabın görünümü



Şekil 3. Matris, baskı plakası, zımbaya ait görünüm.

Yapılan sonlu elemanlar metodu analizinde zımba radyüsü 1.5 mm, zımba çapı 40 mm, matris radyüsü 2.2 mm, kap derinliği 17 mm olarak belirlendi. İlkel parça çapı için seçilen değerler 75, 80 ve 85 mm dir. Sonlu elemanlar modelinin montajlanmış görünümü Şekil 4’de verilmiştir.



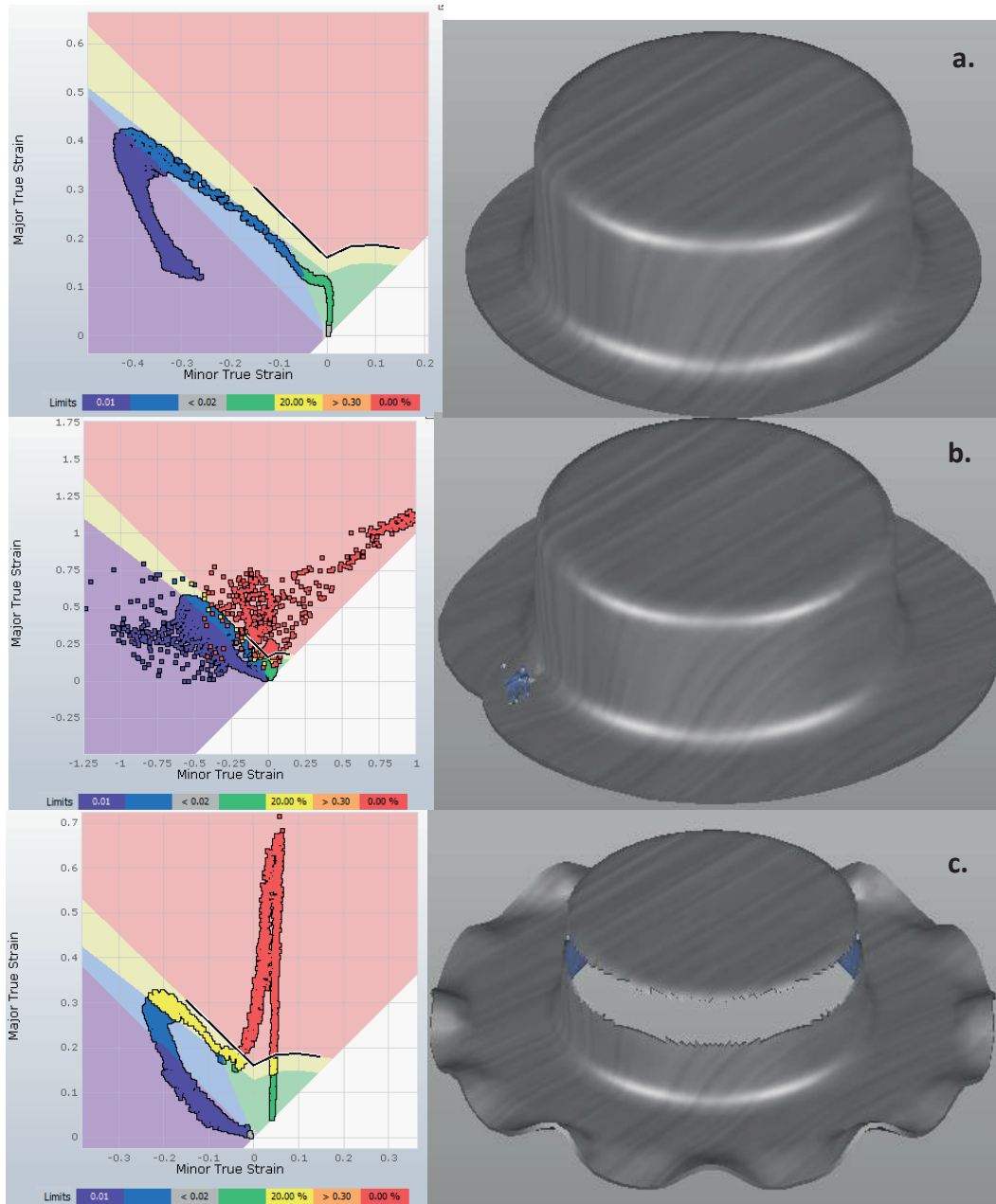
Şekil 4. Sonlu elemanlar modelinin montajlanmış görünümü

İlkel parça üzerindeki deformasyonlar ve gerilmeler inceleneceğinden dolayı zımba, matris ve baskı plakası model içerisinde rijit olarak kabul edilmiştir. Şekillendirme başlangıcında baskı plakasına 2.5 kN yük sabit olacak şekilde uygulanmıştır.

İlkel parçanın şekillendirmesinde oluşan deformasyonları ve gerilmeleri incelemek daha kolay olacaktır. Sayısal ortamda 3 boyutlu olarak modellenen parçaların montaj işlemi yapılmıştır ve her bir parametre için ayrı model olacak şekilde oluşturulmuş ve analizleri yapılmıştır.

Sonlu Eleman Simülasyonu Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Belirli bir prosesin şekillendirilebilirliğini değerlendirmek için bir referans olarak Şekillendirme Limit Diyagram'ları (ŞLD) kullanılır [14]. Bu grafiksel gösterim, kalıp deneme aşamasında bir boyun verme (necking) durumunun beklenip beklenmeyeceğini gösterir.

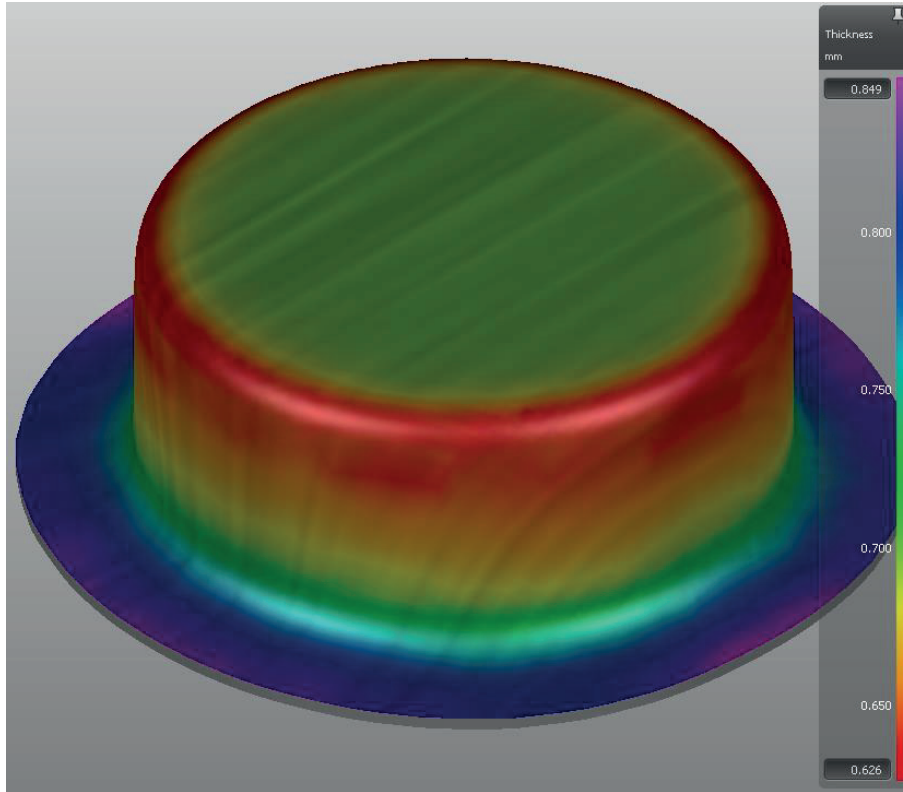


Şekil 5. Üç ilkel parça modeline ait karşılaştırmalı ŞLD diyagramlarını göstermektedir (a. Çap 75 mm, b. Çap 80 mm ve c. Çap 85 mm).

Şekil 5, üç farklı ilkel parça çaplarındaki modeli altındaki kıyaslama parçalarının ŞLD diyagramlarını göstermektedir. Dikey ve yatay eksenler sırasıyla büyük ve küçük şekil değişimlerine (strain) karşılık gelir. ŞLD'deki düzgün eğri, Şekillendirme Limit Eğrisi (ŞLE) olarak adlandırılır ve güvenli ve hasarlı bölgeleri ayırır (ŞLE'nin üzerindeki bir şekil değişimi durumu, yerel boyun verme veya kopmayı ifade eder).

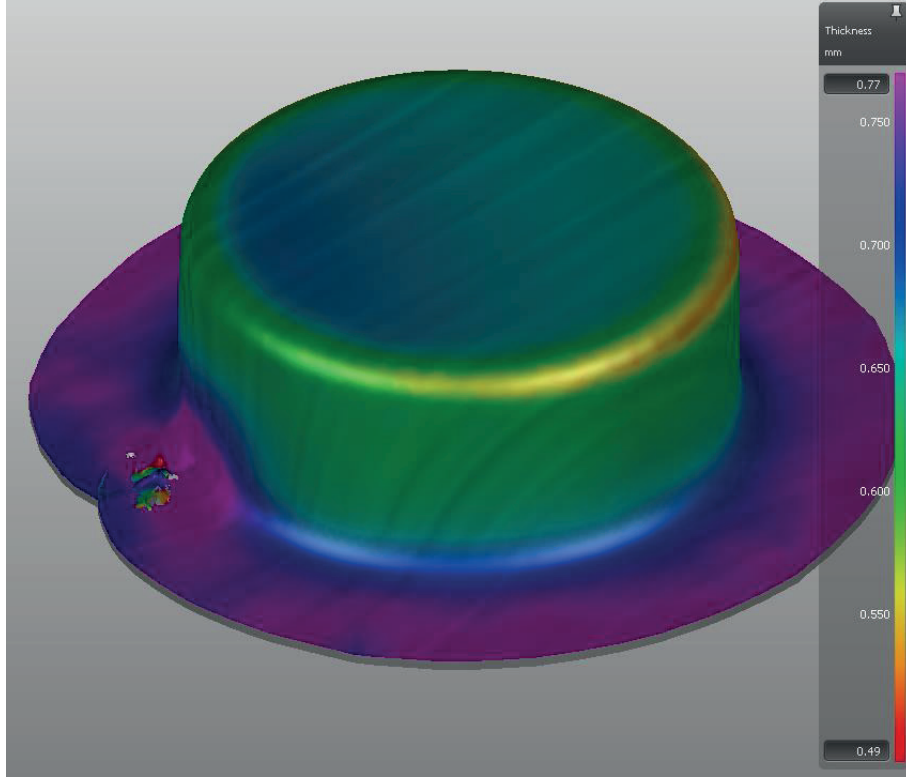
ŞLD üzerinde gösterilen nokta bulutu, sayısal simülasyondaki her bir elemanın şekil değişimi durumunu gösterir. Soldaki mor noktalar, düzlemde esas olarak basma gerilmeleri altındaki malzeme alanlarına karşılık gelir. Esasen, baskın şekil değişimi basma altındadır. Buna bağlı olarak, bu noktalar büyük şekil değişiminin mutlak değerine kıyasla, küçük şekil değişiminin mutlak değerinde daha yüksek bir değer gösterir. Bu noktalar, baskı plakası/kalıp sıkıştırma alanında yer alıyorsa kalınlıkta artışa meyilli olacak, ancak o alanın dışındaysa parça üzerinde buruşukluk riski taşıyan bir alan olabilir [15], [16].

Bu ŞLD gösterimlerinden Şekil 5, farklı ilkel parça çapları modelinin çekme tahmini çıktısı üzerindeki etkisi açıkça gözlemlenebilir. İlkel parça çapının azalmasıyla çekme durumunda belirgin bir artma gözlenir. Alüminyum AA7075 T4 levha kıyaslama durumu için, incelenen modelin boyun verme noktaları (ŞLE'nin üzerindeki kırmızı alan) karşılaştırıldığında ilkel parça çapı 75 mm olan işlemin derin çekme prosesinin en ideal işlem olduğu görülmektedir (tüm noktalar ŞLE'nin altındadır Şekil 5a). Ancak, şu not edilmelidir ki, ilkel parça çapı 80 ve 85 mm olan modeller arasında, ŞLD üzerindeki şekil değişimi tepe noktalarının önemli ölçüde arttığı belirgin farklar vardır. Bunun açık bir örneği, Şekil 5b ve 5c dir. Burada ilkel parça çapının artmasıyla beraber şekillendirme basıncının artmasından kaynaklanan büyük bir alanın ŞLE'nin bariz üzerinde kaldığı ve kapta deformasyonlara neden olduğu görülmektedir.

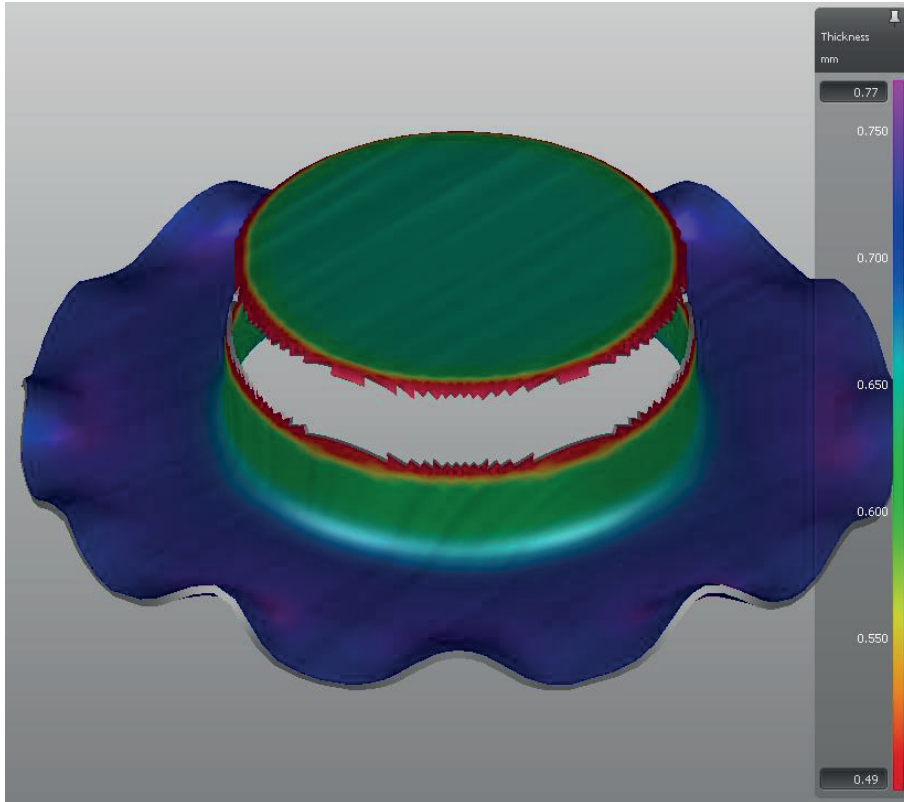


Şekil 6. İlkel parça çapı 75 mm olan modelin kalınlık değişimi

Şekil 6,7 ve 8, derin çekilmiş parçaların geometrilerini ve farklı ilkel parça çapları kullanılarak yapılan simülasyonların sonuçlarını göstermektedir. Yeşil alanlar şekillendirilmiş parçanın kalınlık değişimi arasındaki en küçük farkı göstermektedir. Koyu maviye doğru giderken sac malzemede oluşan kalınlaşma, koyu kırmızı alanlar ise sac malzemede oluşan incelmeleri göstermektedir.



Şekil 7. İlkel parça çapı 80 mm olan modelin kalınlık değişimi



Şekil 8. İlkel parça çapı 85 mm olan modelin kalınlık değişimi

Genel olarak, en büyük kalınlık farkları parçaların kenarlarında veya radyüs bölgelerinde meydana gelmiştir [17], [18]. Şekil 6, AA7075 T4 alaşımı için 75 mm ilkel parça çapı değerine sahip model en iyi sonuçları vermiştir. 80 mm çapa sahip model arasındaki kalınlık farkları fazla olmamakla beraber kenar kısımda ondülasyon meydana geldiği görülmektedir. Buna karşılık, ilkel parça çapı 85 olan geometri hem merkezde hem de kenarlarda büyük deformasyonlara uğramaktadır (Şekil 8)[19], [20].

Genel Sonuçlar

Alüminyum alaşımı AA7075-T4 üzerinde, ilkel parça çapı değişiminin derin çekme işleminde şekillendirme sınır diyagramı ve kalınlık değişimleri modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ŞLD grafikleri ile kalınlık değişimi yüzey topografyalarının modelleri karşılaştırılmıştır. Farklı ilkel çaplar kullanılarak yapılan simülasyonların sonuçlarına göre, en ideal derin çekme işlemi 75 mm çap değerinde elde edilmiştir. Bunun üzerindeki değerlerde önce ondülasyon devamında ise kap tabanında yırtılma gözlenmiştir. Özellikle, sabit zımba hızı, sabit plakası kuvveti ve sabit kalıp geometrisinde ilkel parça çapı değişiminin derin çekme işleminin kap kalitesini doğrudan etkilediği tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] C. Özek and E. Ünal, “The Effect of Surface Angle of Flowing Sheet on The Limit Drawing Ratio and The Wall Thickness Change in Drawing of Spherical Bottom Cups,” *Afyon Kocatepe University Journal of Sciences and Engineering*, vol. 18, no. 3, pp. 1149–1157, Dec. 2018, doi: 10.5578/fmbd.67820.
- [2] K. Barth, M. Afrasiabi, and M. Bambach, “Exploring forming limit of stainless steel below room temperature by Nakazima tests using an actively cooled additively manufactured punch,” *Mechanics of Materials*, vol. 207, no. March, p. 105392, 2025, doi: 10.1016/j.mechmat.2025.105392.
- [3] R. Edis, T. Sinmazcelik, and A. T. Erturk, “Measuring applied force and energy consumption in deep drawing die Sets: An experimental and numerical analysis of CrN and CrTiN PVD coating effects,” *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, vol. 224, no. November 2023, p. 113841, 2024, doi: 10.1016/j.measurement.2023.113841.
- [4] C. Özek and V. Taşdemir, “Alüminyum Alaşımının Derin Çekilmesine Sıcaklığın Etkisinin Deneysel ve Sayısal Olarak Araştırılması,” *Journal of Polytechnic*, Feb. 2018, doi: 10.2339/politeknik.392126.
- [5] A. Mulay, H. Hirani, and S. K. Choudhary, “Numerical Modeling and Optimization with Novel Process Parameters in the Incremental Forming of DC04 Sheets,” *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 32, no. 5, pp. 2344–2355, Mar. 2023, doi: 10.1007/s11665-022-07263-9.
- [6] T. Trzepieciński, “Approaches for Preventing Tool Wear in Sheet Metal Forming Processes,” *Machines*, vol. 11, no. 6, p. 616, Jun. 2023, doi: 10.3390/machines11060616.
- [7] C. ÖZEK, E. ÜNAL, and M. BULUT ÖZEK, “Kare Kesitli Kapların Derin Çekilmesinin Bulanık Mantıkla Modellenmesi,” in *Uluslararası STEM ve Eğitim Bilimleri Kongresi, MUŞ*, 2018.
- [8] A. A. Emamverdian, Y. Sun, C. Cao, C. Pruncu, and Y. Wang, “Current failure mechanisms and treatment methods of hot forging tools (dies) - a review,” *Engineering Failure Analysis*, vol. 129, p. 105678, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.engfailanal.2021.105678.
- [9] S. Ataş Bakdemir, D. Özkan, C. Türküz, and S. Salman, “Wear performance under dry and lubricated conditions of duplex treatment TiN/TiCrN coatings deposited with different numbers of CrN interlayers on steel substrates,” *Wear*, vol. 526–527, p. 204931, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.wear.2023.204931.
- [10] C. ÖZEK and E. ÜNAL, “Açılı Derin Çekme Kalıplarında Kare Kaplar İçin Limit Çekme Oranının Deneysel ve Sayısal Olarak Karşılaştırılması,” in *Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS’xx11)*, Elazığ, May 2011.
- [11] A. Zabala, E. S. de Argandoña, D. Cañizares, I. Llavori, N. Otegi, and J. Mendiguren, “Numerical study of advanced friction modelling for sheet metal forming: Influence of the

die local roughness,” *Tribology International*, vol. 165, no. August 2021, doi: 10.1016/j.triboint.2021.107259.

- [12] E. Ünal and F. Karaca, “ANSYS Workbench Modelling of Steel Alloys in The Turning Operation,” in 8th International Advanced Technologies Symposium, Elazığ, 2017, pp. 3033–3038.
- [13] C. Özek and E. Ünal, “The effect of die/blank holder angles on limit drawing ratio and wall thickness in deep drawing of square cups,” *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, vol. 27, no. 3, pp. 615–622, 2012
- [14] Z. Yang, C. Zhao, G. Dong, and Z. Chen, “Experimental calibration of ductile fracture parameters and forming limit of AA7075-T6 sheet,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 291, p. 117044, May 2021, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117044.
- [15] V. R. Shinge and U. A. Dabade, “Experimental Investigation on Forming Limit Diagram of Mild Carbon Steel Sheet,” *Procedia Manufacturing*, vol. 20, pp. 141–146, 2018, doi: 10.1016/j.promfg.2018.02.020.
- [16] V. Taşdemir, “Derin çekme işlemi sonrası malzemede oluşan sertlik dağılımı üzerine kalıp yüzey açısı, sıcaklık ve baskı plakası kuvveti etkilerinin incelenmesi,” *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, pp. 1–1, Sep. 2018, doi: 10.21541/apjes.376495.
- [17] J. van Beeck, A. R. Chezan, and T. V Khandeparkar, “Advanced tribomechanical modelling of sheet metal forming for the automotive industry,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 418, p. 012096, Sep. 2018, doi: 10.1088/1757-899X/418/1/012096.
- [18] S. Berahmani, C. Bilgili, G. Erol, J. Hol, and B. Carleer, “The effect of friction and lubrication modelling in stamping simulations of the Ford Transit hood inner panel: a numerical and experimental study,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 967, no. 1, p. 012010, Nov. 2020, doi: 10.1088/1757-899X/967/1/012010.
- [19] C. ÖZEK, “Dikdörtgen Kapların Derin Çekilmesinde Kalıp Geometrisinin Kap Cidar Kalınlıkları Üzerindeki Etkisi,” *Gazi Journal of Engineering Sciences*, vol. 9, no. 1, pp. 79–92, Apr. 2023, doi: 10.30855/gmbd.0705054.
- [20] E. Ünal and U. Özkan, “AISI 304 Östenitik Paslanmaz Çelik Kare Kapların Derin Çekme Performansı: Kalıp Geometrisi ve Parametre Optimizasyonu,” *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 37, no. 2, pp. 533–541, Sep. 2025, doi: 10.35234/fumbd.1699070.

BÖLÜM 4

BORAKS VE DOĞAL DOLGU TAKVİYELİ ABS'NİN ERİYİK AKIŞ İNDEKSİNDEKİ DEĞİŞİMLERİN İNCELENMESİ

Yılmaz KISMET¹

¹ Doç. Dr., Munzur Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Tunceli/Türkiye, Orcid: 0000-0003-3145-6214, ykis-
met@munzur.edu.tr

1.Giriş

Üretimleri kolay, düşük maliyetli ve kolay işlenebilir olduklarından dolayı termoplastik polimerler endüstrinin birçok alanında yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Molekül zincir yapılarına göre amorf ve yarı kristal/kristal olarak iki guruba ayrılan termoplastiklerde amorf karakterde olanların erime noktaları sabit değildir ve geniş bir aralıkta yer alır (Akkurt, 1991; Ravve, 2012). Bu termoplastikler aynı zamanda saydam yapıda olup malzemenin elastikiyet özelliğini arttırmırlar. Kristal termoplastikler ise erime noktaları belirgin ve daha yüksek mukavemet özelliklere sahip termoplastiklerdir. Bu termoplastikler aynı zamanda ticari ve mühendislik olarak da ayırt edilmektedirler. Mühendislik termoplastikleri ticarilere göre daha yüksek performans gösteren uygulamalarda tercih edilen termoplastiklerdir. Bu termoplastiklerin ısı direnci, kimyasal direnci ve darbe dayanımları yüksek olup alev geciktirme özellikleri de iyidir (Ravve, 2012; Akyüz, 1999).

Akrilonitril bütadien stiren (ABS) amorf yapıda ticari bir termoplastik olmasına rağmen iyi darbe direncine sahiptir. Polibütadien içerisinde stiren ve akrilonitirilin polimerizasyonu ile elde edilen ABS kolay şekil alabilme özelliğine sahip olup endüstride otomobil parçalarından çocuk oyuncaklarına kadar çok geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. ABS aynı zamanda yaygın olarak 3D yazıcılarda filament olarak kullanılmaktadır. Bu şekilde özel tasarım gerektiren birçok fonksiyonel ya da dekoratif ürünler elde edilmektedir (Doner vd., 2023; Biswas vd., 2024). Son yıllarda ABS üzerinde yapılan araştırmalar, özellikle nano ölçekte katkı maddeleri kullanılarak mekanik ve termal performansın artırılmasına odaklanmıştır. 3D yazıcı filament üretimi için ABS matrisine titanyum nitrür (TiN) nanopartikülleri eklenerek ve ağırlıkça %6'lık dolgu oranında ABS'nin eğilme modülünde belirgin artışlar elde edilmiştir (Vidakis vd., 2023). Bu çalışma, katkı yoğunluğunun dikkatle optimize edildiğinde filament kalitesini bozmayarak hem sertlik hem de mekanik direnç kazandırılabilceğini göstermektedir. Ayrıca kimyasal ve dielektrik özelliklerin kontrol edilebilmesi için yapılan bir başka çalışmada, düşük enerjiyle sentezlenen kobalt-bor (CoB) nanopartikülleri ABS matrisine katılmış; camsı geçiş sıcaklığında artış ve dielektrik sabitte düzenlenebilir değişimler gözlenmiştir (Vidakis vd., 2024).

ABS'in ileri uygulamalar için geri dönüştürülebilir olması da literatürde önemli şekilde ele alınmıştır. Biyomedikal ve teknik alanlar için uygun olabilecek ABS nanokompozitlerinde dolgu yüzdesinde nano-selüloz ve halloysit gibi dolgu maddelerinin mekanik performansı artırdığını, ancak yüksek dolgu dozlarında aglomerasyon ve boşluk oluşumunun darbe dayanımını sınırladığını göstermişlerdir (Lapčík vd., 2022). Bu yaklaşımlar, hem 3D baskı hem de yapısal uygulamalarda kullanılabilecek sürdürülebilir, güçlendirilmiş ABS bileşenlerinin geliştirilmesi için yol göstermektedir.

Termoplastiklerde karşılaşılan en önemli sorunlardan bir tanesi akışkanlık problemi. Özellikle ekstrüzyon ve enjeksiyon ile üretimde parçanın kalıptan ayrılamaması, bozuk yüzey elde edilmesi ya da üretilen parçalarda oluşan hava boşlukları ürün kalitesini önemli ölçüde olumsuz etkilemektedir. Bu durumun en önemli nedenleri ise üretilen kompozitlerin akışkanlık problemleri olmaktadır. Hem akışkanlık sorunları hem de mekanik, termal ve morfolojik özellikleri iyileştirmek için termoplastiklerde doğal ya da sentetik farklı takviye elemanları kullanılmaktadır (mandolfino vd., 2024; Garcia vd., 2021). Deniz yosunu, kendir, kenevir, kolza, saman, palamut vb. birçok doğal dolgu maddesi termoplastik kompozitlerde dolgu maddesi olarak değerlendirilirken, sentetik yapıda boyalar, reçineler ya da atık polimerler de değerlendirilmektedir. İnorganik yapıdaki talk, kalsit, kaolin gibi elementler özellikle geri dönüşüm termoplastiklerinde sıklıkla kullanılan takviye elemanlarıdır. Fakat matris içerisinde artan inorganik dolgu miktarı ile malzemelerin akışkanlıklarının azaldığı bilinmekte olup aynı zamanda mekanik açıdan da dayanımlarının zayıfladığı yapılan çalışmalar ile ortaya konulmuştur (Khatun vd., 2023; Du vd., 2016; Xiang vd., 2024; Fu vd., 2011). En çok tercih edilen inorganik dolgu maddesi kolay bulunabilir ve düşük

maliyetli olduğu için kalsiyum karbonat (kalsit) ve türevleri olup bunun bor ve türevleri de değerlendirilmektedir. Metal ametal arası bir yapıda yarı iletken özelliğe sahip Bor elementi de dolgu maddesi olarak kullanılmaktadır. Kimyasal bir element olan borun dışında kimyasal bir bileşik olan ve sodyum, bor, oksijen ile su moleküllerinden oluşan boraksta polimerlerde nadiren de olsa dolgu maddesi olarak tercih edilmektedir. Dekahidrat ve pentahidrat çeşitleri bulunan boraks yüzey temizleme, cilt bakımı, toprak verimliliğini arttırma, cam üretimi gibi tarımdan gıda alanına kadar birçok endüstri kolunda yaygın olarak kullanılmaktadır (Gang vd., 2005; Boron, 2015).

Bu çalışmada amorf yapıda bir mühendislik termoplastiği olan ABS'nin içerisine öncelikle iki farklı bor türevi olan boraks dekahidrat (BD) ve boraks pentahidrat (BP) ayrı ayrı karıştırılarak akışkanlık ölçümleri yapılmıştır. Karışımlar içerisinde dolgu miktarı ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranlarındadır. Daha sonra boraks dekahidrat ve boraks pentahidrat karışımlarının içerisine ağırlıkça birebir aynı oranda kolza bitkisi kurutulmuş ve öğütülmüş olarak karıştırılarak farklı 2 karışım daha elde edilmiştir. Toplamda 4 farklı dolgu maddesi ve ABS karışımlarının eriyik akış indeksleri çıkarılarak her bir dolgu maddesinin ABS'nin kütsel ve hacimsel akışkanlık değerlerine ve yoğunluğuna olan etkileri incelendi.

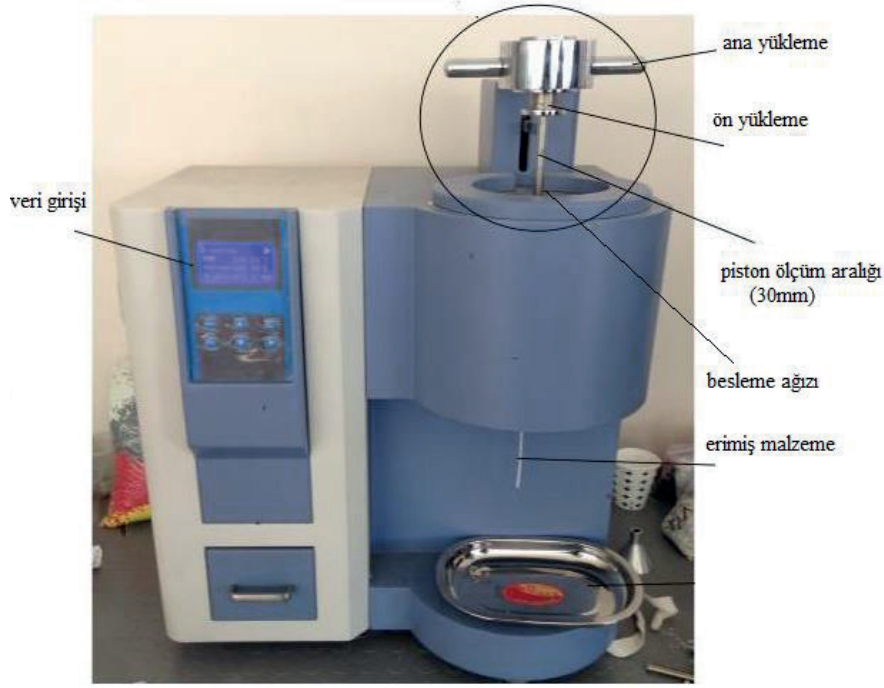
Araştırma ve Bulgular

Çalışmada kullanılan matris malzeme “Ineos Styrolution” firmasına ait 1007082 ürün kodulu akrinonitril bütadien stiren (ABS) olup dolgu maddeleri ise boraks dekahidrat (BD), boraks pentahidrat (BP) ve kurutulmuş öğütülmüş yaklaşık 1mm boyutlarında kolza bitkisi. Öncelikle boraks dekahidrat ve boraks pentahidrat ile bunlara ayrı ayrı karıştırılan öğütülmüş kolza bitkisi ile ayrı ayrı Tablo 1’de verildiği gibi 4 farklı dolgu maddesi elde edildi.

Tablo 1. Dolgu maddeleri ve içerikleri

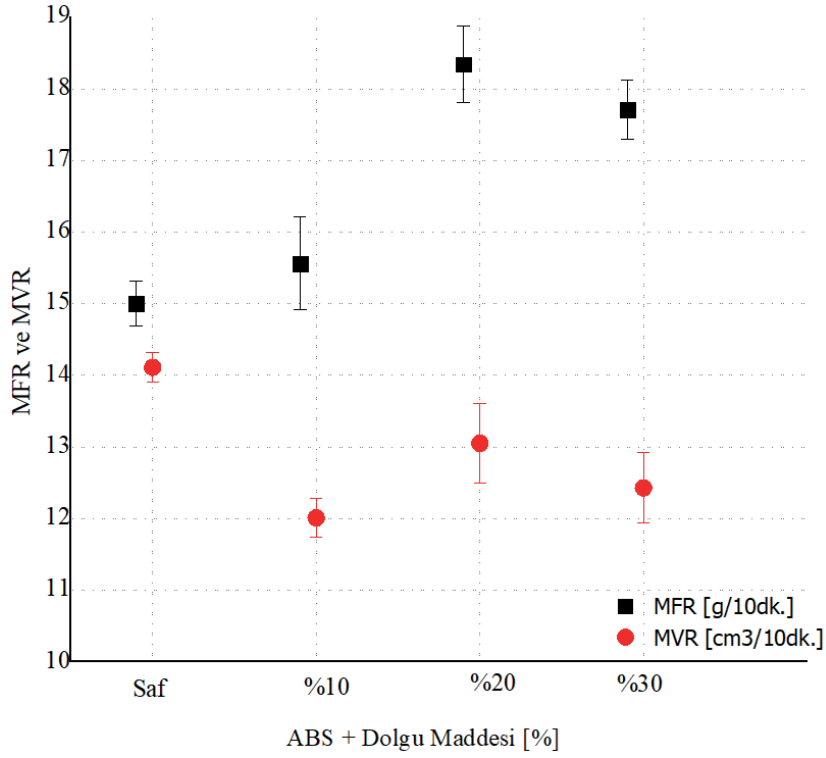
Dolgu Maddesi (DM)	Boraks dekahidrat [%]	Boraks pentahidrat [%]	Kolza bitkisi [%]
DM-1	100	-	-
DM-2	-	100	-
DM-3	50	-	50
DM-4	-	50	50

Hazırlanan bu dolgu maddeleri ayrı ayrı ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranlarında ABS ile mekanik olarak karıştırıldı. Oluşturulan bu karışımların eriyik akış indeksleri Şekil 1’de görünen “Jpt Equipmant-XRL-400A” marka model cihazı kullanılarak ISO 1133 standartlarına uygun olarak tespit edildi (Kısmet, Y. 2015; Kısmet, Y. 2016).



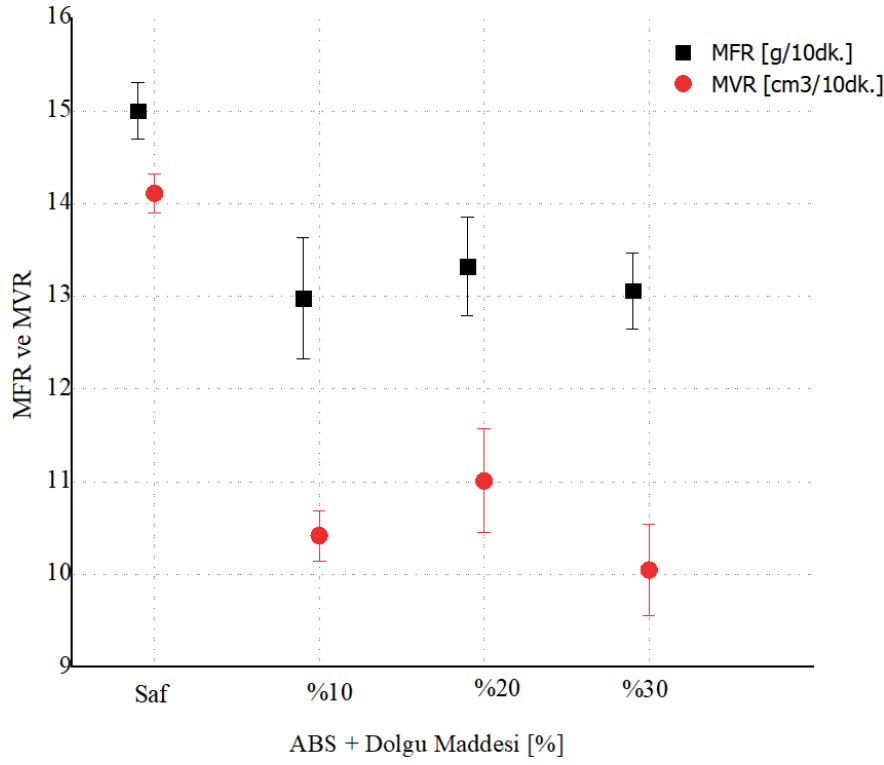
Şekil 1. Eriyik akış indeks cihazı

Şekil 1’de verilen cihaz standartlara uygun olarak ABS için belirtilen ölçüm sıcaklığı olan 220 C’ye kadar ısıtılmış ve sıcaklık sabit tutulmuştur. Hazırlanan ABS ve dolgu maddelerine ait karışımlar ayrı ayrı yaklaşık 10 gram olacak şekilde önce tartılmış ve daha sonra cihazın ısıtma haznesine dökülmüştür. Yaklaşık olarak 5 dk. kadar ısıtma haznesinde bekletilen karışımlar eriyik hale gelince kendiliğinden ya da yapılan yüklemeler etkisi ile cihazın alt kısmında bulunan memeden akmaya başlamıştır. ABS için uygulanan ağırlık 10 kg olup bu ön yükleme ve ana yükleme şeklinde kademeli yapılmış ve malzemeler akmaya zorlanmıştır. Meme kısmından akan malzeme ölçme aralığı olan 30 mm’lik kesitte aktığı esnada her 10 saniyede bir otomatik olarak kesilmiştir. Bu şekilde kesilen parçaların ağırlıkları hassas bir terazide ölçülerek ortalama ağırlıkları belirlendi. Bu ortalama ağırlık değeri cihazın veri giriş ekranına girilerek analizi yapılan o malzemeye ait kütleli akışkanlık değeri ile hacimsel akışkanlık değerleri belirlenmiştir. Aynı zamanda o malzemenin kütlesi de tespit edilmiştir. Her bir ABS ve dolgu maddesi karışımlarına ait analizler belirtildiği gibi gerçekleştirildi ve elde edilen sonuçlar grafikler ile verilmiştir.



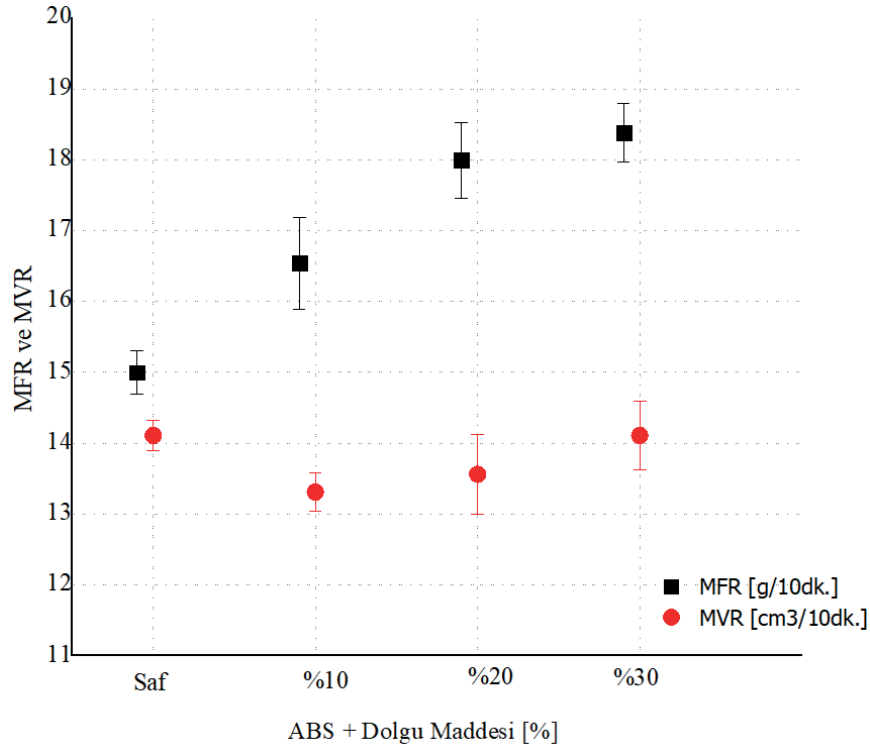
Şekil 2. Boraks dehidrat takviyeli ABS'nin kütle ve hacimsel akışkanlığındaki değişimler

Şekil 2'de boraks dehidratın ABS'nin kütle ve hacimsel akışkanlığına olan etkileri verilmiştir. Ağırlıkça artan boraks dehidrat miktarına bağlı olarak ABS'nin kütle akış indeksi artmıştır. Saf ABS'nin 15 g/10dk. olan indeks değeri ağırlıkça %20 dolgu içeren karışımlarda pik yapmış ve 18,34 g/10dk olarak tespit edilmiştir. Ağırlıkça %30 dolgu içerenlerde ise bir miktar azalmış ve 17,71 g/10dk. olmuştur. Buna karşın ABS'nin hacimsel akış indeksi ise azalmıştır. Saf ABS'nin 14,11 cm³/10dk. olan akışkanlığı ağırlıkça %30 boraks dehidrat içeren karışımlarda 12,43 cm³/10dk. olmuştur. Kütle akışın hacimsel akışa oranı ile yoğunluktaki değişimde belirlenebilmekte olup saf ABS'nin yoğunluğu 1,06 g/cm³ iken ağırlıkça %30 dolgu içeren karışımların yoğunluğu artarak 1,424 g/cm³ olarak belirlemiştir.



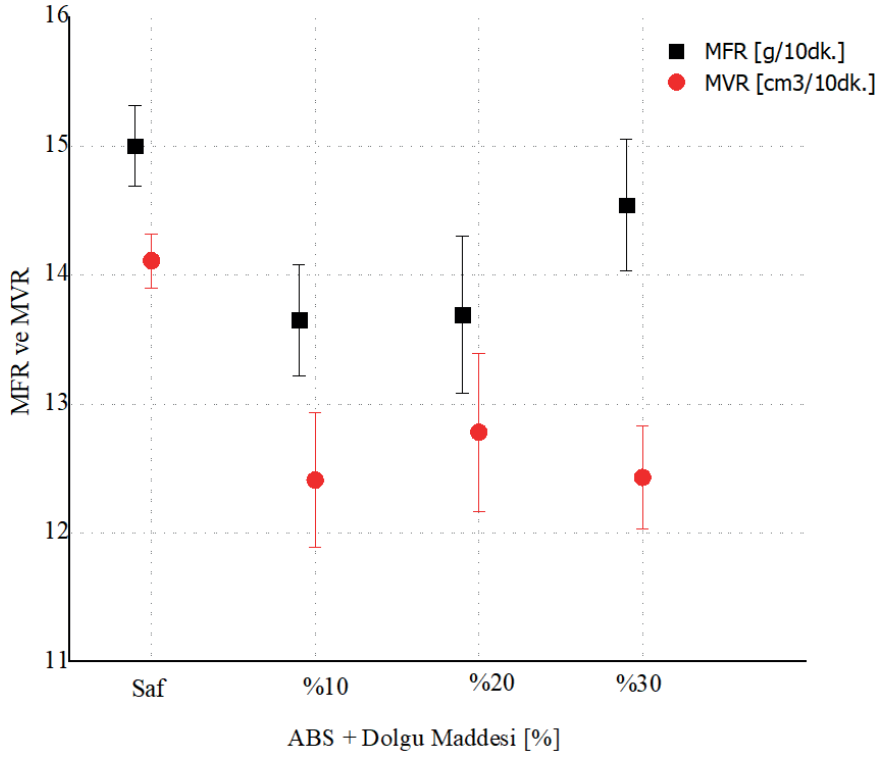
Şekil 3. Boraks pentahidrat takviyeli ABS'nin kütle ve hacimsel akışkanlığındaki değişimler

Boraksın bir başka türevi olan boraks pentahidratın ABS'nin kütle ve hacimsel akışkanlığına olan etkileri Şekil 3'de verilmiştir. Boraks dekahidratın akisine boraks pentahidrat ile ABS'nin kütle akışkanlığında bir miktar azalma olduğu belirlenmiştir. Saf ABS'nin 15 g/10dk. olan akışkanlığı karışım içerisinde artan boraks pentahidrat miktarına bağlı olarak azalarak ağırlıkça %30 dolgu içeren karışımlarda 13,06 g/10dk. değerine gerilemiştir. ABS'nin hacimsel akışkanlığı da benzer şekilde azalma göstererek 14, 11 cm³/10dk. değerine 10,05 cm³/10dk. değerine gerilemiştir. Elde edilen akışkanlık değerleri neticesinde ABS'nin yoğunluğu ise 1,06 g/cm³ değerinden 1,299 g/cm³ değerine yükselmiş ve beklenildiği gibi karışımlar daha yoğun bir hal almıştır.



Şekil 4. Boraks dekahidrat ve kolza takviyeli ABS'nin kütle ve hacimsel akışkanlığındaki değişimler

Şekil 4'de ise boraks dekahidrat ile kurutulmuş ve öğütülmüş kolza bitkisinden oluşan ve Tablo 1'de DM-3 olarak adlandırılan dolgu maddesinin ABS'nin akışkanlığına olan etkileri verilmiştir. Elde edilen sonuçlar neticesinde Şekil 1'de verilen ve sadece boraks dekahidrat katkılı karışımlarda olduğu gibi burada da ABS içerisinde ağırlıkça artan dolgu miktarına bağlı olarak karışımların akışkanlıkları artış göstermiştir. Saf haldeki ABS'nin kütle akışkanlığı 15 g/10dk. iken bu değer ağırlıkça %30 DM-3 içerene karışımlarda 18,38 g/10dk. değerine ulaşmıştır. Bu değer Şekil 1'de verilen ve kolza içermeyen ağırlıkça %30 DM-1 katkılı ABS'nin 17,71 g/10dk. olan akışkanlığına göre de iyileşme gösterildiğini yani kolza takviyesi ile akışkanlığın olumlu etkilendiğini göstermektedir. Hacimsel akışkanlık değeri ise kısmen azalma gösterse de ağırlıkça %30 DM-3 içeren karışımların saf ABS'nin 14,11 cm³/10dk. olan hacimsel akışkanlığına tekrar ulaştığını göstermiştir. Aynı zamanda bu değişim Şekil 1'de verilen ve ağırlıkça %30 DM-1 içeren karışıma ait olan 12,43 cm³/10dk. değeri ile mukayese edildiğinde de akışkanlıkta iyileşmenin olduğu net olarak görülmektedir. Elde edilen akışkanlık sonuçlarında yola çıkarak ağırlıkça %30 DM-3 içeren karışımın yoğunluğunun arttığı ve 1,203 g/cm³ olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4. Boraks pentahidrat ve kolza takviyeli ABS'nin kütle ve hacimsel akışkanlığındaki değişimler

Son olarak Şekil 4'de boraks pentahidrat ve kolza bitkisi karışımlarının (DM-4) ABS'nin akışkanlığına olan etkileri verilmiştir. Daha önce sadece boraks pentahidrat (DM-2) içeren ABS karışımlarına ait olan sonuçlara benzer şekilde burada da artan dolgu maddesine bağlı olarak karışımların hacimsel akışkanlığının azaldığı kütle ve hacimsel akışkanlığın ise ağırlıkça %20 dolgu içeren karışım oranlarına kadar azaldığı daha sonra tekrar arttığı görülmektedir. Saf ABS'nin 15 g/10dk. olan kütle ve hacimsel akış indeksi değeri ağırlıkça %30 DM-4 katkılı karışımlarda 14,54 g/10dk. olarak tespit edilmiştir. Hacimsel akış indeksi değeri ise 14,11 cm³/10dk. değerinden ağırlıkça %30 DM-4 katkılı karışımlarda 12,43 cm³/10dk. değerine gerilemiştir. Fakat bu sonuçlar kolza içermeyen ve Şekil 2'de verilen boraks pentahidrat katkılı ABS karışımları ile mukayese edildiğinde kolza takviyesi ile karışımların bir miktar daha akışkan hale geldiğini ve iyi aktıklarını göstermektedir. Şekil 4'de elde edilen sonuçlardan yola çıkarak karışımların yoğunluğunun bir miktar artmış olduğu belirlenmiş olup ağırlıkça %30 DM-4 içeren karışımların yoğunluğu 1,169 g/cm³ olarak tespit edilmiştir.

Sonuçlar

Bu çalışmada bir mühendislik termoplastiği olan ABS'nin içerisine ağırlıkça farklı oranlarda boraks dehidrat (BD), boraks pentahidrat (BP) ve kolza bitkisinden oluşturulan dolgu maddeleri karıştırıldı ve ABS'nin akışkanlığındaki ve yoğunluğundaki değişimler incelendi.

İlk iki dolgu maddesi içerisinde kolza bitkisi katkısı bulunmamakta olup bu dolgu maddelerinden özellikle boraks dehidrat (DM-1) ile ABS'nin akışkanlığının sürekli arttığı tespit edilmiştir. Boraks pentahidrat (DM-2) takviyesi ile ise önce akışkanlıkta azalmalara meydana gelirken ağırlıkça %30 takviyeli karışımlarda akışkanlığın önemli ölçüde arttığı tespit edilmiştir. DM-3 ve DM-4 takviyeli yani kolza bitkisi içeren boraks dehidrat (BD) ve boraks pentahidrat (BP) takviyeli karışımlarda ise ABS'nin akışkanlığının özellikle ağırlıkça %20 dolgu içeren karışım oranına kadar arttığı görülmüştür. Daha sonra ise ağırlıkça %30 DM-3 içeren karışımların akışkanlığı radikal bir şekilde azalırken DM-4 içeren karışımlarda önemli bir değişiklik olmadığı görülmüştür. Karışımların yoğunluğu ise 0,9 ile 1 g/cm³ arasında değişmektedir. Analizlerde karşılaşılan radikal artış ya da azalışların en önemli nedeni MFI analizi esansında oluşturulan ve yaklaşık olarak 10 gram olan karışımların homojenliğinin yeterince sağlanamaması ve bu karışımın cihazın besleme kısmından dökülürken yine homojen olarak dökülememesi ve dolgu maddesinin yığınlar oluşturarak akışkanlığı bozması olarak nitelendirilebilir.

Kaynaklar

- Akkurt, S., 1991. “Plastik malzeme bilgisi”, Birsen Yayınevi, İstanbul, 7-55, 75-89, 91-112
- Ravve, A., 2012. Principles of Polymer Chemistry, third ed., Springer, New York.
- Akyüz Ö. F. , 1999, “Plastikler ve Plastik Enjeksiyon Teknolojisine Giriş”, PAGEV Yayınları, İstanbul, (41-55, 59-89, 102-106)
- Doner, S., Paswan, R., & Das, S. (2023). The influence of metallic particulate inclusions on the mechanical and thermal performance of 3D printable acrylonitrile-butadiene-styrene/thermoplastic polyurethane fused polymer blends. *Materials Today Communications*, 35, 106111.
- Biswas, S., Sen, A., Pramanik, D., Roy, N., Biswas, R., & Kuar, A. S. (2024). A parametric evaluation of fiber laser micro-channelling performance on thick PMMA in water medium. *Materials Science and Engineering: B*, 311, 117776.
- Vidakis, S., Petousis, M., Tzetzis, D., & Manolakos, D. 2023. Mechanical enhancement of ABS 3D printed filaments via TiN nanoparticle reinforcement. *Materials Today Communications*, 36, 104306.
- Vidakis, S., Petousis, M., & Tzetzis, D. 2024. Dielectric and thermal behavior of CoB nanoparticle reinforced ABS composites for advanced 3D printing applications. *Journal of Applied Polymer Science*, 141(8), 51872.
- Lapčík, L., Šimon, P., & Kratochvíl, P. 2022. Nanocellulose and halloysite reinforced ABS composites: Mechanical properties and microstructural analysis. *Composites Part B: Engineering*, 229, 109464.
- Mandolino, C., Cassettari, L., Pizzorni, M., Benvenuto, L., & Lertora, E. A 2024, Comprehensive Techno-Economic and Environmental Comparison of Plasma-Treated Adhesive-Bonded Thermoplastic Composites. Available at SSRN 4922226.
- García, E., Louvier-Hernández, J. F., Cervantes-Vallejo, F. J., Flores-Martínez, M., Hernández, R., Alcaraz-Caracheo, L. A., & Hernández-Navarro, C. (2021). Mechanical, dynamic and tribological characterization of HDPE/peanut shell composites. *Polymer Testing*, 98, 107075.
- Khatun, M. A., Sultana, S., Kabir, M. S., Hossain, M. S., Nur, H. P., & Chowdhury, A. S. (2023). Preparation and characterization of short date palm mat (DPM) fiber reinforced polystyrene composites: Effect of gamma radiation. *Heliyon*, 9(11).
- Artiushenko, O., da Silva, R. F., & Zaitsev, V. (2023). Recent advances in functional materials for rare earth recovery: A review. *Sustainable Materials and Technologies*, 37, e00681.
- Du, Z., Wen, S., Wang, J., Yin, C., Yu, D., & Luo, J. (2016). The review of powder coatings. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 4(3), 54-59.
- Xiang, D., Wang, D., Zheng, T., & Chen, Y. (2024). Effects of rare earths on microstructure and wear resistance in metal additive manufacturing: A review. *Coatings*, 14(1), 139.
- Fu, J., Krantz, M., Zhang, H., Zhu, J., Kuo, H., Wang, Y. M., & Lis, K. (2011). Investigation of the recyclability of powder coatings. *Powder Technology*, 211(1), 38-45.
- Gang, Y., Zuohu, L., Yi Z. (2005). Dehydration of tetrahydrate potassium pentaborate in fluidized bed, *Journal of Chemical Engineering and Processing* 44, 1216-1220,

Boron, 2015. “Global Industry Markets and Outlook”, 13th Edition.

Kısmet Y. (2016). Hidrolize edilmiş elektrostatik toz boya atık miktarına bağlı olarak poliamid 6 (PA6) ve polioksimetilenin (POM) eriyik akış indeksleri ve yoğunluklarındaki değişimlerin incelenmesi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi , 22(4), 241-245.

Kısmet, Y. (2015). Effects of Hydrolyzed electrostatic powder coating wastes on fluidity and density of polyolefins. Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences, 33(3), 377-383.

BÖLÜM 5

BİYOMEDİKAL UYGULAMALAR İÇİN HİDROKSİAPATİT ÜRETİM STRATEJİLERİ: SENTETİK VE DOĞAL KAYNAKLARIN İNCELEMESİ

Ali İhsan BAHÇEPINAR¹, İbrahim AYDIN², Can GÖNENLİ³

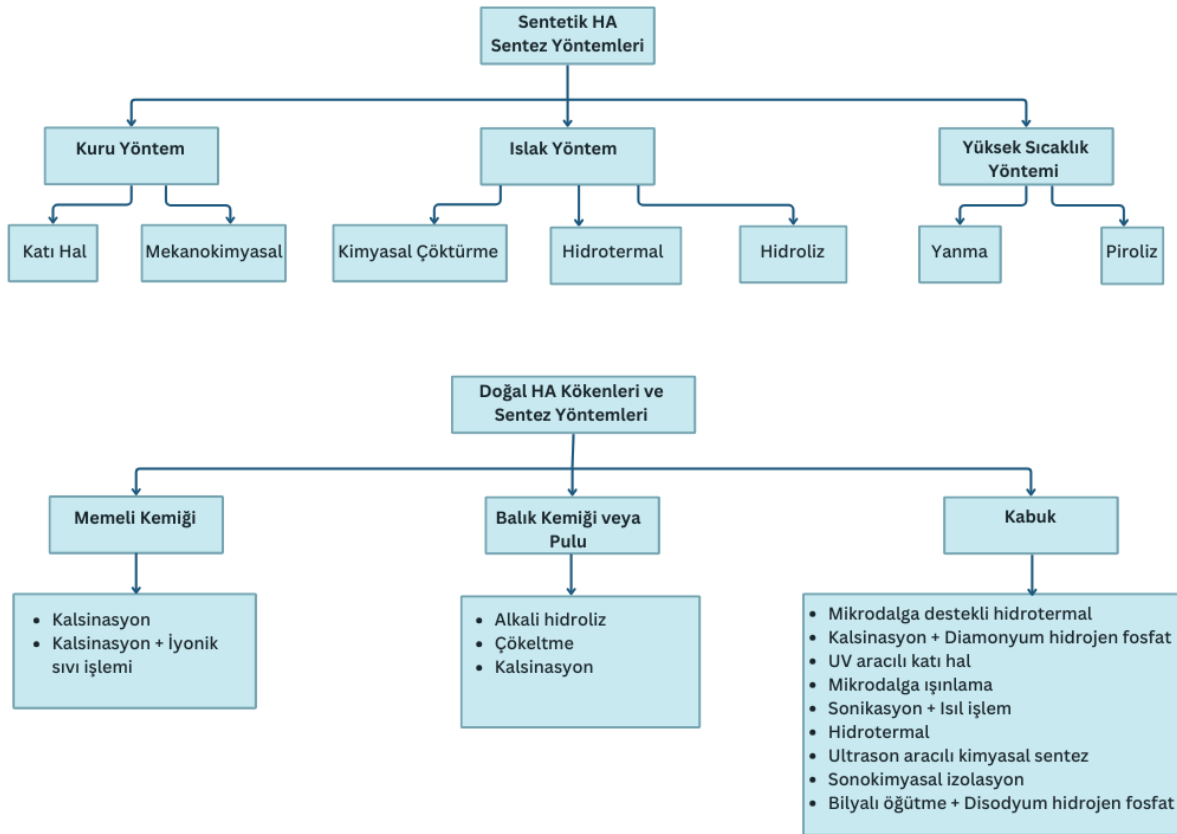
¹ Öğr. Gör. Dr., Manisa Celal Bayar Üniversitesi Manisa Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, ali.bahcepinar@cbu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-9744-0146.

² Doç. Dr., Manisa Celal Bayar Üniversitesi Manisa Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, ibrahim.aydin@cbu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-6281-4902.

³ Doç. Dr., Ege Üniversitesi Ege Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, can.gonenli@ege.edu.tr, ORCID: 0000-0001-9163-1569.

1. Giriş

Hidroksiapatit (HA), temelde sentetik ve doğal olmak üzere iki farklı yöntemle üretilir. Sentetik yollarla üretimde, özellikle kalsiyum ve fosfor içeren kimyasal başlangıç maddeleri kullanılarak, Islak Yöntem, Kuru Yöntem ve Yüksek Sıcaklık Yöntemi gibi çeşitli kimyasal metotlarla gerçekleştirilir. Doğal yollarla üretimde ise, Hidroksiapatiti doğal haliyle bünyesinde yüksek oranda bulunduran biyolojik kaynaklar hammadde olarak kullanılır. Bu kaynaklara örnek olarak memeli kemikleri, balık kılçığı ve pulları, deniz veya yumurta kabukları gibi biyolojik materyaller gösterilebilir. Hidroksiapatit, bu malzemelerden bir dizi termal veya ekstraksiyon işlemi yoluyla elde edilir [1].



Şekil 1. Hidroksiapatit Üretim Yöntemlerinin Sınıflandırılması [1,2]

2. Sentetik Yöntemler ile HA Üretimi

2.1 Islak Yöntemler

Islak yöntemler, nihai ürün olarak toz formunda malzeme elde etmek amacıyla, bir sıvı çözücü ortamında kimyasal reaksiyonların yürütülmesine dayanır. Bu prosedürlerde, reaksiyon sıcaklığı, kullanılan çözücü cinsi ve kimyasal öncüllerin seçimi çeşitlilik gösterebilmektedir. Uygulamasının nispeten kolay olması bu tekniklerin önemli bir avantajıdır. Buna karşın, bu yöntemlerin bir dezavantajı, sentez koşullarının hassasiyeti nedeniyle istenmeyen farklı kalsiyum fosfat fazlarının oluşabilmesi riskidir. Islak yöntemler arasında en yaygın ve dikkat çekici olanlar; kimyasal çöktürme, hidrotermal ve hidroliz teknikleridir [1].

Kimyasal çöktürme yöntemi, süreç basitliği ve 100°C gibi düşük reaksiyon sıcaklıkları nedeniyle HA üretimi için ekonomik ve kullanışlı bir tekniktir [3]. Bu yöntem, çekirdeklenme ile başlayıp büyüme ile sonuçlanan bir mekanizmaya dayanır. Prosedür, kalsiyum ve fosfat çözeltilerinin hazırlanıp reaksiyona sokulmasıyla başlar; ardından çöktürme, yaşlandırma, filtrasyon, kurutma ve son olarak ısıtma işlem adımları uygulanır. Sentezlenen tozların morfolojisi, tane boyutu ve stokiometri gibi nihai özellikleri; reaksiyon sıcaklığı, konsantrasyon ve ısıtma işlem koşulları gibi parametrelere bağlı olduğundan, tekrarlanabilir sonuçlar elde etmek için bu koşulların titizlikle kontrol edilmesi zorunludur [4,5].

Farklı araştırmacılar, HA sentezinde kimyasal çöktürme yöntemini kullanmışlardır. Yelten ve Yılmaz [6], $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ve H_3PO_4 öncüllerini kullanarak reaksiyon sıcaklığı, asit ekleme hızı ve ısıtma işlem sıcaklığı gibi parametreleri değiştirerek küresel morfolojiye sahip HA elde etmiştir. Afshar ve ark. [7] Kalsiyum hidroksit ve fosforik asit kullanarak 40°C'de 200 nm uzunluğunda ve 50nm çapında çubuk benzeri yapıda HA üretmişlerdir. Mobasherpour ve ark. [8] Kalsiyum nitrat tetrahidrat ve Diamonyum fosfat öncüllerini kullanmış, 25°C'de 11 Ph değerinde reaksiyonu gerçekleştirmiş ve 8-20 nm çapında küresel benzeri HA nanopartikülleri elde etmiştir. Bu çalışmalar, öncül kimyasalların, sıcaklığın ve Ph'nin nihai HA'nin morfolojisini ve boyutunu belirlediğini göstermektedir.

Hidrotermal sentez tekniği, temel olarak standart ortam sıcaklığı ve basıncının üzerindeki sulu çözeltilerde gerçekleştirilen reaksiyonları kapsamaktadır. Hidroksiapatit üretimi özelinde bu yöntem, kalsiyum ve fosfat içeren başlangıç maddelerinin, otoklav gibi kapalı basınçlı sistemlerde yüksek termal ve barometrik koşullar altında etkileşime girmesi prensibine dayanır. Sistemdeki yüksek sıcaklık ve basınç, reaksiyon kinetiğini artırarak kondenzasyon mekanizmasını tetikler. Bu süreç, kimyasal bağların kurulması ve çekirdeklenmenin sağlanmasıyla birlikte, yüksek kristaliniteye sahip ve stokiometrik açıdan kararlı HA yapılarının elde edilmesine olanak tanır [1,9,10].

Earl ve ark. [11], yapmış oldukları çalışmada hidrotermal sentez yöntemi ile 200°C sıcaklık ve doymuş su buharı basıncı altında HA üretimi gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar, kalsiyum nitrat ve amonyum fosfat öncüllerini kullanarak 24 saatlik reaksiyon süresi sonunda çubuksu morfolojiye sahip, 100-600 nm boyutta ve tek fazlı HA kristalleri elde etmişlerdir. Çalışmada ayrıca reaksiyon süresinin etkileri de incelenmiş; sürenin 24 saatin üzerine çıkarılmasının partikül morfolojisini veya boyutunu değiştirmediği, ancak yapıda istenmeyen ikincil bir faz olan CaHPO_4 oluşumuna neden olduğu rapor edilmiştir. Zhank ve ark. [12], CaCO_3 kaynağı olarak murekkep balığı kemiği ve sentetik kimyasalları karşılaştırdıkları çalışmalarında, 120-180 °C aralığında hidrotermal yöntemle HA çubukları sentezlemişlerdir. Çalışmada, HA oluşumunun temel olarak CaHPO_4 parçacıkları üzerinde çekirdeklendiği, ancak kalsit kullanımında ara faz olarak β -TCP oluştuğu gözlemlenmiştir. 140 °C'de 24 saatlik işlem sonucunda, yaklaşık 200 nm genişliğinde ve mikron boyutunda uzunluğa sahip HA çubukları, az miktarda β -TCP yan ürünü ile birlikte elde edilmiştir. Ayrıca, Riman ve ark. [13], termodinamik modellemelere dayalı yaptıkları kapsamlı çalışmada, hidrotermal yöntemin 50-200°C sıcaklık aralığında minimum topaklanma gösteren, iyi kristalleşmiş ve iğne benzeri nano tozların üretimi için ideal bir yöntem olduğunu ortaya koymuşlardır. Bu bulgular, hidrotermal yöntemin yüksek saflıkta ve istenilen morfolojide biyoseramik tozu üretimi için üstün özelliklere sahip olduğunu kanıtlamaktadır.

Hidroksiapatit sentezinde başvuru alan ıslak yöntemler arasında hidroliz yöntemi, diğerlerine kıyasla daha sınırlı bir kullanım alanına sahiptir. Suyun iyonlaşmasıyla serbest kalan hidrojen ve hidroksit iyonlarının difüzyon mekanizmasına dayanan bu işlem, kalsiyum fosfat yapılarının dönüşümünü sağlasa da elde edilen ürünler genellikle stokiometrik açıdan ideal HA oranından sapmalar gösterebilmektedir [1,14]

Wang ve ark. [15], dikalsiyum fosfat dihidratın hidrolizi üzerine yaptıkları çalışmada; 2.5 M NaOH ve 75°C koşullarında 1 saatlik işlemle yaklaşık 200 nm boyutunda, çubuksu morfolojiye sahip saf HA sentezlemişlerdir. Yazarlar ayrıca, NaOH konsantrasyonunun aşırı artırılmasının yapıyı bozarak Okta-kalsiyum fosfat oluşumuna neden olduğunu rapor etmişlerdir. Fulmer ve Brown [16], dikalsiyum fosfat dihidratın su ve 1 M Na₂HPO₄ çözeltisi içerisindeki hidroliz davranışlarını 25–60°C sıcaklık aralığında karşılaştırmışlardır. Araştırmacılar, saf su ortamında yapılan hidrolizin tamamlanmadığını ve HA oluşumuna ek olarak susuz dikalsiyum fosfat fazının da meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Buna karşılık, Na₂HPO₄ çözeltisinde gerçekleştirilen deneylerde, çözeltinin tamponlama kapasitesi sayesinde dikalsiyum fosfat oluşumunun engellendiği ve dikalsiyum fosfat 'in tamamen HA'e dönüştüğü rapor edilmiştir. Sinitsyna ve ark. [17], α -trikalsiyum fosfatın hidrolizinde sıcaklığın morfoloji üzerindeki belirleyici etkisini incelemişlerdir. Çalışmada, 40°C'de 1–2 μ m boyutunda plaka benzeri kristaller oluşurken, sıcaklık kaynama noktasına çıkarıldığında yapının iğne benzeri forma dönüştüğü rapor edilmiştir.

2.2. Kuru Yöntemler

Kuru yöntemler, reaksiyon ortamında herhangi bir çözücüye ihtiyaç duyulmaması ve işlem parametrelerinin esnekliği sayesinde endüstriyel ölçekli üretimde sıklıkla tercih edilmektedir. Literatürde bu sınıflandırma altında temel olarak iki farklı yöntem vardır: Katı hal ve mekanokimyasal sentez. Bunlardan ilki olan katı hal, ekonomik bir prosedür olmasına rağmen, gerektirdiği yüksek kalsinasyon sıcaklıklarında dahi düşük difüzyon hızları nedeniyle sıklıkla ikincil fazlar içeren heterojen ürünler vermektedir [18-20]. Bu saflık sorununu aşmak adına geliştirilen ikinci yöntem ise mekanokimyasal sentezdir; bu teknikte öğütme esnasında açığa çıkan mekanik enerji kullanılarak reaksiyon kinetiği iyileştirilmekte ve böylece katı hal yöntemine kıyasla çok daha iyi tanımlanmış kristal yapıların elde edilmesine olanak tanınmaktadır [18,21,22].

Guo ve ark. [23], oda sıcaklığında gerçekleştirdikleri katı hal sentezinde kalsinasyon sıcaklığının ürün kalitesi üzerindeki kritik rolünü incelemişlerdir. Yazarlar, 600°C'nin altındaki sıcaklıklarda partiküllerin morfolojik olarak belirsiz ve topaklanmış olduğunu; ancak 600°C'nin üzerine çıkıldığında stokiometrik yapıya sahip, tek fazlı ve yüksek kristaliniteye sahip hidroksiapatit elde edildiğini rapor etmişlerdir. Koonawoot ve ark. [24], katı hal yöntemiyle hazırladıkları numuneleri 1150-1300 °C sıcaklıklarda sinterleyerek, yüksek sıcaklığın faz saflığı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Araştırmacılar, elde edilen ürünlerde ana fazın HA olmasına rağmen, yüksek sinterleme sıcaklıklarının malzemenin kısmen bozunmasına neden olarak trikalsiyum fosfat ve kalsiyum oksit fazlarını oluşturduğunu tespit etmişlerdir. Pramanik ve ark. [25], katı hal yöntemiyle ürettikleri numunelerin sinterleme davranışlarını inceledikleri çalışmalarında; 1250 °C sıcaklıkta HA yapısının bozunarak α -trikalsiyum fosfat fazına dönüştüğünü tespit etmişlerdir. Çalışmada ayrıca, sıkıştırma basıncının artırılması ve tekrar sinterleme işlemlerinin malzemenin mekanik özelliklerini belirgin şekilde iyileştirdiği ve doğal ürünlere kıyasla daha üstün mekanik değerler elde edildiği vurgulanmıştır. Fahami ve ark. [26], mekanokimyasal yöntem kullanarak ürettikleri HA- %20 Ti nanokompozitlerinde, mekanik öğütme ve ısıl işlemin etkilerini araştırmışlardır. Araştırmacılar, 20 saat süren öğütme işleminin ardından 650°C'de uygulanan ısıl işlemin kristaliniteyi iyileştirdiğini; nihai ürünün ise 25 $\pm$ 15 nm boyutunda, elips benzeri nanotozlardan oluştuğunu tespit etmişlerdir. Yeong ve ark. [27], CaO ve CaHPO₄ öncülerini kullanarak gerçekleştirdikleri mekanik aktivasyon çalışmasında, yüksek sıcaklık kalsinasyonuna ihtiyaç duymadan, sadece mekanik enerji ile yaklaşık 25 nm boyutunda saf HA sentezlemeyi başarmışlardır. Yazarlar, elde edilen bu nano tozların sinterleme kabiliyetinin oldukça yüksek olduğunu ve 1200 °C'de yapılan işlemle %98.20 gibi yüksek bir

yoğunluk değerine ulaşıldığını belirtmişlerdir. Nasiri-Tabrizi ve ark. [28], polimerik öğütme kullanarak gerçekleştirdikleri mekanokimyasal sentez çalışmasında, ortalama 20-23 nm boyutlarında tek kristalli HA nanoyapıları elde etmişlerdir. Araştırmacılar, metalik veya seramik bilyalar yerine polimer bilya kullanımının, yüksek kalitede ve istenilen morfolojide HA üretimi için kolay ve başarılı bir yöntem olduğunu rapor etmişlerdir. Adzila ve ark. [29], Ca(OH)_2 ve $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ öncülerini kullandıkları mekanokimyasal sentez çalışmasında, proses parametrelerinin nano yapı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Araştırmacılar, dönme hızının artırılmasının kristalinite ve kristalit boyutunu artırırken partikül boyutunu küçülttüğünü tespit etmişlerdir. Çalışmada, 17-36 nm boyutlarında nano HA üretimi için optimum koşulun 370 rpm ve 15 saat olduğu sonucuna varılmıştır.

2.3. Yüksek Sıcaklık Yöntemi

Hidroksiapatit sentezi için başvuru alan alternatif yaklaşımlar arasında, başlangıç materyallerinin yüksek ısı altında termal bozunuma uğratılması prensibine dayanan teknikler de bulunmaktadır. Literatürde bu yöntemler, özellikle yanma ve piroliz işlemleri olarak sınıflandırılır. Ancak genel üretim stratejileri değerlendirildiğinde, bu yüksek sıcaklık proseslerinin diğer yöntemlere kıyasla çok daha nadir tercih edildiği görülmektedir. Bu sınırlı kullanımın temel nedeni; söz konusu tekniklerin işlem parametreleri üzerinde hassas bir kontrol imkânı sunmaması ve sentezlenen nihai ürünlerde, malzemenin kalitesini düşüren ikincil fazların oluşmasına zemin hazırlamasıdır [1,30]. Yanma sentezi yöntemi, sulu bir faz içerisinde bulunan oksitleyici ajanlar ile organik yakıtların, kendi kendini sürdürebilen ve yüksek oranda ekzotermik hızlı redoks reaksiyonlarına girmesi esasına dayanır. Karışımın düşük sıcaklıkta ısıtılmasıyla başlayan bu süreçte, sıcaklık aniden yükselerek reaksiyonun gerçekleşmesini sağlar. İşlemin sonunda uygulanan hızlı soğutma adımı ise, çekirdeklenme mekanizmasını tetikleyerek partiküllerin kontrolsüz büyümesini engeller ve böylece ince taneli yapıların elde edilmesine olanak tanır. Piroliz yöntemi, öncü çözeltilerin ultrasonik yöntemlerle fırının sıcak bölgesine püskürtülmesi esasına dayanan bir aerosol yöntemidir [1,31]. Yanma sentezinden farklı olarak reaksiyon ortamına organik yakıt ilavesi gerektirmeyen bu süreç, sürekli üretim imkânı sunmasıyla endüstriyel açıdan avantaj sağlar. Buna karşın, işlem sırasında damlacıkların gaz fazında hızla çekirdeklenmesine neden olan yüksek sıcaklıklar, genellikle ürünlerin topaklanmış formda elde edilmesine yol açmaktadır [1,32].

Ghosh ve ark. [33], başlangıç karışımındaki stokiometrinin ürün üzerindeki belirleyici rolünü ortaya koymuşlardır. 1.75 Ca/P oranında saf HA sentezlemeyi başarırken, daha düşük oranlarda yapının bozularak Trikalsiyum Fosfat içerdiğini rapor etmişlerdir. Elde edilen ürünlerin morfolojik analizinde ise, 60–130 nm aralığında değişen eş eksenli nanopartiküllerin, işlem sonrası kolayca dağılabilen yumuşak topak halinde bulunduğu tespit edilmiştir. Batista ve ark. [34], yanma sentezi parametrelerini istatistiksel olarak modelledikleri çalışmalarında, sıcaklık ve zaman parametrelerinin ürün kalitesi üzerindeki kritik rolünü ortaya koymuşlardır. Yazarlar, optimizasyon çalışmaları neticesinde; Üre kullanımı ile pH 2 ortamında, 650°C sıcaklık ve 30 dakika reaksiyon süresinin, % 89.25 saflıkta HA eldesi için en ideal koşullar olduğunu tespit etmişlerdir. Canillas ve ark. [35], yanma sentezi ile elde edilen tozların sinterleme davranışlarını inceledikleri çalışmalarında, sentez ortamının mekanik özellikler üzerindeki belirleyici rolünü ortaya koymuşlardır. Araştırmacılar, oksitleyici ortamda üretilen düşük yüzey enerjili tozların, konvansiyonel yöntemlerle işlendiğinde çok daha yoğun bir yapı oluşturduğunu ve bu malzemelerin sulu ortamda sentezlenen numunelere göre %60 oranında artırılmış bir mekanik dayanıma sahip olduğunu vurgulamışlardır. Ghosh ve ark. [36], üre ve glisin yakıtlarını kullanarak optimize ettikleri yanma sentezi sürecinde, proses değişkenlerinin partikül boyutu üzerindeki kritik rolünü ortaya koymuşlardır. Çalışmada, yakıt/oksitleyici

oranının kontrol edilmesiyle 20 nm ile 120 nm boyutlarında HA partiküllerinin sentezlenebildiği; özellikle yakıt miktarının artırılmasının daha yüksek yüzey alanına sahip tozların eldesine olanak tanıdığı rapor edilmiştir. Cho ve ark. [37], alev sprey piroliz yönteminde PEG kullanımının ve son işlem sıcaklığının ürün morfolojisi üzerindeki belirleyici rolünü araştırmışlardır. Yazarlar, 400°C'lik düşük sıcaklıkta fiber benzeri yapılar oluşurken, sıcaklığın 600°C'ye çıkarılmasıyla yaklaşık 32 nm boyutunda nano çubukların, 1000°C'de ise yaklaşık 213 nm boyutunda küresel partiküllerin meydana geldiğini rapor etmişlerdir. Elde edilen tüm numunelerin, 1.69 Ca/P oranıyla ideal stokiometriye oldukça yakın olduğu vurgulanmıştır. Itatani ve ark. [38], sprey piroliz yöntemiyle ürettikleri HA tozlarında, çözelti konsantrasyonu ve organik katkıların morfoloji üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Yazarlar, çözeltiye sitrik asit eklenmesinin ve ardından 800°C'de uygulanan ısı işlemi, karbon kalıntılarının yanması yoluyla gözenekliliği artırdığını tespit etmişlerdir. Bu süreç sonucunda, ortalama 0.34 µm boyutunda ve içi boş yapıya sahip küresel HA'ı başarıyla sentezlendiği vurgulanmıştır. Cho ve ark. [39], sprey piroliz sıcaklığının HA partikül morfolojisi ve sinterleme davranışı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Yazarlar, 900°C gibi düşük sıcaklıklarda içi boş ve gözenekli yapılar oluşurken; 1500°C'de sentezlenen partiküllerin içi dolu ve yoğun küresel formda olduğunu belirlemişlerdir. Yapılan analizler sonucunda, 1500°C gibi yüksek sıcaklıkta üretilen bu içi dolu partiküllerin, sinterleme işlemi sırasında diğerlerine kıyasla çok daha üstün bir yoğunlaşma performansı sergilediği rapor edilmiştir.

3. Doğal Yöntemler ile HA Üretimi

Doğal kaynaklardan HA üretimi, sentez süreçlerinin pratikliği ve hammaddeye erişim kolaylığı sayesinde biyomalzeme araştırmalarında büyük ilgi görmektedir. Özellikle memeli kemikleri, deniz canlıları ve çeşitli kabuklar; doğada yaygın bulunmaları ve yüksek kalsiyum içerikleri nedeniyle sentez çalışmalarında birincil seçenek olarak değerlendirilmektedir [40-42]. Temel olarak kalsinasyon, alkali hidroliz, çökeltme veya hidrotermal teknikler kullanılarak organik bileşenlerin mineral matristen elimine edilmesi esasına dayanan bu üretim süreçleri, ekstraksiyonu daha güvenli hale getirmektedir [43]. Ayrıca elde edilen biyojenik ürünlerin, kimyasal sentez yöntemleriyle üretilen hidroksiapatite kıyasla biyouyumluluk, hücre tutunması ve çoğalma potansiyeli açısından çok daha üstün bir biyolojik performans sergilediği literatürde sıklıkla vurgulanmaktadır [40-42].

Kalsiyum fosfat açısından zengin bir içeriğe sahip olan domuz, sığır ve deve kuşu kemikleri, doğal hidroksiapatit sentezinde yaygın olarak kullanılan memeli kaynaklarıdır [43]. Lim ve ark. [44], domuz kemiklerinden 1.200°C'de ısı işlemi yoluyla elde ettikleri doğal HA seramiklerinin biyolojik ve yapısal özelliklerini incelemişlerdir. Araştırmacılar, organik fazdan tamamen arındırılmış ve Ca/P oranı 1.6 olan bu seramiklerin, 2 yıllık in-vitro test sürecinde vücut sıvısı ortamında son derece kararlı kaldığını rapor etmişlerdir. MG63 hücre hatları ile yapılan analizler sonucunda, malzemenin sitotoksikite göstermediği ve biyomedikal uygulamalar için güvenli bir biyoaktif malzeme olduğu vurgulanmıştır. Ofudje ve ark. [45], maliyetli kimyasal yöntemlere alternatif olarak domuz kemiği atıklarını değerlendirmiş ve 600-1000°C aralığında ısı işlemi uygulayarak doğal hidroksiapatit sentezlemişlerdir. EDX analizleri, sentezlenen HA yapısında sadece Ca ve P değil, aynı zamanda biyolojik süreçlerde hayati rol oynayan Na, K, Mg ve Si gibi yararlı eser elementlerin de korunduğunu ortaya koymuştur. SEM incelemeleri, üretilen tozların 38–52 nm uzunluğunda çubuksu bir morfolojiye sahip olduğunu göstermiştir. Çalışmanın en önemli uygulama basamağında ise, amonyum bikarbonat gözenek yapıcı ajan olarak kullanılarak %65 gözenekliliğe sahip HA iskeleleri başarıyla üretilmiştir. Ooi ve ark. [46], sığır kemiğinden gözenekli biyoseramik üretiminde optimum ısı işlem sıcaklığını belirlemek amacıyla yürüttükleri çalışmada,

sıcaklığın faz kararlılığı ve mikroyapı üzerindeki kritik rolünü ortaya koymuşlardır. Araştırmacılar, 1100°C ve üzerinde HA'nın B-TCP'ye dönüştüğünü belirterek; saf HA fazını koruyan ve doğal gözenekli ağ yapısını muhafaza eden en ideal işlem aralığının 800°C ile 1000°C olduğunu vurgulamışlardır. Odusote ve ark. [47], sığır kaynaklı HA üretiminde 750°C'lik kalsinasyon işleminin etkili bir organik madde giderimi sağladığını belirtmişlerdir. Araştırmacılar, sentezledikleri malzemenin diş implantı uygulamaları için uygunluğunu kanıtlamak adına ısılatıla bilirlik testleri gerçekleştirmiş ve 31.73°'lik temas açısı değeriyle malzemenin hidrofilik doğasını ortaya koymuşlardır. Ayrıca fizyolojik koşulları taklit eden ortamda yapılan testler, malzemenin vücut içi sıvılara karşı biyokararlılığının yüksek olduğunu göstermiştir. Malla [48], atık devekuşu kemiklerini 950°C'de ısıtılma tabi tutarak ortalama 19 nm boyutunda nano HA sentezlemiş ve malzemenin biyogüvenliğini akut toksisite testleriyle kanıtlamışlardır. Çalışmanın devamında bu tozlar, elektroegirme yöntemiyle biyobozunur polimer iskelelerine entegre edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, HA katkısının iskele yüzeyindeki su temas açısını 79°'den 44°'ye düşürerek hidrofilikliği artırdığını; mekanik açıdan ise yapıya kırılmandan süneğe geçiş özelliği kazandırarak dayanımı iyileştirdiğini ortaya koymuştur.

Balık pulu ve kemik atıkları, fonksiyonel HA eldesi için güçlü bir potansiyele sahiptir; zira bu kaynakların değerlendirilmesi, endüstriyel yan ürünlerin katma değerli biyomalzemelere dönüşümüne olanak tanır. Bu hammaddelerin işlenmesi, genellikle doku ve et kalıntılarının uzaklaştırılması amacıyla uygulanan kaynatma adımıyla başlamaktadır. Takip eden saflaştırma aşamalarında ise aseton, alkali muamele veya bu yöntemlerin kombinasyonunu içeren çeşitli ön işlemler uygulanmaktadır. HA ekstraksiyonu için alkali hidroliz ve çökeltme gibi alternatif teknikler mevcut olsa da, günümüzde temel üretim metodu olarak kalsinasyonun tercih edildiği dikkat çekmektedir [42]. Prado ve ark. [49], balık atıklarından elde ettikleri HA'nın kemik rejenerasyon potansiyelini inceledikleri çalışmada, malzemenin 30 günlük süreç sonunda başarılı bir doku entegrasyonu sağladığını bildirmişlerdir. Araştırmacılar, erken dönemde kemik oluşumunun kontrol grubuna kıyasla yavaş ilerlediğini, ancak 30. günde inflamasyonun sona ermesi ve güçlü RUNX-2 immüno-ekspresyonu ile birlikte malzemenin biyoteknolojik uygulamalar için güvenli ve etkili bir seçenek olduğunu vurgulamışlardır. Boutinguiza ve ark. [50], kılıç ve ton balığı kemiklerinden ürettikleri biyoseramiklerin karakterizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Yazarlar, 950°C'de sentezlenen ürünün %87 HA ve %13 β -TCP oranında bifazik bir yapı sergilediğini rapor etmişlerdir. Çalışmada, bu atık kaynaklı malzemelerin Mg ve Sr gibi eser elementleri barındırması sayesinde, sentetik apatitlere kıyasla kemik iyileşmesi sürecinde daha avantajlı ve güvenli bir seçenek sunduğu sonucuna varılmıştır. Swamiappan ve ark. [51], balık pulu atıklarından ultrasonik yöntemle ürettikleri doğal nano HA tozlarını ticari muadilleriyle kıyaslamışlardır. Yazarlar, 111.96 m²/g yüzey alanına sahip bu doğal nanomalzemenin, ticari HA'ya göre MG-63 hücrelerinde daha üstün biyoyum ve osteojenik aktivite gösterdiğini rapor etmişlerdir. Ayrıca malzemenin, tıpkı mühendislik alaşımlarında gerilme ve uzama ilişkilerinin kritik olması gibi [52] yüksek basma dayanımı sergilemesi ve mükemmel termal kararlılığı ile biyomedikal uygulamalar için ideal bir aday olduğu vurgulanmıştır. Sunil ve ark. [53], balık kemiklerinden ekonomik bir yöntemle HA sentezledikleri çalışmalarında, malzemenin termal kararlılığını incelemişlerdir. Yazarlar, 1000°C'ye kadar çıkan sıcaklıklarda dahi yapının saf HA fazını koruduğunu ve yeni bir faz oluşumu gözlenmediğini rapor etmişlerdir. Ayrıca üretilen kristallerin yaklaşık 200 nm boyutunda olduğu ve yapısında biyolojik aktiviteye katkı sağlayan Mg iyonlarını barındırdığı tespit edilmiştir. Pon-On ve ark. [54], balık pulu kaynaklı doğal HA ile sentetik HA'yı karşılaştırdıkları çalışmalarında, doğal kaynağın biyolojik performans açısından çok daha üstün olduğunu rapor etmişlerdir. Yazarlar, doğal kaynaklı HA'nın Ca/P oranının 2.01 olmasına rağmen, nanokristalin yapısı sayesinde osteoblast hücrelerinin yüzeye daha iyi yayıldığını tespit etmişlerdir. MTT ve ALP testleri sonucunda, balık pulu kaynaklı malzemenin kemik doku mühendisliği ve rejeneratif uygulamalar için sentetik muadillerinden

daha etkili bir aday olduğu vurgulanmıştır. Lee ve ark. [55], deniz ve yumurta kabuğu gibi farklı doğal kalsiyum kaynaklarını kıyasladıkları çalışmalarında, kaynağın biyolojik tepki üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Yazarlar, deniz kabuğu kaynaklı hidroksiapatitin yapısında Stronsiyum ve Sodyum elementlerini bulundurduğunu; ancak implantasyon sonrası dördüncü hafta gibi erken bir dönemde dev hücre reaksiyonu türünde bir inflamasyona neden olduğunu tespit etmişlerdir. Buna karşın, Magnezyum açısından zengin olan yumurta kabuğu kaynaklı hidroksiapatitin daha az inflamasyon yarattığı ve sekizinci haftayı kapsayan uzun dönemde kemik oluşumunu çok daha iyi desteklediği rapor edilmiştir.

4. Sonuç

Bu çalışmada, kemik doku mühendisliği ve biyomedikal uygulamaların temel yapı taşı olan hidroksiapatitin, sentetik ve doğal kaynaklar kullanılarak gerçekleştirilen üretim stratejileri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Bu kapsamda, tüm üretim yöntemleri ve ilgili literatür çalışmaları detaylı olarak sunulmuştur. Sonuç olarak bu çalışma, farklı kaynaklardan hidroksiapatit eldesi için kullanılabilecek mevcut teknolojilerin ve üretim parametrelerinin bir arada sunulduğu bütüncül bir bakış açısı sağlamıştır.

5. Kaynakça

- [1] Pu'ad, N. M., Haq, R. A., Noh, H. M., Abdullah, H. Z., Idris, M. I., & Lee, T. C. (2020). Synthesis method of hydroxyapatite: A review. *Materials Today: Proceedings*, 29, 233-239.
- [2] Hussin, M. S. F., Abdullah, H. Z., Idris, M. I., & Wahap, M. A. A. (2022). Extraction of natural hydroxyapatite for biomedical applications—A review. *Heliyon*, 8(8).
- [3] Mostafa, N. Y. (2005). Characterization, thermal stability and sintering of hydroxyapatite powders prepared by different routes. *Materials chemistry and physics*, 94(2-3), 333-341.
- [4] Kothapalli, C., Wei, M., Vasiliev, A., & Shaw, M. T. (2004). Influence of temperature and concentration on the sintering behavior and mechanical properties of hydroxyapatite. *Acta Materialia*, 52(19), 5655-5663.
- [5] Liu, C., Huang, Y., Shen, W., & Cui, J. (2001). Kinetics of hydroxyapatite precipitation at pH 10 to 11. *Biomaterials*, 22(4), 301-306.
- [6] Yelten-Yilmaz, A., & Yilmaz, S. (2018). Wet chemical precipitation synthesis of hydroxyapatite (HA) powders. *Ceramics International*, 44(8), 9703-9710.
- [7] Afshar, A., Ghorbani, M., Ehsani, N., Saeri, M. R., & Sorrell, C. C. (2003). Some important factors in the wet precipitation process of hydroxyapatite. *Materials & Design*, 24(3), 197-202.
- [8] Mobasherpour, I., Heshajin, M. S., Kazemzadeh, A., & Zakeri, M. (2007). Synthesis of nanocrystalline hydroxyapatite by using precipitation method. *Journal of Alloys and Compounds*, 430(1-2), 330-333.
- [9] Huang, G., Lu, C. H., & Yang, H. H. (2019). Magnetic nanomaterials for magnetic bioanalysis. In *Novel nanomaterials for biomedical, environmental and energy applications* (pp. 89-109). Elsevier.
- [10] Fihri, A., Len, C., Varma, R. S., & Solhy, A. (2017). Hydroxyapatite: A review of syntheses, structure and applications in heterogeneous catalysis. *Coordination Chemistry Reviews*, 347, 48-76.
- [11] Earl, J. S., Wood, D. J., & Milne, S. J. (2006, February). Hydrothermal synthesis of hydroxyapatite. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 26, No. 1, p. 268). IOP Publishing.
- [12] Zhang, X., & Vecchio, K. S. (2007). Hydrothermal synthesis of hydroxyapatite rods. *Journal of Crystal Growth*, 308(1), 133-140.
- [13] Riman, R. E., Suchanek, W. L., Byrappa, K., Chen, C. W., Shuk, P., & Oakes, C. S. (2002). Solution synthesis of hydroxyapatite designer particulates. *Solid State Ionics*, 151(1-4), 393-402.
- [14] Pu'ad, N. M., Haq, R. A., Noh, H. M., Abdullah, H. Z., Idris, M. I., & Lee, T. C. (2020). Synthesis method of hydroxyapatite: A review. *Materials Today: Proceedings*, 29, 233-239.
- [15] Wang, M. C., Hon, M. H., Chen, H. T., Yen, F. L., Hung, I. M., Ko, H. H., & Shih, W. J. (2013). Process parameters on the crystallization and morphology of hydroxyapatite

- powders prepared by a hydrolysis method. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 44(7), 3344-3352.
- [16] Fulmer, M. T., & Brown, P. W. (1998). Hydrolysis of dicalcium phosphate dihydrate to hydroxyapatite. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 9(4), 197-202.
- [17] Sinitsyna, O. V., Veresov, A. G., Kovaleva, E. S., Kolen'ko, Y. V., Putlyayev, V. I., & Tretyakov, Y. D. (2005). Synthesis of hydroxyapatite by hydrolysis of α -Ca₃ (PO₄)₂. *Russian Chemical Bulletin*, 54(1), 79-86.
- [18] Gomes, D. S., Santos, A. M. C., Neves, G. A., & Menezes, R. R. (2019). A brief review on hydroxyapatite production and use in biomedicine. *Cerâmica*, 65(374), 282-302.
- [19] Güler, H., Gündoğmaz, G., Kurtuluş, F., Çelik, G., & Gacanoğlu, Ş. S. (2011). Solid state synthesis of calcium borohydroxyapatite. *Solid State Sciences*, 13(11), 1916-1920.
- [20] Teshima, K., Lee, S., Sakurai, M., Kamenoy, Y., Yubuta, K., Suzuki, T., ... & Oishi, S. (2009). Well-formed one-dimensional hydroxyapatite crystals grown by an environmentally friendly flux method. *Crystal Growth and Design*, 9(6), 2937-2940.
- [21] Youness, R. A., Taha, M. A., Elhaes, H., & Ibrahim, M. (2017). Molecular modeling, FTIR spectral characterization and mechanical properties of carbonated-hydroxyapatite prepared by mechanochemical synthesis. *Materials Chemistry and Physics*, 190, 209-218.
- [22] Lala, S., Ghosh, M., Das, P. K., Das, D., Kar, T., & Pradhan, S. K. (2016). Magnesium substitution in carbonated hydroxyapatite: Structural and microstructural characterization by Rietveld's refinement. *Materials Chemistry and Physics*, 170, 319-329.
- [23] Guo, X., Yan, H., Zhao, S., Li, Z., Li, Y., & Liang, X. (2013). Effect of calcining temperature on particle size of hydroxyapatite synthesized by solid-state reaction at room temperature. *Advanced Powder Technology*, 24(6), 1034-1038.
- [24] Koonawoot, R., Saelee, C., Thiansem, S., & Punyanitya, S. (2012). Synthesis control and characterization of hydroxyapatite ceramic using a solid state reaction. In 1st Mae Fah Luang University International Conference (pp. 2-6).
- [25] Pramanik, S., Agarwal, A. K., Rai, K. N., & Garg, A. (2007). Development of high strength hydroxyapatite by solid-state-sintering process. *Ceramics International*, 33(3), 419-426.
- [26] Fahami, A., Ebrahimi-Kahrizsangi, R., & Nasiri-Tabrizi, B. (2011). Mechanochemical synthesis of hydroxyapatite/titanium nanocomposite. *Solid State Sciences*, 13(1), 135-141.
- [27] Yeong, K. C. B., Wang, J., & Ng, S. C. (2001). Mechanochemical synthesis of nanocrystalline hydroxyapatite from CaO and CaHPO₄. *Biomaterials*, 22(20), 2705-2712.
- [28] Nasiri-Tabrizi, B., Honarmandi, P., Ebrahimi-Kahrizsangi, R., & Honarmandi, P. (2009). Synthesis of nanosize single-crystal hydroxyapatite via mechanochemical method. *Materials Letters*, 63(5), 543-546.

- [29] Adzila, S., Sopyan, I., & Hamdi, M. (2012). Mechanochemical synthesis of hydroxyapatite nanopowder: Effects of rotation speed and milling time on powder properties. *Appl. Mech. Mater.*, 110, 3639-3644.
- [30] Sadat-Shojai, M., Khorasani, M. T., Dinpanah-Khoshdargi, E., & Jamshidi, A. (2013). Synthesis methods for nanosized hydroxyapatite with diverse structures. *Acta biomaterialia*, 9(8), 7591-7621.
- [31] Fihri, A., Len, C., Varma, R. S., & Solhy, A. (2017). Hydroxyapatite: A review of syntheses, structure and applications in heterogeneous catalysis. *Coordination Chemistry Reviews*, 347, 48-76.
- [32] Itatani, K., Tsugawa, T., Umeda, T., Musha, Y., Davies, I. J., & Koda, S. (2010). Preparation of submicrometer-sized porous spherical hydroxyapatite agglomerates by ultrasonic spray pyrolysis technique. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 118(1378), 462-466.
- [33] Ghosh, S. K., Datta, S., & Roy, S. K. (2004). Solution combustion synthesis of calcium hydroxyapatite nanoparticles. *Transactions of the Indian Ceramic Society*, 63(1), 27-32.
- [34] Batista, H. A., Silva, F. N., Lisboa, H. M., & Costa, A. C. F. (2020). Modeling and optimization of combustion synthesis for hydroxyapatite production. *Ceramics International*, 46(8), 11638-11646.
- [35] Canillas, M., Rivero, R., García-Carrodegua, R., Barba, F., & Rodríguez, M. A. (2017). Processing of hydroxyapatite obtained by combustion synthesis. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 56(5), 237-242.
- [36] Ghosh, S. K., Roy, S. K., Kundu, B., Datta, S., & Basu, D. (2011). Synthesis of nano-sized hydroxyapatite powders through solution combustion route under different reaction conditions. *Materials Science and Engineering: B*, 176(1), 14-21.
- [37] Cho, J. S., & Kang, Y. C. (2008). Nano-sized hydroxyapatite powders prepared by flame spray pyrolysis. *Journal of Alloys and Compounds*, 464(1-2), 282-287.
- [38] Itatani, K., Tsugawa, T., Umeda, T., Musha, Y., Davies, I. J., & Koda, S. (2010). Preparation of submicrometer-sized porous spherical hydroxyapatite agglomerates by ultrasonic spray pyrolysis technique. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 118(1378), 462-466.
- [39] Cho, J. S., Lee, J. C., Chung, S. H., Seo, J. K., & Rhee, S. H. (2014). Effect of grain size and density of spray-pyrolyzed hydroxyapatite particles on the sinterability of hydroxyapatite disk. *Ceramics International*, 40(5), 6691-6697.
- [40] Arokiasamy, P., Abdullah, M. M. A. B., Abd Rahim, S. Z., Luhar, S., Sandu, A. V., Jamil, N. H., & Nabiałek, M. (2022). Synthesis methods of hydroxyapatite from natural sources: A review. *Ceramics International*, 48(11), 14959-14979.
- [41] Akpan, E. S., Dauda, M., Kuburi, L. S., & Obada, D. O. (2020). A facile synthesis method and fracture toughness evaluation of catfish bones-derived hydroxyapatite. *MRS Advances*, 5(26), 1357-1366.
- [42] Mondal, S., Bardhan, R., Mondal, B., Dey, A., Mukhopadhyay, S. S., Roy, S., ... & Roy, K. (2012). Synthesis, characterization and in vitro cytotoxicity assessment of hydroxyapatite from different bioresources for tissue engineering application. *Bulletin of materials science*, 35(4), 683-691.

- [43] Hussin, M. S. F., Abdullah, H. Z., Idris, M. I., & Wahap, M. A. A. (2022). Extraction of natural hydroxyapatite for biomedical applications—A review. *Heliyon*, 8(8).
- [44] Lim, K. T., Kim, J. W., Kim, J., & Chung, J. H. (2014). Development and evaluation of natural hydroxyapatite ceramics produced by the heat treatment of pig bones. *Journal of Biosystems Engineering*, 39(3), 227-234.
- [45] Ofudje, E. A., Rajendran, A., Adeogun, A. I., Idowu, M. A., Kareem, S. O., & Pattanayak, D. K. (2018). Synthesis of organic derived hydroxyapatite scaffold from pig bone waste for tissue engineering applications. *Advanced Powder Technology*, 29(1), 1-8.
- [46] Ooi, C. Y., Hamdi, M., & Ramesh, S. (2007). Properties of hydroxyapatite produced by annealing of bovine bone. *Ceramics international*, 33(7), 1171-1177.
- [47] Odusote, J. K., Danyuo, Y., Baruwa, A. D., & Azeez, A. A. (2019). Synthesis and characterization of hydroxyapatite from bovine bone for production of dental implants. *Journal of applied biomaterials & functional materials*, 17(2), 2280800019836829.
- [48] Malla, K. P. (2022). Synthesis of Hydroxyapatite Nanoparticles (nano-HAp) from Ostrich Bone for Biomedical Applications (Doctoral dissertation, Institute of Science & Technology).
- [49] Prado, J. P. D. S., Yamamura, H., Magri, A. M. P., Ruiz, P. L. M., Prado, J. L. D. S., Rennó, A. C. M., ... & Granito, R. N. (2021). In vitro and in vivo biological performance of hydroxyapatite from fish waste. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 32(9), 109.
- [50] Boutinguiza, M., Pou, J., Comesaña, R., Lusquiños, F., De Carlos, A., & León, B. (2012). Biological hydroxyapatite obtained from fish bones. *Materials Science and Engineering: C*, 32(3), 478-486.
- [51] Swamiappan, S., Xie, X., Lu, C., & Peng, X. (2025). Ultrasonic-assisted green synthesis and characterization of nano-hydroxyapatite from *Cirrhinus molitorella* fish scales bio-waste for biomedical applications. *Ceramics International*.
- [52] Gönenli, C. ve Duymazlar, O. (2024). Investigation of tensile stress and percentage elongation relationships in alloys depending on the alloy elements. In *Makine Mühendisliği* (ss. 116–133). Afyonkarahisar: Yaz Yayınları.
- [53] Sunil, B. R., & Jagannatham, M. (2016). Producing hydroxyapatite from fish bones by heat treatment. *Materials Letters*, 185, 411-414.
- [54] Pon-On, W., Suntornsaratoon, P., Charoenphandhu, N., Thongbunchoo, J., Krishnamra, N., & Tang, I. M. (2016). Hydroxyapatite from fish scale for potential use as bone scaffold or regenerative material. *Materials Science and Engineering: C*, 62, 183-189.
- [55] Lee, S. W., Balázs, C., Balázs, K., Seo, D. H., Kim, H. S., Kim, C. H., & Kim, S. G. (2014). Comparative Study of hydroxyapatite prepared from seashells and eggshells as a bone graft material. *Tissue Engineering and Regenerative Medicine*, 11(2), 113-120.

BÖLÜM 6

MAKİNE TASARIMI VE KONSTRÜKSİYONU, TEMEL İLKELER VE YAKLAŞIMLAR: ÖRNEK BİR UYGULAMA

Cebeli ÖZEK¹

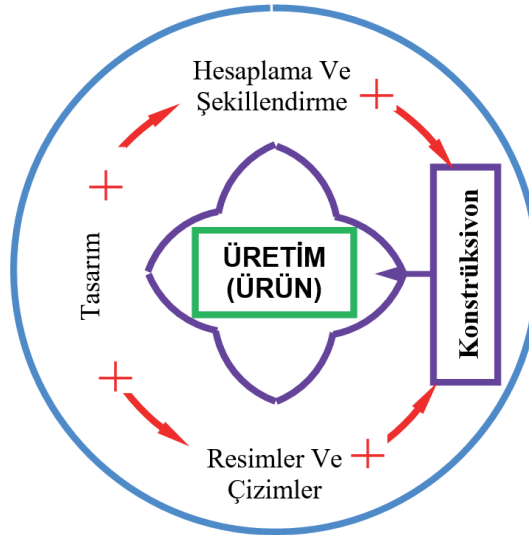
¹ Prof. Dr., Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü ORCID: 0000-0001-7603-415X

1. Giriş

Konstrüksiyon, makine parçalarının tasarımı, analizi, üretimi ve montajını kapsayan disiplin olarak tanımlanırken, tasarım süreci ise işlevsel ihtiyaçların belirlenmesinden parça resimlerinin hazırlanmasına kadar tüm aşamaları içermektedir. Makine tasarımı, yalnızca şekil çizmek değil; malzeme seçimi, mukavemet hesapları, üretilebilirlik ve bakım kolaylığını da içeren çok disiplinli bir faaliyettir. Makine tasarımı ve konstrüksiyonu, mühendisliğin en somut ve uygulamalı alanlarından biridir. Tasarım ve konstrüksiyonda amaç, bir gereksinimi güvenli, ekonomik ve üretilebilir bir biçimde mekanik sistemleri ortaya koymaktır. Bu süreç yalnızca bir parçanın şekil ve boyutlarını belirlemekten ibaret değildir. Aynı zamanda fonksiyon, dayanıklılık, imal edilebilirlik, maliyet ve ergonomi gibi çok boyutlu kriterlerin dengelenmesini gerektirir. Tasarım kararları, ürünün kullanım ömrü, bakım ihtiyaçları ve üretim metodları üzerinde doğrudan etkilidir. Bu yüzden tasarımcılar hem teorik bilgiye hem de uygulama deneyimine ihtiyaç duyarlar.

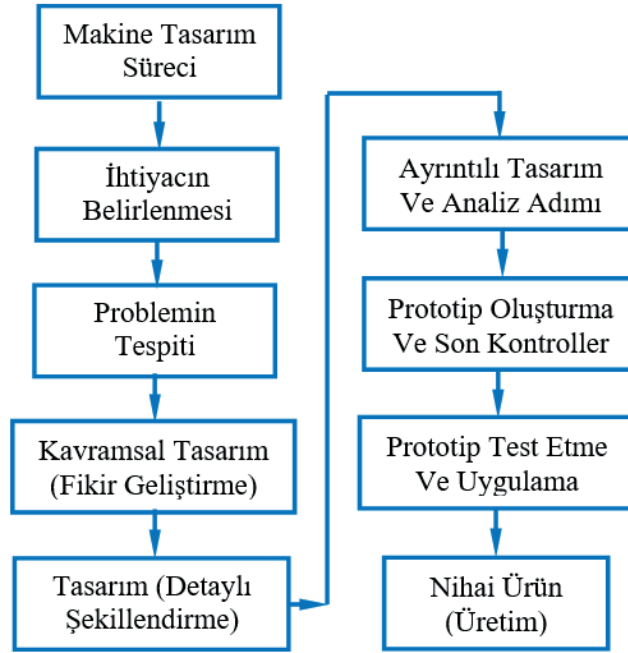
Mühendislikte tasarım, ihtiyacın belirlenmesi (hedef), Teknik ve özel istekler, Çalışma prensibinin tespit edilip belirlenmesi, Fizibilite analizi, Ekonomik ve Teknolojik araştırma, Üretici tasarım sentezi ve bunlara bağlı olarak Ön şekillendirme ve Geliştirme, Temel prensipler ve kinematik analiz, Detaylı tasarım, Şekillendirme, Detay resimleri ve prototipin montajı, Prototipin üretilmesi ve test edilmesi, Üretim için son tasarım ve son olarak Üretim (imalat) adımlarından oluşmaktadır [1].

Mekanik sistemlerde malzeme seçimi, tasarım ve konstrüksiyonun kalbidir. Her malzemenin mekanik özelliklerinin (çekme dayanımı, akma sınırı, sertlik, yorulma dayanımı vb.), işlenebilirlik ve maliyet açısından değerlendirilmesi gerekir. Malzeme seçiminde kullanılan temel kriterler ve yaygın malzeme sınıflarına dikkat edilmeli, örnek hesaplar ve karşılaştırmalarla malzeme seçim süreci somutlaştırılmalıdır. Ayrıca, makine konstrüksiyonunda konstrüksiyon elemanları; civatalar, miler, yataklar, dişliler, kaynaklı bağlantılar, pimli ve perçinli birleştirmeler gibi tasarımın yapı taşları olarak dikkate alınmalı mukavemet hesapları yapılarak her birinin avantajları, mukavemet sınırlamaları ile uygun kullanım alanlarına göre tercih edilmelidirler [1]. Aşağıda Şekil 1’de ürün üretimi için tasarım süreci tanımlanmıştır.



Şekil 1. Ürün (Üretim) tasarım süreci

Tasarımda, tasarım sürecinin modern araçları arasında Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD) yazılımları ve sayısal analiz yöntemleri (Sonlu Elemanlar Analizi-SEM vb.) önemli bir yer tutmaktadır. Bu yöntemler, geometrik modelleme, montaj kontrolü ve mukavemet analizleri ile tasarımın doğrulanmasını hızlandırmakta ve üretimi kolaylaştırmaktadır. Aşağıda Şekil 2’de genel olarak bir makine tasarım süreci akış şeması verilmiştir.



Şekil 2: Makine tasarım süreci akış şeması

Şekil 2’de makine tasarım süreci akış şeması mekanizması için akış diyagramları ve üretim süreci verilmiştir. Akış diyagramı ve üretim sürecinde, ihtiyacın tanımı ve fikir geliştirme, ön boyutlandırma, ön tasarım, detaylı tasarım, analiz ve üretim hazırlığı adımları adım adım sunulmuştur. Her adımda yer alacak şekil ve resimlerin açıklamaları, okuyucunun hem teoriyi hem de uygulamayı aynı anda kavramasına yardımcı olacak şekilde düzenlenmiştir.

Bu kitap bölümünde, uygulamaya yönelik olarak temel tasarım ilkeleri açık bir biçimde hesaplamalı bir örnek ile üretim süreçleri ve akış diyagramları sunulmuştur. Üretim sürecinde güvenlik ve dayanıklılık öncelikli olup örnekte farklı makine elemanlarının beklenen yükler altında güvenle çalışmaları ve elemanın öngörülen ömrü boyunca kabul edilebilir performans göstermelerine dikkat edilmiştir. Üretilbilirlik ve maliyet ise tasarımın gerçekte uygulanabilirliğini sınırlamakta, karmaşık veya pahalı çözümler çoğu zaman pratik olmamaktadır. Ayrıca ergonomi ve kullanıcı etkileşimi de özellikle insan-makine arayüzü olan sistemlerde göz ardı edilememektedir.

2. Makine Tasarımında Etkili Olan Temel Faktörler

2.1. Dayanıklılık

Makine tasarımında dayanıklılık, bir makine elemanının öngörülen yükler altında çalışma süresi (ömrü) boyunca güvenli ve sürekli çalışır halde kalabilmesi anlamına gelmektedir. Dayanıklılık, malzeme seçimi, boyutlandırma, yükleme çeşitleri (çekme, basma, burulma, eğilme vb.) ve yorulma gibi faktörlerle doğrudan ilişkilidir. Bir makine parçasının dayanıklı olması elemanın etkisinde kaldığı maksimum yüklerin ve çevresel etkilerin doğru analiz edilmesine bağlıdır. Ayrıca, beklenmedik yüklemelerde ve ani zorlanmalar durumunda emniyet katsayıları da dikkate alınarak olası belirsizlikler de hesaba katılmaktadır.

2.2. Güvenlik

Güvenlik, makine tasarımında öncelikli bir faktördür. Tasarım sürecinin her aşamasında, operatörlerin ve bakım personelinin güvenliği göz önünde bulundurulmalıdır. Uluslararası standartlarda, makine güvenliği için temel prensipler ve risk değerlendirme yöntemleri tanımlanmıştır. Mekanik, elektriksel, termal, radyasyon vb. gibi potansiyel tehlikeler belirlenmeli ve uygun koruyucu önlemler mutlaka alınmalıdır.

2.3. Ergonomi

Ergonomi, makinenin insan ile etkileşimini optimize etmeyi amaçlar. Operatörlerin fiziksel ve zihinsel sınırlarına uygun tasarım, çalışma pozisyonlarının doğal ve destekleyici olması, kontrol ve arayüzlerin kolay erişilebilir ve anlaşılır olması ergonomik tasarımın temel unsurlarındandır. Uluslararası standartlar, ergonomik gereklilikleri belirli kurallar çerçevesinde detaylandırmış bulunmaktadır. Ergonomik bir tasarımda, hem verimlilik artırılmış hem de iş kazaları minimuma indirgenmiş olurlar.

2.4. Maliyet

Makine tasarımında maliyet, ilk yatırım, işletme ve bakım maliyetlerini kapsamaktadır. Maliyet, etkin bir tasarım için uygun malzeme seçimine, üretim yöntemlerinin optimizasyonuna ve enerji verimliliği dikkate alınarak yapılmalıdır. Maliyette en önemli etken, tasarımın ömrü boyunca toplam sahip olma mutlaka analiz edilmelidir.

2.5. Üretilirlik

Üretilirlik makine tasarımında öncelikli bir faktör olup, tasarlanan parçanın mevcut imalat yöntemleriyle ekonomik ve kaliteli bir şekilde üretilmesini ifade eder. Bu yüzden tasarımda karmaşık geometrilerden kaçınılmalı, standart elemanlar tercih edilmeli ve toleranslar üretim yeteneklerine uygun olarak belirlenmelidir. Üretilirlik, hem maliyeti düşürür hem de kaliteyi artırır.

3. Tasarımda Malzeme Seçiminin Önemi

Malzeme seçimi, makine tasarımının en önemli adımlarından biridir. Yanlış malzeme seçimi, parça ömrünün kısılmasına, beklenmedik hasarlar ve arızalara ve bunun sonucu olarakta yüksek maliyetlere yol açabilir. Malzeme seçimi yapılırken, parçanın çalışacağı sistem, maruz kalacağı yükler, çalışma ortamı, üretim yöntemi ve maliyet gibi faktörler mutlaka dikkate alınmalıdır.

3.1 Metaller

Yüksek mukavemet, iyi işlenebilirlik ve uygun maliyet istenen tasarımlarda, genel olarak karbon çelikleri; daha yüksek dayanım ve özel kullanım durumunda alaşımlı çelikler tercih edilmelidir. Havacılık ve otomotiv sanayinde olduğu gibi hafiflik, iyi korozyon direnci ve kolay şekillendirilebilirlik isteniyorsa Alüminyum ve Alüminyum alaşımları yaygın olarak tercih edilmektedir. İyi aşınma direnci ve işlenebilirlik şartlarında, Rulman, yatak ve dekoratif parçalarda Pirinç ve Bronz iyi bir kullanım alanına sahiptir.

3.2 Polimerler ve Kompozitler

Hafif, korozyona dayanıklı ve elektriksel yalıtıcılık istenen durumlarda Plastikler tercih edilmelidir. Elemanların yüksek bir mukavemet ve hafif olması istenen durumda Kompozitlerin kullanımı önem arz etmektedir. Özellikle otomotiv ve havacılık endüstrisinde Karbon fiber takviyeli polimerler (CFRP) ve Cam elyaf takviyeli polimerler (GFRP) yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

3.3 Seramikler ve Camlar

Yüksek sıcaklık ve aşınma direnci, düşük süneklik istenen elemanlar ve yerlerde Seramikler, İyi bir kimyasal direnç, düşük mekanik dayanım ve Amorf yapı durumunda Camlar, Yüksek elastikiyet, conta ve titreşim sönümleyici olarak ta genellikle Elastomerler kullanılır.

4. Mekanik Özellikler ve Tasarıma Etkileri

Malzemenin yük altında kırılmadan veya kalıcı şekil değiştirmeden dayanabilme yeteneği Mukavemet, kopmadan önce ne kadar uzayabileceği; yüksek süneklik, darbe ve yorulma dayanımı Süneklik, Yüzeyinin çizilme ve aşınmaya karşı direnci Sertlik, çatlak ilerlemesine karşı gösterdiği direnç Kırılma tokluğu, Tekrarlı yükler altında malzemenin çalışma süresi (ömrü) Yorulma dayanımı ve Malzemelerin kimyasal ortamlara karşı dayanıklılık özelliği ise Korozyon direnci olarak ifade

eilir. Makine elemanlarında tasarım sürecinde yüzey pürüzlülüğü, kesme parametrelerine göre değişmektedir [2].

Bir eleman için malzeme seçimi yapılırken; Parçanın çalışacağı yer ve yüklemenin türü, Sıcaklık, nem, kimyasal ortam, Üretim Yöntemi (Döküm, dövme, talaşlı imalat, 3D baskı vb.), Malzemenin fiyatı ve tedarik kolaylığı ve Geri dönüştürülebilirlik (Çevresel Etki) gibi faktörler göz önünde bulundurulmalıdır.

5. Konstrüksiyon Elemanları

Civatalar; iki veya daha fazla makine parçasını sökülebilir şekilde birleştiren dişli bağlantı elemanlarıdır. Somun, pul ve rondela gibi yardımcı elemanlarla birlikte kullanılırlar. Özellikle bakım ve montaj kolaylığı gerektiren yerlerde tercih edilirler.

Kaynaklı Bağlantılar; Ergitme Kaynakları: Elektrik ark kaynağı, gazaltı kaynağı (MIG, MAG, TIG), tozaltı kaynağı. Basınçlı Kaynaklar: Nokta kaynağı, sürtünme kaynağı, difüzyon kaynağı. Kaynaklı Bağlantılarda, kaynak dikişinin boyutu, şekli ve nüfuziyeti, bağlantının mukavemetini belirler. Kaynak hataları (gözenek, çatlak, eksik nüfuziyet) bağlantının zayıflamasına yol açar. Kaynaklı bağlantıların yorulma dayanımı, ana malzemeye göre daha düşük olduğundan mukavemet katsayısı yüksek tutulur. Kaynak dikişi boyutları, yükleme yönüne ve malzeme kalınlığına göre belirlenir. Kaynaklı bağlantılarda ısının tesiri altındaki bölgede (ITAB) oluşan metalürjik değişimler mutlaka dikkate alınmalıdır.

Uçak ve köprü gibi yüksek mukavemet gerektiren yerlerde Katı Perçinler, tek taraflı montaj gereken yerlerde Tüplü ve Kör Perçinler, ön delik açmadan montaj istenen durumlarda Kendi kendisine delikli perçinler tercih edilirler. Perçinli bağlantılar, farklı malzemelerin birleştirilmesinde, hızlı montaj, titreşim direnci gibi avantajları, delik açılması nedeniyle mukavemet kaybı, sızdırmazlık gereksinimi, sökülememezlik gibi dezavantajlar sağlamaktadır.

Miler, moment ve hareket ileten, genellikle dairesel kesitli makine elemanlarıdır. Dönen ve dönmeyen miler olarak ikiye ayrılırlar. Milerin boyutlandırılması, maruz kalacakları burulma, eğilme ve eksenel yükler dikkate alınarak yapılır. Miler, yataklar, dişli ve kasnaklarla kullanılırlar. Milin kritik kesitlerinde çentik etkisini azaltmak ve mukavemet özelliğini artırmak amacıyla yüzey sertleştirme işlemleri uygulanmaktadır. Mil yapımında genel olarak, sementasyon çelikleri (C15, 20MnCr5), ıslah çelikleri (C35, 42CrMo4) ve transmisyon çelikleri yaygın olarak kullanılırlar. Milerde, yüzey sertleştirme (indüksiyon, sementasyon) ile aşınma ve yorulma dayanımı artırılır. Mil çapı, burulma ve eğilme momentlerine göre hesaplanır [1].

Yataklar, kaymalı yataklar ve yuvarlanmalı yataklar diye ikiye ayrılırlar. Kaymalı Yataklar, düşük hız ve yüksek yük uygulamalarında, Rulmanlı yataklar ise düşük sürtünme ve yüksek hız olması gereken durumlarda tercih edilirler. Yatak seçimi, yükün türü, hız, montaj kolaylığı ve bakım gereksinimine göre yapılır.

Paralel miler arasında güç iletimi için düz dişliler, daha sessiz ve yüksek yük taşıma kapasitesi istenen yerlerde helis dişliler, kesişen miler arasında güç iletiminde konik dişliler ve büyük hız düşürme oranları ile sessiz çalışma istenen yerlerde ise sonsuz vida-karşılık dişlisi tercih edilmelidir. Dişli hesaplarında modül, diş sayısı ve basınç açısı temel parametrelerdir. Dişlilerde, temas gerilmesi ve bükülme gerilmesi hesapları yapılır. Yüzey sertleştirme (sementasyon, nitrürasyon) ile aşınma ve yorulma dayanımı artırılır. Dişli kutularında yağlama ve sızdırmazlık önemli tasarım kriterlerindendir.

6. Makine Tasarım Süreci

Makine tasarımı, aşağıdaki adımlardan oluşan iteratif bir süreçtir:

1. İhtiyacın Tanımlanması: Problemin ve gereksinimlerin belirlenmesi.
2. Kavramsal Tasarım: Farklı çözüm alternatiflerinin geliştirilmesi.

3. Analiz ve Optimizasyon: Mukavemet, maliyet, üretilebilirlik analizleri.
4. Detay Tasarım: Boyutlandırma, toleranslar, malzeme seçimi.
5. Prototipleme ve Test: Fiziksel veya sanal prototiplerin test edilmesi.
6. Üretim ve Montaj: Nihai ürünün imalatı ve montajı.
7. Dokümantasyon ve Sunum: Teknik resimler, montaj talimatları ve kullanıcı kılavuzları hazırlanır.

Şekilde, yukarıda sıralanan adımların birbirini takip eden ve gerektiğinde geri besleme ile tekrar eden bir döngü oluşturduğu gösterilmiştir.

6.1. Tasarım Süreci ve CAD Yazılımlarının Rolü

Bilgisayar destekli tasarım (CAD) yazılımları, makine tasarımında vazgeçilmez araçlardır. CAD yazılımları sayesinde, 2D ve 3D modelleme, Parça ve montaj çizimleri, Hareket ve çakışma analizleri, Sonlu elemanlar analizi (FEA) ile gerilme, deformasyon ve yorulma ömrü hesaplanabilmektedir. Ayrıca, Teknik resimler ve ölçülendirme otomatik olarak oluşturulabilir. En yaygın CAD Yazılımları; SolidWorks, Inventor, CATIA ve ANSYS gibi yazılımlar, parametrik modelleme, montaj, teknik resim ve analiz modülleriyle öne çıkanlardır. CAD ortamında yapılan tasarımlar, üretim öncesi hataların tespitini ve optimizasyonu kolaylaştırır.

6.2. Sonlu Elemanlar Analizi Nedir?

Sonlu Elemanlar Analizi (SEA), karmaşık yapıların ve makine parka ve elemanlarının gerilme, deformasyon, sıcaklık dağılımı ve titreşim gibi fiziksel davranışlarının sayısal olarak analiz edilmesini sağlayan bir yöntemdir. SEA, özellikle karmaşık geometrilerde ve çoklu yükleme durumlarında kritik nokta ve bölgelerin tespitinde kullanılır.

Makine tasarım sürecinde imalat aşmasında, temel imalat yöntemleri, Karmaşık şekilli ve büyük hacimli parçaların imalatı için döküm, Yüksek mukavemet ve tokluk gerektiren parçalar için dövme, Hassas boyut ve yüzey kalitesi gerektiren parçalarda talaşlı imalat, İnce levhaların bükülmesi, çekilmesi sac şekillendirme ile, Kalıcı bağlantılar için kaynak tercih edilmektedir. Son zamanlarda günümüzde Prototip ve düşük hacimli üretim için yenilikçi bir yöntem olan 3D Baskı (Katmanlı İmalat) metodu yaygın olarak kullanılmaktadır [1]. Ayrıca Bulanık Mantık Modeli ile imalatla kalıp hesapları yapılmış ve kalıp ve zımba yarıçapı ile kalıp/baskı plakası için optimum ve en düşük çekme oranları belirlenmiştir [3].

7. Makine Tasarım Süreci Ve Örnek Uygulama

Aşağıda Şekil 3’de, iki bantlı bir konveyör sistemi ve redüktör mekanizması verilmiştir. Şekildeki mekanizmada redüktörün birinci kademesi sonsuz vida, ikinci kademesi çift silindirik helisel dişlilerden oluşmaktadır. Redüktörden iki bantlı konveyöre güç ve hareket iletilmektedir. Bantların ilerleme hızı $V=30$ m/dak, çekme kuvveti $F=1400$ N ve konveyör tamburlarının çapı $\varnothing D_T=500$ mm dir. Sürtünme açısı $\rho'=2^\circ$, silindirik dişli çarkların verimi $\eta_d=0.98$, bir çift rulmanlı yatağın verimi $\eta_r=0.99$ dur. Motorun devir sayısı $n_1=1460$ d/d, redüktörün toplam çevrim oranı ve silindirik dişlilerin çevrim oranı $i_{34}=3.5$, Sonsuz vidanın ağı sayısı $Z_1=3$, helisel dişlilerin (döndüren) diş sayısı $Z_3=16$, sonsuz vida çarkı (Z_2) dişlisinin diş sayısı ve helisel dişlilerin (döndürülen) diş sayısı (Z_4) dür. Sonsuz vidanın eksenel modülü $M_e=5$ mm, helisel dişlilerin modülü $M_n=2,5$ mm, helis dişli helis açısı $\beta_0=16.5^\circ$, sonsuz vidanın helis açısı $\gamma_0=7.5^\circ$ olduğunda konveyörleri çalıştırmak için motor gücünü hesaplayınız.

Hedefler:

- Temel mekanik ve malzeme bilgisi kazanmak.
- Konstrüksiyon elemanlarının işlev ve hesaplarını öğrenmek.
- CAD ortamında parça ve montaj modelleyebilmek.
- Teknik resim okuma ve çizme becerisi geliştirmek.
- Standartlara uygun güvenli ve üretilebilir tasarım yapmak.
- Bir redüktör çıkışında kullanılacak, moment ileten bir milin tasarımı yapılacaktır. Mil, bir

dişli ve bir kasnak taşımaktadır. Gerekli adımlar aşağıda özetlenmiştir.

Tasarım Adımları:

Yüklerin belirlenmesi: Dişli ve kasnaktan gelen radyal ve eksenel kuvvetler hesaplanır.

Malzeme seçimi : Yüksek mukavemet ve yorulma dayanımı olan alaşımlı bir çelik seçilir (Örnek: 42CrMo4 veya Transmisyon çeliği vb.).

Ön boyutlandırma : Mil çapı, burulma ve eğilme momentlerine göre hesaplanır.

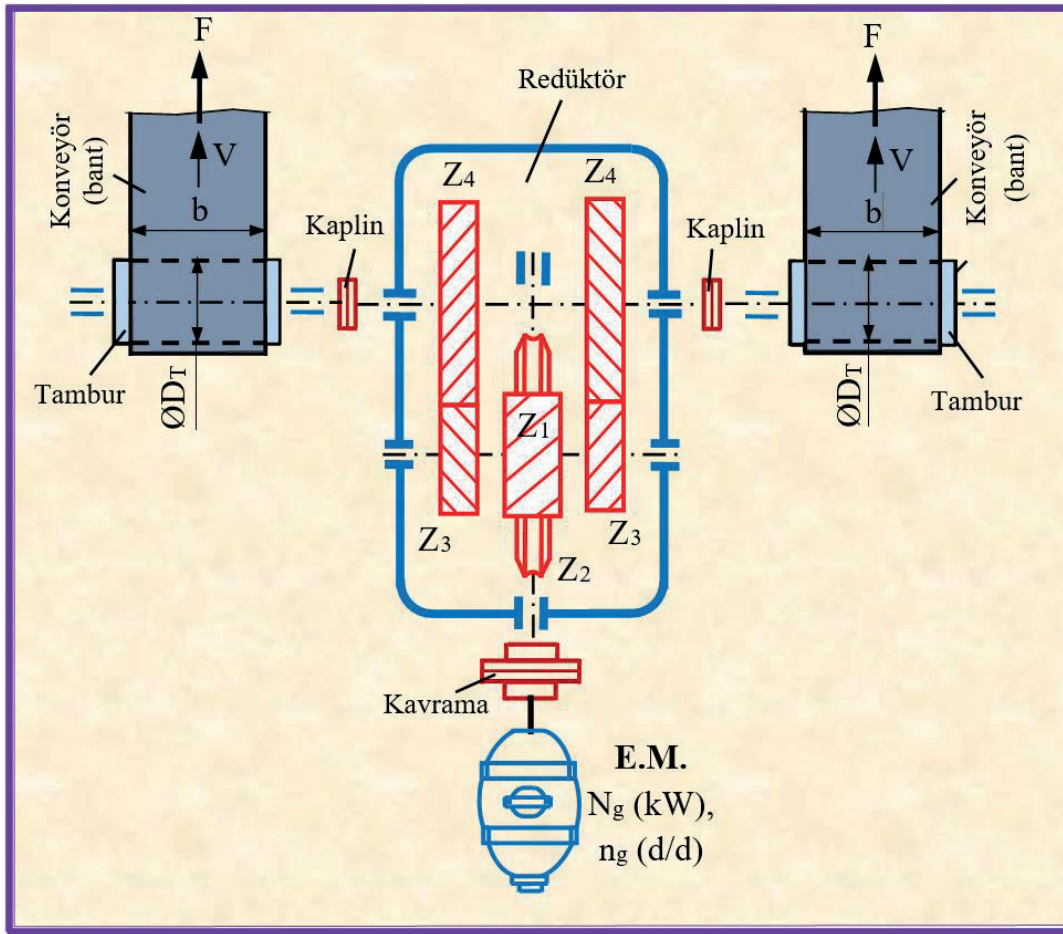
Mukavemet analizi : Von Mises, Tresca ve Goodman kriterlerine göre kontrol yapılır.

Yorulma analizi : S-N eğrileri ve emniyet katsayısı ile yorulma ömrü tahmini yapılır.

Kritik hız analizi : Milin doğal frekansı hesaplanır ve çalışma hızından uzak tutulur.

Yüzey işlemi ve toleranslar: Yatak bölgelerinde taşlama ve yüzey sertleştirme uygulanır, çentik etkileri gözönüne alınır.

Teknik resim ve montaj: Elemanların teknik resmi, ölçülendirme ve montaj resimleri hazırlanır.



Şekil 3. İki bantlı bir konveyör sistemi ve redüktör mekanizması

Çevrim oranları: Konveyörlerin tamburları direkt olarak redüktörün çıkış millerine bağlıdır. Dolayısıyla redüktörün çıkış devir sayısı (n_φ) kasnağın da devir sayısıdır.

$$V = \pi \cdot D_T \cdot n_\varphi \Rightarrow n_\varphi = \frac{V}{\pi \cdot D_T} \Rightarrow n_\varphi = \frac{30}{3,14 \cdot 0,5} \Rightarrow n_\varphi = 19 \text{ d/d bulunur.}$$

Redüktörün toplam çevrim oranı:

$$i_{\text{top}} = \frac{n_g}{n_\varphi} \Rightarrow i_{\text{top}} = \frac{1460}{19} \Rightarrow i_{\text{top}} = 76,84 \text{ dir.}$$

Helisel dişlilerin çevrim oranı $i_{34}=3,5$ ise sonsuz vidanın çevrim oranı:

$$i_{12} = \frac{i_{\text{top}}}{i_{34}} \Rightarrow i_{12} = \frac{76,84}{3,5} \Rightarrow i_{12} = 21,95 \text{ bulunur.}$$

Diş sayıları:

$$Z_2 = i_{12} \cdot Z_1 \Rightarrow Z_2 = 21,95 \cdot 3 \Rightarrow Z_2 = 65,85 \Rightarrow Z_2 \approx 66;$$

$$Z_4 = i_{34} \cdot Z_3 \Rightarrow Z_4 = 3,5 \cdot 16 \Rightarrow Z_4 = 56 \text{ elde edilir.}$$

Bu durumda gerçek çevrim oranları:

$$i_{12} = \frac{Z_2}{Z_1} \Rightarrow i_{12} = \frac{66}{3} \Rightarrow i_{12} = 22; \quad i_{34} = \frac{Z_4}{Z_3} \Rightarrow i_{34} = \frac{56}{16} \Rightarrow i_{34} = 3,5;$$

$$i_{\text{top}} = i_{12} \cdot i_{34} \Rightarrow i_{\text{top}} = 22 \cdot 3,5 \Rightarrow i_{\text{top}} = 77$$

Motor momenti ve gücü: İki konveyörün çalıştırılması için gereken moment:

$$M_{b2} = 2 \cdot F \cdot \frac{D_T}{2} \Rightarrow M_{b2} = 2 \cdot 1400 \cdot \frac{500}{2} \Rightarrow M_{b2} = 700000 \text{ N.mm}$$

$\gamma_0 = 7,5^\circ$ için sonsuz vidanın verimi:

$$\eta_v = \frac{\tan \gamma_0}{\tan(\gamma_0 + \rho')} \Rightarrow \eta_v = \frac{\tan(7,5^\circ)}{\tan(7,5^\circ + 2^\circ)} \Rightarrow \eta_v = 0,786 \text{ olur.}$$

Toplam verim iki helisel mekanizma ve beş çift rulmanlı yatak için:

$$\eta_{\text{top}} = \eta_v \cdot \eta_d^2 \cdot \eta_r^5 \Rightarrow \eta_{\text{top}} = 0,786 \cdot 0,98^2 \cdot 0,99^5 \Rightarrow \eta_{\text{top}} = 0,718$$

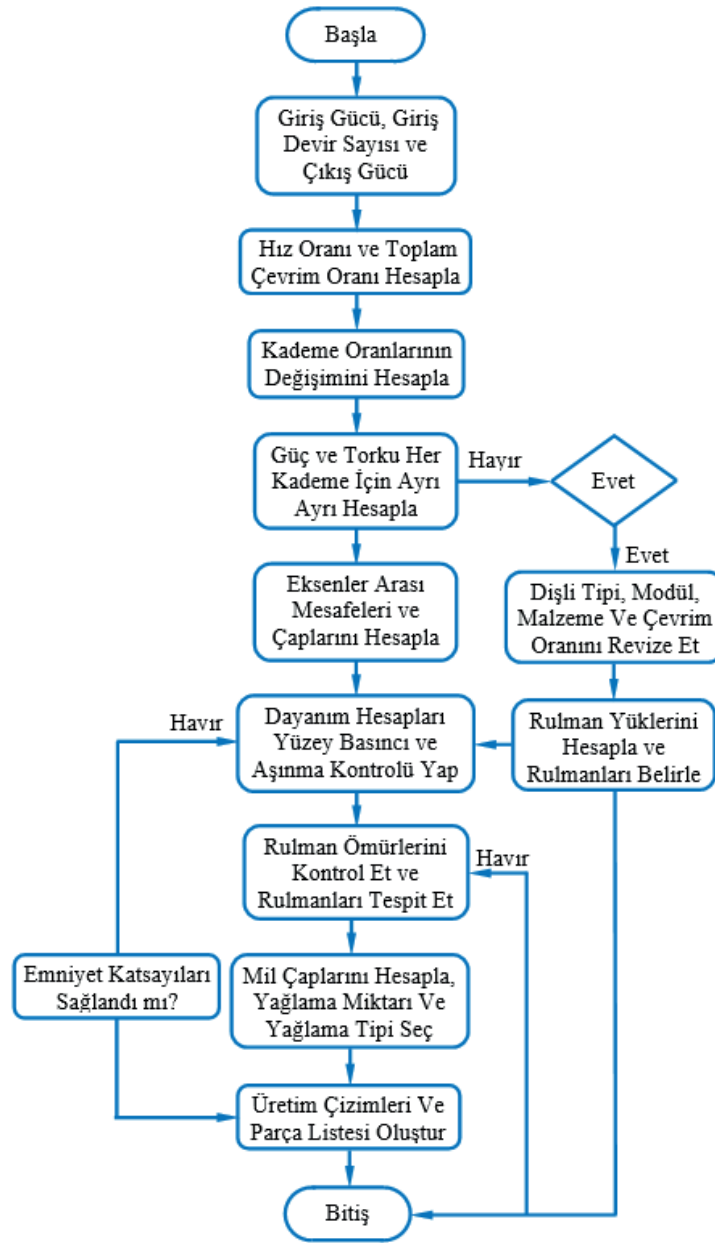
Motor momenti ve gücü:

$$M_{b1} = \frac{M_{b2}}{i_{\text{top}} \cdot \eta_{\text{top}}} \Rightarrow M_{b1} = \frac{700000}{77 \cdot 0,718} \Rightarrow M_{b1} = 12660 \text{ N.mm} \Rightarrow M_{b1} = 12,66 \text{ N.m}$$

$$N_{\text{mot}} = \frac{M_{b1} \cdot n_g}{9550} \Rightarrow N_{\text{mot}} = \frac{12,66 \cdot 1460}{9550} \Rightarrow N_{\text{mot}} = 1,94 \text{ kW olarak hesaplanır.}$$

Aşağıda Şekil 4'de, redüktör mekanizmasının tasarımı ve akış şeması verilmiştir.

Şekilde görüldüğü gibi bir redüktör mekanizmanın tasarımında, Redüktör Giriş gücü, Giriş devir sayısı ve Çıkış gücü, Hız oranı ve Toplam çevrim oranı, Kademe oranlarının değişimi, her kademe için Güç ve Tork ayrı ayrı hesaplanacaktır. Dişlilerin eksenler arası mesafeleri ve çapları, Dişli tipi, Modül, Malzeme ve çevrim oranı revize edilmeli, Dayanım hesapları; Yüzey basıncı ve Aşınma kontrolü yapılmalıdır. Rulman yükleri ve rulmanların bu yükler göre belirlenmesi, Rulman ömürlerinin kontrolü ve rulmanları nihahi olarak bu yükler göre tespit edilmelidir. Mil çapları hesaplanmalı, Yağlama miktarı ve Yağlama tipi, Emniyet katsayılarının ağırlanıp sağlanmadığı ve son olarak İmalat (Detay) resimleri ve Parça listesi oluşturularak üretim aşamasına geçilmelidir.



Şekil 4. Bir redüktör mekanizmanın tasarımı ve akış şeması

8. Bantlı Konveyör ve Hesabı

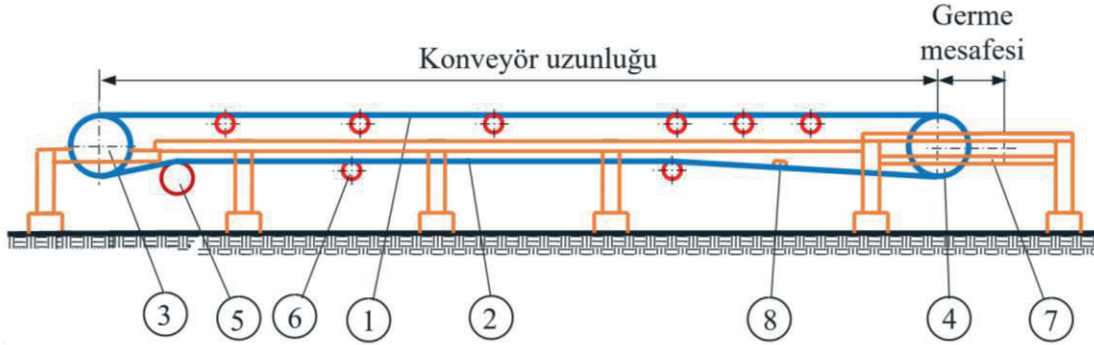
Sürekli malzeme iletiminde en yaygın kullanılan bantlı konveyör sistemleridir. Bantlı konveyörler, farklı malzeme tiplerini sürekli ve kontrollü olarak taşıyan, üretim ve lojistik süreçlerinde verimlilik ve iş güvenliği sağlayan, yüksek taşıma kapasitesi, uzun mesafe malzeme iletimi ve basit mekanik yapıları ile endüstride geniş bir uygulama alanına sahiptirler. Bant seçiminde, taşınan malzeme türü (tane, parça, toz, ıslak/ kuru) tasarım parametrelerini doğrudan etkilemektedir. Bantlı konveyörlerin doğru seçilmesi ile işletme maliyetleri düşer ve üretkenlik artar.

Taşınan malzemenin fiziksel özellikleri, çevresel etkenler ve hat geometrisi bantlı konveyörlerin çalışma şartlarını belirler. Taşınan malzemenin tane boyutu, yoğunluk, nem, aşındırıcılık ve yapışkanlık gibi özellikleri bant tipi, bant genişliği ve taşıma hızı seçiminde önemli birer parametredir. Ayrıca sıcaklık aralığı, kimyasal etkileşimler ve hijyen gereksinimleri (özellikle gıda sektöründe) malzeme ve kaplama seçiminde önemli rol oynar. Hat eğimi ve kavisler, malzeme

kaymasını veya dökülmeyi önleyecek konstrüksiyon ve hız kontrolleri gerektirir.

Bantlı konveyörler madencilik, çimento ve yapı malzemeleri, tarım, gıda işleme, paketleme ve lojistik depolama gibi çok çeşitli sektörlerde kullanılırlar. Ağır yük ve yüksek sıcaklık gerektiren uygulamalarda hasır bantlı veya çelik bantlı sistemler kullanılmaktadır. Hijyen ve kolay temizlenebilirlik gereken gıda sektöründe PU veya PVC kaplı bantlar tercih edilirler. Otomotiv montaj hatları, geri dönüşüm sistemleri ve havaalanı bagaj sistemleri gibi sürekli, düzenli ve yüksek hacimli taşıma gerektiren yerlerde bantlı konveyörler daha yaygın olarak kullanılırlar.

Bantlı konveyörler, süreklilik ve yüksek taşıma kapasitesi, iş gücünde zamandan tasarruf, operasyonel hız ve süreç kontrolü, güvenli ve ergonomide iyileşme sağlamaları bakımından önemlidirler. Bantlı taşıma sistemleri, manuel taşıma ile karşılaştırıldığında hem zaman hem de maliyet tasarrufu sağlar ve belirli bir hat boyunca ürün akışını standartlaştırarak üretim planlamasını kolaylaştırmaktadır. Tasarımı doğru yapılmış bir konveyör hattı sistemi enerji verimliliğini artırır. Ürün hasarını azaltır ve bakım planlamasıyla duruş sürelerini minimum düzeyde tutar. Ayrıca sektöre özgü bant tipleri ve aksesuarlarla sisteme entegre edilerek süreç otomasyonuna katkı sağlar ve kalite kontrolü destekler. Aşağıda Şekil 5’de, bantlı bir konveyörün basit prensip şeması verilmiştir. Burada, 1-Bant, 2-Çelik şasi, 3-Döndürme tamburu, 4-Yön değiştirme tamburu, 5-Saptırma tamburu, 6-Dönüş makara grubu, 7-Gerdirme tertibatı ve 8-Temizleme düzenini göstermektedir.

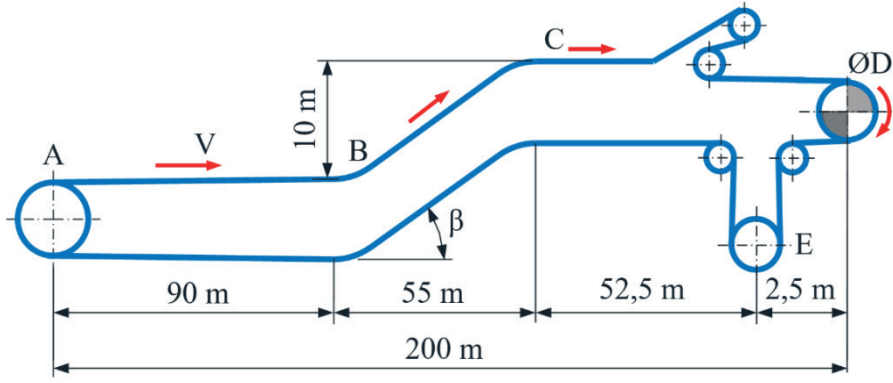


Şekil 5. Bantlı konveyörün prensip şeması [37]

Sürekli mekanik konveyörler, genellikle, önceden tanımlanmış bir taşıma hattı boyunca, bir besleme noktasından bir boşaltma noktasına sabit bir hızda malzemeyi destek elemanları kullanarak düzenli bir şekilde taşıyan sabit cihazlardır. Bu tür cihazlar, yüksek bir malzeme verimi ve taşınan malzemenin net kütlesinin konveyörün kendi kütlesine iyi bir oranı sağlamak için özellikle dökme malzemelerin taşınmasında önemlidirler. Özellikle, oluklu bantlı konveyörlerin kullanımı, üretiminin dökme malzemelerin sürekli taşınmasına dayandığı her sanayi dalında standart hale gelmiştir. Konveyörler, birkaç metreden birkaç kilometre mesafeye kadar saatte birkaç tondan on binlerce tona kadar kütle akışlarını sağlamaktadırlar [4,5,6]. Bantlı konveyörlerin dökme malzemelerin taşınmasındaki kilit rolü nedeniyle, güvenilir bir şekilde çalışmasını sağlamak kritik öneme sahiptir. İzlenen her bir eleman için farklı teknikler uygulanabilir. Silindirlerin ve kasnakların izlenmesi için optik fiber kabloların kullanımı da dahil olmak üzere sıcaklık ve titreşim ölçümleri araştırılmıştır [7,8,9,10]. Bant değiştirmenin yüksek maliyeti ve buna bağlı duruş süresi göz önüne alındığında, konveyör bandının durumunun izlenmesi özellikle önemlidir. Bandın durumunu izlemek için X-ışınları, bilgisayarlı görüş, iç iletkenlik dedektörleri, manyetik yöntemler, ses dalgaları ve kızılötesi spektrum analizi gibi birçok yöntem mevcuttur [11,12,13,14,15]. Motorların ve dişli kutularının durumu, diğerlerinin yanı sıra termal görüntüleme kameraları ve titreşim sensörleri kullanılarak izlenir [16,17]. Yukarıda belirtilen testlere ek olarak, kayış yırtılma sensörleri, pozisyon değişimi sensörleri, motor güç sensörleri, kayış gerginlik sensörleri ve sıcaklık sensörleri gibi yaygın olarak kullanılan sensörlere dayalı bir dizi çözüm mevcuttur. Endüstri 4.0 teknolojisini izlemeye ek olarak, bir cihazın çalışmasındaki herhangi bir anormalliğin tespit edilmesini ve böylece olası bir arızanın öngörülmesini önermektedir. Bu konu üzerinde, konveyörün durumuna dayalı bir uzman sistem

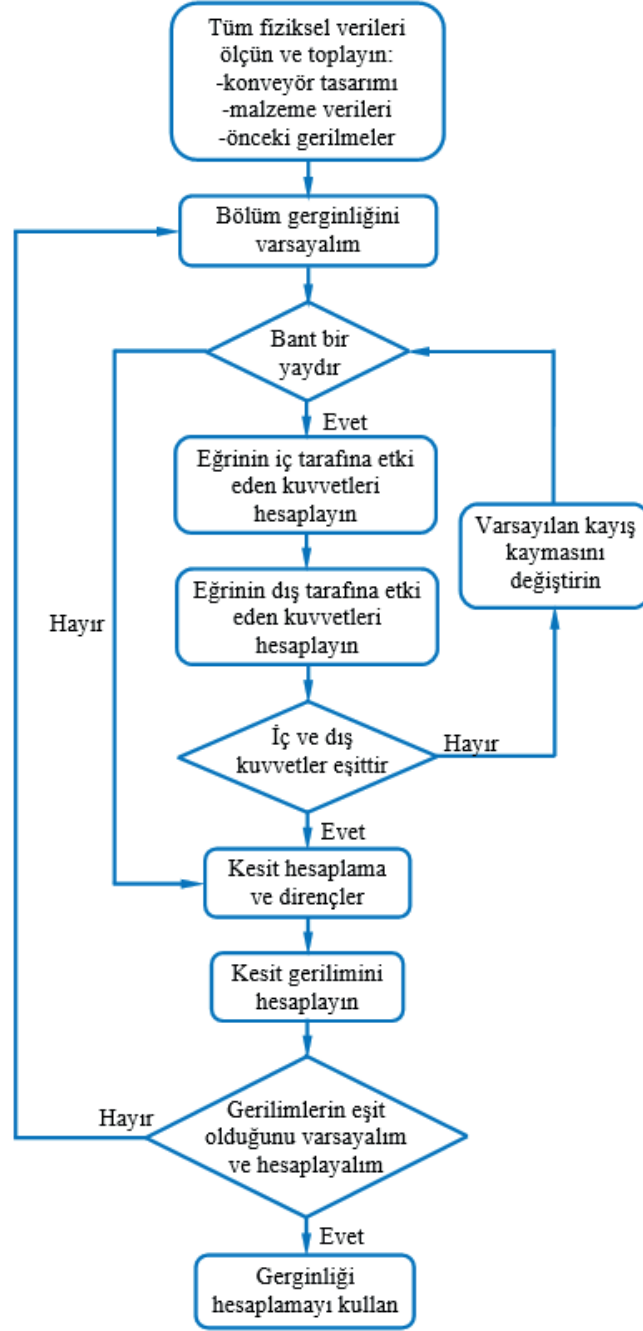
oluşturma önerisi, konveyör motorlarının durumunu izlemek için evrişimli bir sinir ağının kullanımı, analitik teknikler kullanılarak bileşen ömrünün tahmini, arıza olasılığını tahmin etmek için makine görüşünün kullanımı, destek vektör regresyonu (DVR) kullanılarak yatakların kalan ömrünün hesaplanması ve karmaşık sistemlerin veriye dayalı arıza tahmini dahil olmak üzere birçok çalışma yürütülmüştür [18,19,20,21]. Cihazın çalışmasını izlemek için yukarıda açıklanan tekniklere ek olarak, özellikle enerji verimliliği ve taşıma hızı arasındaki ilişkiye atıfta bulunularak cihaz etkinliği üzerine araştırmalar yürütülmüştür [22,23,24]. Ayrıca, çok bileşenli sistemlerde ekonomik kriterlere dayalı konveyör bantlarının bakımı için optimizasyon algoritmaları önerileri de bulunmaktadır [25,26]. Günümüzde, malzemeleri uzun mesafelerde taşıyabilen ve zorlu arazilerde (örneğin dağlardan) ilerleyebilen bantlı konveyörler oluşturmak giderek daha önemli hale geliyor. Ancak, önceki çalışmalar büyük gerçek nesneleri test etmediğinden, çalışmaları sırasında ortaya çıkan önemli sorunları göz ardı ediyorlar (yani, sistem tepkisinin zaman gecikmesi ve yükseklikteki önemli değişikliklerle ve malzemenin ve bantın sürüklendiği geniş yaylarla ilişkili gerilmelerin dağılımı). Bu nedenle, testler dağlık bir alanda bulunan uzun bir nesne üzerinde gerçekleştirildi. İncelenen konveyör çok sayıda tepe içeriyor ve doğal engellerden kaçınıyor, bu nedenle rotası çok sayıda viraj içeriyor. Makale, arızaları tahmin etmek için benzersiz bir ölçüm verisi seti ve yenilikçi öneriler içeriyor. Büyük nesnelerde meydana gelen olayları hesaba katıyor ve gerçek arıza vakalarını analiz ediyor. Önerilen çözüm, "dijital ikiz" fikri ve bantlı konveyörlerin kurulumuna uyarlanmasıyla uyumludur [27]. Bant devrilme sorunlarının temel nedeninin, konveyörün belirli bölümlerindeki aşırı yüksek gerilimler olduğu göz önüne alındığında, analizin anahtarı, konveyördeki direncin ve bant gerilimlerinin doğru bir şekilde belirlenmesidir. Dirençlerin ve temas kuvvetlerinin belirlenmesine ilişkin temel konular Hettler [28] ve Grimmer [29] tarafından sunulmuştur. Limberg [30] ve Greune [31], kayış gerginliğini tahmin etmek için yöntemler sunmuşlardır. Elemanların boyutu, konveyör bandının esnekliği ve değişen dış koşullar nedeniyle konveyörlerdeki gerilmelerin belirlenmesi oldukça karmaşık bir süreçtir. Bu nedenle, daha önce yapılan birçok çalışmada konveyörün davranışının bireysel yönleri analiz edilmiştir. Fedorko ve Ivanco, kayış ve silindirlere arasındaki temas kuvvetlerinin dağılımının analizini gerçekleştirmiştir [32]. Hou ve Meng, transmisyon kayışının dinamik özelliklerinin analizini gerçekleştirmiştir [33]. Chen ve Xue ise, ADAMS yazılımını kullanarak kuvvetlerin ve gerilmelerin belirlenmesini de hesaba katarak konveyörün dinamik bir modelinin simülasyonlarını önermişlerdir [34]. Molnar, boru şeklindeki konveyörlerdeki silindirlere etki eden temas kuvvetleri üzerindeki bant gerginliğinin etkisini analiz etmiştir [35]. Bortnowski [36], enine titreşimleri ölçerek bir konveyör bandının gerginliğini belirlemek için bir yöntem önermiştir. Yukarıdaki literatür incelemesini göz önünde bulundurarak, bu makale, anomalilerin tespiti ve bant devrilmelerinin önlenmesi için yöntemleri inceleyerek, mevcut cihazların çoğunda bulunan temel sensörler kullanılarak konveyör operasyonunun optimize edilmesini sağlamaktadır. Dolayısıyla, bu makalenin amacı, modern BT tekniklerinin mevcut konveyör tesislerinin koşullarını izlemek ve operasyonlarını iyileştirmek için kullanılabileceğini göstermektir.

Aşağıda Şekil 6’da, konveyör bant genişlik hesabı için örnek bir tertip şekli ve Şekil 7’de ise bir konveyör bant gerginliği hesaplama algoritması verilmiştir.



Şekil 6. Konveyör bant genişlik hesabı [37]

Şekilde gösterilen tertipte kırılmış taş, bantlı bir konveyörle düzenli olarak 200 m ileriye 10 m yükseklikteki bir platform üzerine taşınmak istenmektedir. Bant eğim açısı 13° ve bant eğimi için indirgenme faktörü $k=0.92$, ağır aşındırıcı bir malzeme olan kırılmış taş için bant hızı $V=1.5$ m/s olarak verilmiştir. En büyük boyutu 100 mm (elenmemiş dolayısıyla boyutlandırılmamış) olan kırılmış taş malzemenin özgül ağırlığı $2,0 \text{ t/m}^3$ (20 kN/m^3) dir. Saate 6 MN (MN/saat) kırılmış taş malzeme kapalı galeri içindeki çalışma şartlarında bir eleğe bant tarafından tahrik edilen bir boşaltma arabası sistemi ile nakledilmektedir. Buna göre gerekli bant genişliği ve bant ağırlığı ne olmalıdır.



Şekil 7. Konveyör bant gerginliği hesaplama algoritması

Konveyör eğiminin kontrolü:

$$\tan\beta = \frac{10}{55} \Rightarrow \tan\beta = 0,182 \Rightarrow \beta = 10,3^\circ$$

Kırılmış fakat elenmemiş taş için izin verilen bant eğimi standartlarda, $\beta = 18^\circ$ dolayında olduğundan bant eğimi bakımından sistemde herhangi bir sorun yoktur.

Standart bant tablolarından 13° bant eğimi için indirgenme faktörü $k = 0,92$ alınabileceğine göre hesaplarda kapasitenin bu oranda azalacağı göz önünde bulundurulmalıdır. Buna göre yatayda taşınan malzeme miktarı:

$$Q_{\text{yatay}} = \frac{Q_{\text{eğimli}}}{k} \Rightarrow Q_{\text{yatay}} = \frac{6,0}{0,92} \Rightarrow Q_{\text{yatay}} = 6,52 \text{ MN/h olur.}$$

Bant hızı ve genişliği, boyutlandırılmamış (kırılmış taş) malzeme iletimi söz konusu olduğundan standartlara göre 3'lü taşıyıcı rulo grubu seçilmesi uygundur.

Buna göre kapasite;

$$Q = 440 \cdot V \cdot \gamma \cdot (0,9 \cdot B - 0,05)^2 \text{ (t/h)}$$

Bant Genişliği: (1000 daN $\approx$ 1 ton alınarak);

$$B = \frac{\sqrt{\frac{Q}{440 \cdot V \cdot \gamma} + 0,05}}{0,9} \Rightarrow B = \frac{\sqrt{\frac{652}{440 \cdot 1,5 \cdot 2,0} + 0,05}}{0,9} \Rightarrow B = 0,836 \text{ m bulunur.}$$

Standart bant genişliği standartlara göre $B = 1000 \text{ mm}$ seçilir. Böylece bantın birim ağırlığı da $G_B = 16,0 \text{ daN/m}$ olarak alınır.

Sonuç

Sanayi uygulamalarında iyi bir konstrüksiyon, üretim hattı verimliliğini artırır, arıza sürelerini azaltır ve iş güvenliğini yükseltir. Tersine, zayıf ve kötü bir tasarım hem doğrudan maliyetlere hem de itibar kaybına yol açar. Tasarım sürecine erken dönemde mühendislik hesapları, malzeme seçimi ve üretim yöntemlerinin entegre edilmesi bir prototip veya projenin başarısını belirler. Makine tasarımı ve konstrüksiyonu, mühendislik uygulamaları için hem teorik hem de pratik bilgi gerektiren disiplinler arası bir alandır. Temel ilkeler, malzeme seçimi, konstrüksiyon elemanları, modern tasarım süreçleri ve CAD yazılımlarının etkin kullanımı, güvenli, dayanıklı, ekonomik ve üretilebilir makinelerin geliştirilmesinde kritik bir öneme sahiptir. Bu bölümde sunulan bilgiler endüstrinin mühendislik problemlerini sistematik ve bütüncül bir yaklaşımla çözmelerine yardımcı olacak temel bir bilgi kaynağıdır.

Modüler bir tasarım ve konstrüksiyon ile bakım ve parça değişimi kolaylaşır. Dolayısıyla standart eleman kullanımı ve stok maliyetleri düşer, malzeme ve parça temin ve tedarik süreleri kısalmış olur. Malzeme verimliliği, enerji tüketimi ve geri dönüşüm potansiyeli modern tasarımın ayrılmaz parçalarıdır.

Kaynaklar

- [1] E. Koç, "Makine Elemanları-I", Adana Nobel Kitabevi, 3. Baskı, Cilt 1, 2007.
- [2] Y. H. Çelik, M. Bulut Özek, C. Özek, "Investigation of Plasma Arc Cutting Parameters with Type-2, Materials Testing, Fuzzy Set and System, 55 (10), 789-795, 2013.
- [3] C. Özek, Y. H. Çelik, M. Bulut Özek, "A fuzzy logic model to determine the effects of die/blank holder angle and punch radius on drawing ratio in angular deep drawing dies", Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, Cilt 25, Sayı 2, 379-388, 2013.
- [4] V. Moln'ar, G. Fedorko, M. Andrejiov'a, and A. Grinc, "Online monitoring of a pipe conveyor. Part I: Measurement and analysis of selected operational parameters," vol. 94, pp. 364–371, 2016.
- [5] V. Moln'ar, G. Fedorko, M. Andrejiov'a, and A. Grinc, "Online monitoring of pipe conveyors part II: Evaluation of selected operational parameters for the design of expert system," vol. 104, pp. 1–11, 2017.
- [6] S. Wang, W. Guo, W. Wen, R. Chen, T. Li, and F. Fang, "Research on belt conveyor monitoring and control system," Commun. Comput. Inf. Sci., vol. 105 CCIS, no. PART 1, pp. 334–339, 2010.
- [7] T. Koz, B. Ryszard, L. Jurdziak, and A. Kirjan'ow-b, "Magnetic methods in monitoring changes of the technical condition of splices in steel cord conveyor belts," vol. 104, no. November 2018, pp. 462–470, 2019.
- [8] X. Liu, Y. Pang, G. Lodewijks, D. He, Experimental research on condition monitoring of belt conveyor idlers, Measurement 127 (May) (2018) 277–282.
- [9] A. S. Morales et al., "A Technology Review of Idler Condition based Monitoring Systems for Critical Overland Conveyors in Open - pit Mining Applications," pp. 5–10, 2017.
- [10] Y. Liu, C. Miao, X. Li, J. Ji, and D. Meng, "Research on the fault analysis method of belt conveyor idlers based on sound and thermal infrared image features," Measurement, vol. 186, no. September, p. 110177, 2021.
- [11] C. Pan, X. Liu, H. Zhu, X. Shan, X. Sun, distributed optical fiber vibration sensor based on Sagnac interference in conjunction with OTDR, Opt. Express 25 (17) (2017) 20056.
- [12] C. Hou, T. Qiao, H. Zhang, Y. Pang, X. Xiong, Multispectral visual detection method for conveyor belt longitudinal tear, Measurement 143 (2019) 246–257.
- [13] J. Che, T. Qiao, Y. Yang, H. Zhang, Y. Pang, Longitudinal tear detection method of conveyor belt based on audio-visual fusion, Meas. J. Int. Meas. Confed. 176 (January) (2021) 1–12.
- [14] Y. Pang and G. Lodewijks, "A Novel Embedded Conductive Detection System for Intelligent Conveyor Belt Monitoring," 2006.
- [15] Y. Wang, C. Miao, Y. Liu, D. Meng, Research on a sound-based method for belt conveyor longitudinal tear detection, Measurement vol. 190, no. January (2022), 110787.
- [16] R. Yang, T. Qiao, Y. Pang, Y. Yang, H. Zhang, G. Yan, Infrared spectrum analysis method for detection and early warning of longitudinal tear of mine conveyor belt, Meas. J. Int. Meas. Confed. 165 (2020), 107856.
- [17] O. Munoz-ornelas, D. A. Elvira-ortiz, R. A. Osornio-rios, R. J. Romero-troncoso, S. Member, and L. A. Morales-hernandez, "Methodology for Thermal Analysis of Induction Motors with Infrared Thermography Considering Camera Location," pp. 7113–7118, 2016.
- [18] K.S. Kiangala, Z. Wang, An Effective Predictive Maintenance Framework for Conveyor Motors Using Dual Time-Series Imaging and Convolutional Neural Network in an Industry 4.0 Environment, IEEE Access 8 (2020) 121033–121049.
- [19] X. Liu, D. He, G. Lodewijks, Y. Pang, J. Mei, Integrated decision making for predictive maintenance of belt conveyor systems, Reliab. Eng. Syst. Saf. 188 (March) (2019) 347–351.
- [20] M. Andrejiova, A. Grincova, D. Marasova, Identification with machine learning techniques of a classification model for the degree of damage to rubber-textile conveyor belts with the aim to achieve sustainability, Eng. Fail. Anal. vol. 127, no. June (2021), 105564.
- [21] T. Benkedjouh, K. Medjaher, N. Zerhouni, S. Rechak, Remaining useful life estimation based on nonlinear feature reduction and support vector regression, Eng. Appl. Artif. Intell. 26 (7)

- (2013) 1751–1760.
- [22] H. Q. Wang, Y. N. Cai, G. Y. Fu, M. Wu, and Z. H. Wei, “Data-driven fault prediction and anomaly measurement for complex systems using support vector probability density estimation,” *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 67, no. September 2017, pp. 1–13, 2018.
 - [23] D. He, Y. Pang, G. Lodewijks, Green operations of belt conveyors by means of speed control, *Appl. Energy* 188 (2017) 330–341.
 - [24] B.I. Jefteni, “Implementation of Fuzzy Control to Improve Energy Efficiency of Variable Speed Bulk, Material Transportation” 59 (7) (2012) 2959–2969.
 - [25] D. H. Dinh, P. Do, and B. Iung, “Multi-level opportunistic predictive maintenance for multi-component systems with economic dependence and assembly/ disassembly impacts,” *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 217, no. September 2021, p. 108055, 2022.
 - [26] G. Levitin, L. Xing, Y. Dai, Minimizing mission cost for production system with unreliable storage, *Reliab. Eng. Syst. Saf.* vol. 227, no. July (2022), 108724.
 - [27] G. Fedorko, V. Molnár, M. Vasil’, and R. Salai, “Proposal of digital twin for testing and measuring of transport belts for pipe conveyors within the concept Industry 4.0,” *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 174, no. January, 2021.
 - [28] W. Hettler, Beitrag zur Berechnung der Bewegungswiderstände von Gurtbandförderern mit dreiteiligen Tragrollenstationen. Dissertation Technische Hochschule Otto von Guericke Magdeburg, Technische Hochschule Otto von Guericke Magdeburg (1975).
 - [29] K. Grimmer, “Zwei Ausgewählte Probleme der Bandförderertechnik (Teil 2): Über den Sturzwiderstand bei Bandförderanlagen, Habilitationsschrift Universität Hannover”, Universität Hannover (1967).
 - [30] H. Limberg, “Untersuchung der trumbezogenen Bewegungswiderstände von Gurtförderanlagen. Dissertation Universität Hannover,” Universität Hannover, 1988.
 - [31] A. Greune, “Energiesparende Auslegung von Gurtförderanlagen, Dissertation Universität Hannover”, Universität Hannover (1989).
 - [32] G. Fedorko, V. Ivanco, Analysis of Force Ratios in Conveyor Belt of Classic Belt Conveyor, *Procedia Eng.* 48 (2012) 123–128.
 - [33] Y. Hou, Q. Meng, Dynamic characteristics of conveyor belts, *J. China Univ. Min. Technol.* 18 (2008) 629–633.
 - [34] C. Yan and X. He, “Model and Dynamic Simulation of Belt Conveyor,” in 2010 International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application, 2010, vol. 1, pp. 949–951.
 - [35] V. Molnar, G. Fedorko, B. Stehlíkov’a, P. Michalik, M. Kopas, Influence of tension and release in piped conveyor belt on change of normal contact forces in hexagonal idler housing for pipe conveyor loaded with material, *Measurement* 84 (2016).
 - [36] P. Bortnowski, W. Kawalec, R. Król, M. Ozdoba, Identification of conveyor belt tension with the use of its transverse vibration frequencies, *Measurement* 190 (2022), 110706.
 - [37] İ. Cürgül, E. Feyzullahoğlu, “Taşıma Tekniği-Taşıma Tekniği Problemleri”, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2013.

BÖLÜM 7

KUMLAMA TEKNİĞİ: TEMELLER VE ETKİLERİ

Ali İhsan BAHÇEPINAR¹, İbrahim AYDIN², Can GÖNENLİ³

¹ Öğr. Gör. Dr., Manisa Celal Bayar Üniversitesi Manisa Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, ali.bahcepinar@cbu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-9744-0146.

² Doç. Dr., Manisa Celal Bayar Üniversitesi Manisa Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, ibrahim.aydin@cbu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-6281-4902.

³ Doç. Dr., Ege Üniversitesi Ege Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, can.gonenli@ege.edu.tr, ORCID: 0000-0001-9163-1569.

1. Giriş

Aşındırıcı püskürtme, yaygın adıyla kumlama tekniği, bir yüzeyi düzleştirmek, pürüzlü hale getirmek, şekillendirmek veya yüzey kirleticilerini gidermek amacıyla yüksek basınç altında aşındırıcı bir malzeme akışının malzeme yüzeyine fırlatılması işlemidir. Püskürtme malzemesini fırlatmak için tipik olarak sıkıştırılmış hava gibi basınçlı bir akışkan veya santrifüj tekerlek kullanılır [1,2].

Kumlama tekniği, yüzey temizliği amacıyla Benjamin Tilghman'ın 18 Ekim 1870'te aldığı patentle resmîyet kazanmıştır. Bu yöntem, başlangıçta malzeme yüzeylerinden pas ve boyayı temizleyerek onları sonraki pratik uygulamalara hazırlamayı amaçlıyordu. Thomas Pangborn, 1904'te sıkıştırılmış havayı kumla birleştirerek tekniğin kapasitesini ve verimliliğini önemli ölçüde artırdı [3,4]. Başlangıçta kum kullanılan bu yöntem, verimlilik arayışları ve teknik iyileştirmeler sonucu zamanla dönüşüm geçirdi: 1893'te hava işlemcisinin tanıtılmasıyla endüstriyel ölçeğe taşındı ve 1918'de ise sürecin güvenliğini artırmak amacıyla kapalı koruma sistemleri geliştirildi. 1939 yılına gelindiğinde yöntem, resmen Aşındırıcı Püskürtme adını aldı. Bu dönemle birlikte; alüminyum oksit, silisyum karbür, çelik grit, cam parçacıkları ve organik malzemeler gibi farklı gereksinimlere uygun çeşitli aşındırıcılar kullanılmaya başlandı. Başlangıçta pas giderme ve metal sonlandırma gibi endüstriyel görevler için kullanılan bu teknik, zamanla dekoratif amaçlı uygulamalara da kaymıştır [3,5,6].

1. Kumlama Ortamları

Kumlama işleminin başarısı ve malzeme yüzeyinde oluşturulacak profilin özellikleri, kullanılan aşındırıcı malzemenin doğru seçilmesine bağlıdır. Aşındırıcı malzeme seçimi; yüzey temizlik derecesi, elde edilmesi istenen yüzey pürüzlülüğü ve işlem maliyetleri göz önünde bulundurularak yapılmalıdır [7]. Aşındırıcı malzeme türlerinin sınıflandırılması Şekil 1. de verilmiştir.



Şekil 1. Kumlama İşleminde Kullanılan Aşındırıcıların Sınıflandırılması [8]

Mineral Aşındırıcılar; doğal kaynaklardan elde edilen ve iyi kesme nitelikleri sayesinde nispeten ekonomik çözümler sunan malzemelerdir [8,9]. Özellikle silika, sahip olduğu sertlik ve yüksek temizleme performansı nedeniyle sektörde öne çıkmaktadır; tekne gövdeleri, tuğla, taş ve beton yüzeylerin temizlenmesi gibi zorlu uygulamalarda gösterdiği etkinlik, onu kumlama endüstrilerinin en çok tercih ettiği ortamlar arasına sokmuştur [10-12]. Ancak, silika bazlı aşındırıcıların yaygın kullanımı büyük riskler taşımaktadır. Kumlama faaliyetleri sırasında yayılan serbest silika tozu ve zehirli gaz emisyonları, ciddi solunum yolu hastalıklarına zemin hazırlar. Üretilen tozun 5 mikrondan daha küçük olması, kolayca solunabilmesine ve akciğerlere yerleşerek silikozis, pulmoner silikozis ve akciğer sertleşmesi gibi ölümcül sonuçlara yol açabilen sağlık sorunlarına neden olmasına sebep olmaktadır [13,14]. Bu durum, mineral aşındırıcıların etkinliğine rağmen, özellikle kapalı sistemlerde ve yetersiz koruma ile kullanımını ciddi bir mesleki tehlike haline getirmektedir [8].

Tarımsal Aşındırıcılar; içeriğinde silika barındırmayan aşındırıcılar grubunda yer alır [15,16]. Bu malzemeler, belirli kumlama uygulamaları için kendilerine özgü niteliklere sahiptir. Ceviz kabukları ve mısır koçanları, yüzeye hasar vermeden boya ve kaplamaları nazikçe sıyırmak için tercih edilen başlıca örneklerdir ve aynı zamanda doğada biyolojik olarak parçalanabilir özelliktedirler [17-19]. Ceviz kabuğu aşındırıcılarının etkinliği, metal yüzeyinde fark edilebilir bir değişime neden olmaksızın sert boyaları ve kaplamaları çıkarma imkânı sunar [20]. Genel olarak, tarım bazlı aşındırıcılar, temizlik işlemleri açısından hem güvenli hem de uygun maliyetli kabul edilir [21]. Parçacıklarının metale karşı aşındırıcı etki göstermemesi sayesinde, parçaların hassas boyutlarında herhangi bir bozulmaya yol açmazlar. Yüzeyde kalan bu aşındırıcı atıklar zamanla biyolojik olarak çözünür [8,22].

Sentetik Aşındırıcılar; geri dönüştürülmüş ve mühendislik aşındırıcılarını içerir, bu tür malzemeler %1'den daha az serbest silika içerir ve kumlama esnasında ağır metal ya da zararlı gaz yayılımına yol açmaz. Özellikle camın yapısı, serbest silika içeren diğer kumlama ortamlarına göre önemli bir rekabet avantajı sunmaktadır. Bu durum, yüksek oranda kristalize silika içeren geleneksel dolgu, grit veya endüstriyel minerallere alternatif olarak geri dönüştürülmüş cam tedarikçileri için ekonomik faydalar doğurabilir. Uygulamada, geri dönüştürülmüş cam, tersaneler, çeşitli inşaat sahaları ve ekipman temizliği gibi alanlarda silis kumu ve benzeri diğer aşındırıcıların yerini başarıyla almıştır [8,23].

Metalik Aşındırıcılar; kumlama işlemlerinde yüksek yüzey sertliğinin gerekli olduğu uygulamalarda en sık kullanılanlardır. Bu malzemelerin mekanik özellikleri, enerji endüstrisinden biyokütle taşımacılığına kadar uzanan geniş bir yelpazedeki uygulamalar için büyük ilgi görmesini sağlamaktadır [24-28]. Çelik bilya ve çelik grit, daha ağır olmaları sayesinde yüzeyde daha derin bir sıkıştırma profili oluşturabilir; ancak fırlatılmaları için daha fazla enerji harcanması gerekir ve yüzeyde farklı metal izleri bırakma riski taşırlar. Çelik yüzeylerin uygun şekilde temizlenmemesi ise, kaplamanın vaktinden önce ve maliyetli bir şekilde bozulmasına yol açar [8,29].

2. Kumlama Yöntemleri

Kumlama yöntemleri, aşındırıcı malzemenin hedeflenen iş parçası yüzeyine fırlatılma mekanizmasına göre temelde iki farklı ana başlık altında sınıflandırılır. Birincisi, aşındırıcıların doğrudan basınçlı hava kullanılarak hızlandırılması ve yüzeye püskürtülmesi esasına dayanır. İkinci temel yöntem ise, aşındırıcıları fırlatmak için türbin veya benzeri bir mekanizma kullanılarak elde edilen santrifüj kuvveti etkisine dayanır; bu yöntem özellikle yüksek hacimli ve otomatik sistemlerde tercih edilir [30]. Basınçlı kumlama yöntemleri kendi içerisinde kuru ve ıslak kumlama olarak 2 grupta incelenir.

Kuru kumlama, metal, plastik ve cam dahil olmak üzere farklı ürünlerin yüzey işlemlerinde kullanılan, yaygın ve agresif bir temizleme yöntemidir. Bu kumlama kabinleri, yüzeydeki oksitlenmiş tabakayı, çapakları, kalıntıları ve çizikleri gidermenin yanı sıra, yüzeyi dekorasyon, hafif matlaştırma ve güçlendirme yönetimi gibi amaçlarla hazırlar. İşlem sırasında genellikle Beyaz Alüminyum Oksit, Çelik Grit veya Cam Kürecikler gibi çeşitli aşındırıcı ortamlar kullanılır. Modern kuru kumlama makinelerinde, atılan aşındırıcıyı tozdan ayırarak yeniden kullanıma hazır hale getiren siklon ayırma sistemleri ve oluşan tozu toplayan toz giderme sistemleri bulunur. Bu entegre sistemler, aşındırıcı maliyetini düşürmeye, verimliliği artırmaya ve çevre kirliliğini önlemeye yardımcı olur. Özellikle yüksek basınçlı kuru kumlama makineleri, sıkıştırılmış hava ile basınç tankında basınçlandırılan aşındırıcıyı hızlandırarak parça yüzeyine püskürtür ve bu, yüksek hızda temizlik ve derin darbe noktaları sağlar [31].

Islak kumlama, paslanmayan ürünler için özel olarak tasarlanmıştır. Bu yöntem, aşındırıcıyı su ile karıştırarak kumlama yapar, bu sayede daha hassas bir yüzey elde edilir ve daha az aşındırıcı tüketimi gerçekleşir. Islak kumlama, tozsuz çalışması ve aşındırıcı partiküllerin yüzeye gömülmesini önleyerek derinlemesine temizlik sağlaması gibi önemli avantajlar sunar. Aynı zamanda, yıkama ve kumlama adımlarını birleştirebilir ve yüzeyde oluşabilecek çözgü sorununu azaltır veya tamamen ortadan kaldırır. Uygulama alanları arasında ön işlem, matlaştırma, hafif dekorasyon işlemleri ile kauçuk ve plastik kalıpların temizliği yer alır. Ayrıca paslanmaz çelik ürünler, alüminyum, altın, gümüş takılar, kristal cam ve elektrikli parçalar gibi çeşitli makine parçalarının kumlanması için kullanılır. Makine gövdeleri dayanıklı ve aşınmaya karşı dirençli cam elyaf takviyeli plastikten yapılabilir. Bu yöntemde genellikle küçük cam kürecikler ve her türlü ince grit kullanılması tavsiye edilir [31].

Kumlama türbinleri, 1930'lerden beri geliştirilmiş olup, günümüzde yüzeylerde hız, maliyet etkinliği ve tekdüzellik sağlama açısından önde gelen yöntemdir. Bu sistemin çalışma mantığı, paletlerin takılı olduğu bir diskin oldukça yüksek hızlarda dönmesine dayanır. Yerçekimi ve diskin oluşturduğu vakum etkisiyle merkeze beslenen aşındırıcı partiküller, merkezkaç kuvveti sayesinde paletler üzerinden kaydırılarak iş parçasına yüksek hızda fırlatılır. Türbinin temel mekanizması, fırlatmayı sağlayan disk ve paletler, aşındırıcıyı merkeze yönlendiren besleme borusu, abrasifin paletlere doğru zamanlama ve açıyla ulaşmasını sağlayan distribütör ve atış bölgesini hassasça kontrol eden kontrol kafesinden oluşur. Kontrol kafesi üzerindeki açıklıklar, partikül dağılımını optimize ederek püskürtmenin yoğunlaştığı sıcak bölgenin şeklini ve yerini belirler. Bu mekanik yöntem, basınçlı hava destekli kumlama sistemlerine göre üstün verimlilik ve ekonomiklik sunar. Örneğin, aynı anda hava ile kumlamanın 8 katı büyüklüğünde bir alan

türbinle temizlenebilirken, bu işlem için harcanan enerji yaklaşık 6,5 kat daha azdır. Bu sistemlerde genellikle, kütlesi küçük ve aşındırıcı etkisi yüksek olan silis kumu gibi malzemeler yerine, yüksek yoğunluklu çelik bilya ve çelik grit gibi metalik aşındırıcılar tercih edilir [30].

3. Kumlamanın Amaçları

Kumlama işlemi, sanayide birden fazla bağımsız amaca hizmet eden kritik bir yüzey işlem yöntemidir ve temel hedefleri iki ana başlık altında incelenir: Yüzey temizleme ve hazırlama, yüzey özelliklerini değiştirme [32].

Yüzey temizleme ve hazırlama amacı, sonraki işlemlerin kalitesini ve malzeme dayanımını doğrudan etkiler. Bu kapsamda döküm tozu, döküm kumu, tufal ve çapak gibi üretim kalıntılarının giderilmesi sağlanır. Ayrıca boyama, kaplama veya yapıştırma işlemleri öncesinde yüzey temizliği sağlanır ve tutunmayı artırmak için gerekli pürüzlülük oluşturulur. Kumlama, paslanmayı hızlandıran tufal tabakasını temizleyerek koruyucu kaplamanın ömrünü uzatır. Son olarak, buzlu cam imalatı, plastik matlaştırma veya kot eskitme gibi dekoratif yüzeyler elde etmek için de kullanılır [32].

Yüzey özelliklerini değiştirme amacı ise, malzemenin mekanik dayanımını veya yüzey fonksiyonelliğini artırmayı hedefler. Kumlama, yüzeyde artık basma gerilmeleri oluşturarak metalin yorulma, korozyon yorulması ve kemirme gibi hasarlara karşı mukavemetini önemli ölçüde artırır. Aynı zamanda yüzey pürüzlülüğünü homojenleştirerek keskin kenarları yuvarlar veya ütü tabanları gibi parçalarda ısı transferi verimini artırmak için yüzey alanını yükseltir. Kumlama, bunlara ek olarak uçak kanat panellerinde olduğu gibi malzemelerin şekillendirilmesi amacıyla da kullanılabilen çok yönlü bir yöntemdir [32].

4. İşlem Parametreleri ve Yüzey Etkileri

Kumlama yönteminin başarısı ve elde edilen yüzey kalitesi, aşındırıcı malzemenin fiziksel özelliklerine ve işlemin mekanik parametrelerine doğrudan bağlıdır. Bu etkenler aşındırıcı büyüklüğü ve sertliği, aşındırıcı şekli, fırlatma hızı, püskürtme açısı, kumlama süresi olmak üzere altı ana başlıkta toplanmaktadır [33].

Aşındırıcı büyüklüğü ve sertliği kritik öneme sahiptir; iyi bir sonuç için büyük ve küçük taneli aşındırıcıların karışımı gerekir, zira çok büyük taneler yüzeyde dövme izleri bırakırken, çok ince taneler yeterli temizliği sağlamaz. Ayrıca, aşındırıcının temizlenecek malzemeden daha sert olması esastır; çok yumuşak aşındırıcılar temizlik etkisi göstermezken, çok sert olanlar ise çabuk kırılarak maliyetleri artırır ve tokluğu iyi olan sert aşındırıcılar tercih edilmelidir [33].

Aşındırıcı şekli yüzey profilini belirler. Yuvarlak aşındırıcılar pürüzsüz bir yüzey oluştururken, köşeli aşındırıcılar keskin ve pürüzlü bir profil ortaya çıkarır [33].

Fırlatma hızı hayati bir dengede tutulmalıdır. Çok yüksek hızlar aşındırıcıların hızla hasar görmesine ve geri seken partiküllerin kumlama verimini düşürmesine yol açarken, çok düşük hızlar yeterli temizleme enerjisini sağlayamaz [33].

Püskürtme Açısı ise aşındırıcı akışının hedefi bulması ve homojenlik için önemlidir. Yanlış bir açi ayarı, makine performansı ve bilya kalitesi ne olursa olsun işlemin verimini düşürür [33].

Kumlama süresi de hassas bir şekilde yönetilmelidir. Az süre yetersiz temizliğe, aşırı süre ise zaman, enerji kaybına ve aşındırıcının gereksiz yıpranmasına neden olur [33].

5. Literatür Özeti

Uzun ve arkadaşları [34], çelik konstrüksiyon imalatı yapan işletmelerde yüzey temizliği ve boya yapışmasını artırma amaçlarıyla türbinli kumlama tezgâhında deneysel bir çalışma yürütmüştür. Bu çalışma kapsamında St37 ve St52 çelik levhaları, üç farklı yüzey durumunda, S390 ve S460 iki farklı bilya ve beş farklı ilerleme hızında kumlamışlardır. Elde edilen temel sonuç, ilerleme hızının azaltılmasının, numuneler üzerinde oluşan ortalama yüzey pürüzlülük değerini artırdığıdır. Ayrıca, en yüksek pürüzlülük artışı, yüzeyi frezelenmiş St37 malzemede bulunmuştur ve daha büyük çapa sahip S460 bilyanın, S390'a göre daha fazla yüzey pürüzlülüğü oluşturduğu gözlemlenmiştir.

Baş ve arkadaşları [35], 90MnCrV8 soğuk iş takım çeliğinden üretilmiş silindirik numunelerin yorulma davranışlarını, uygulanan farklı yüzey işleme yöntemlerine göre karşılaştırmıştır. Çalışma, yorulma ömrünün kullanılan yönteme bağlı olarak büyük oranda değiştiğini göstermiştir. Buna göre, tornalamadan sonra uygulanan elektrik deşarj metodu işleminin parçanın yorulma ömrünü azalttığı, ancak ardından uygulanan kumlama işlemi ile yorulma ömrünün tekrar arttığı tespit edilmiştir.

Akcan ve arkadaşları [36], kaplama öncesinde uygulanan farklı yüzey işlemlerinin altlık malzemenin özelliklerine etkisini Etial 171 Al alaşımları üzerinde incelemiştir. Yapılan incelemeler sonucunda, yüzey pürüzlülüğü değerinin kumlanmış alüminyum altlık numunesinde en yüksek ve parlatılmış numunede ise en düşük olduğu tespit edilmiştir. Temas açısı değerleri incelendiğinde, kumlanmış alüminyum numunesinin temas açısı $63,7^\circ$ olarak ölçülmüş ve bu numunenin yüksek ıslatılabilirlik özelliği göstermesi, yüzeye kaplamanın iyi tutunacağını düşündürmüştür. Buna karşılık, parlatılmış alüminyum numunesinin temas açısı $112,6^\circ$ ile çok yüksek çıkmış ve bu durum, kaplamanın yüzeye yapışmasını zorlaştıracak veya döküleceği sonucunu desteklemiştir. Genel olarak, kumlanmış yüzeyin yüksek pürüzlülüğü ve düşük temas açısı sayesinde kaplama için optimum özelliklere sahip olduğu belirtilmiştir.

Bulutsuz ve arkadaşları [37], medikal ve endüstriyel uygulamalar için yüzeylerin ıslanma karakterini değiştirmek amacıyla, Ti64Al4V ELI numuneler üzerinde kumlama ve anodizasyon işlemlerini incelemiştir. Çalışma, pürüzlülük değerinin kumlama ile $1,92 \mu\text{m}$ 'ye yükseldiğini ve anodizasyon sonrası $1,73 \mu\text{m}$ 'ye düştüğünü göstermiştir. Islanma özelliği açısından: Otoklav uygulanmayan, kumlama ve anodizasyon işlemi gören yüzeyler, $41,1^\circ$ kontak açısı ile en hidrofilik karakteri göstermiştir. Otoklav uygulandıktan sonra ise, kumlanmış yüzeyler $119,67^\circ$ ile en hidrofobik karaktere bürünmüştür. Bu sonuç, sterilizasyon adımlarının özellikle kumlanmış yüzeylerde yüzey kimyasını ve topografyasını etkileyerek ıslanma karakterini köklü şekilde değiştirdiğini ortaya koymuştur.

Küçükeşmen ve arkadaşları [38], Grade 2, 4 ve 5 titanyum alaşımları kullanarak, farklı yüzey işlemlerinin titanyum ile kompozit rezin arasındaki bağlantı dayanımına etkilerini araştırmıştır. Çalışmada, yüzeylere sırasıyla 600 numara zımpara kâğıdı, zımparalamayı takiben 50 µm alüminyum oksit tozu ile kumlama ve zımparalamayı takiben tribokimyasal kumlama işlemleri uygulanmıştır. Bulgular hem alüminyum oksit kumlama hem de tribokimyasal kumlama uygulamalarının, kontrol grubundaki zımparalama işlemine göre anlamlı ölçüde daha yüksek bağlantı dayanım değerleri ortaya koyduğunu göstermiştir. Yüzey işlemleri kendi aralarında karşılaştırıldığında ise, alüminyum oksit kumlama ve tribokimyasal kumlama uygulamaları benzer ortalama makaslama dayanım değerleri vermiştir. Malzeme tipi açısından, özellikle alüminyum oksit kumlama uygulamasında Grade 5 titanyum alaşımı, Grade 2 ve Grade 4 saf titanyum gruplarına göre daha yüksek dayanım sergilemiştir.

Rudawska ve arkadaşları [39], kumlama işleminin çelik yüzey özelliklerine ve yapışma üzerine etkilerini inceledikleri çalışmalarında; basınç ve dört tip aşındırıcı malzeme kullanarak yüzey pürüzlülüğü, temas açısı ve yüzey serbest enerjisindeki değişimleri araştırmışlardır. Yazarlar, yüzey özelliklerinin kumlama parametrelerinden ziyade kullanılan aşındırıcı malzemenin tipinden daha fazla etkilendiğini tespit etmişlerdir. Buna ek olarak, aşındırıcı cam küreler kullanıldığında en düşük pürüzlülük değerleri ile en yüksek yüzey serbest enerjisi ve polar bileşen değerleri elde edildiğini rapor etmişlerdir. Çalışma, yüzey pürüzlülüğündeki bir artışın yüzey serbest enerjisinin dağıtıcı bileşenini artırırken, polar bileşenini azalttığını da göstermiştir.

Peñuela-Cruz ve arkadaşları [40], kumlama işleminin magnezyum levhaların yüzey özelliklerine etkilerini araştırdıkları çalışmalarında; kumlama basıncı ve uygulama mesafesini faktör olarak seçmişlerdir. Yazarlar, yüzey pürüzlülüğü ve korozyon akımının, basınç ve mesafe faktörlerinin her ikisinden de etkilendiğini ve bu faktörlerin artırılmasıyla yükseldiğini gözlemlemişlerdir. Öte yandan, sertlik modifikasyonu için yalnızca basıncın anlamlı olduğu ve sertliğin mesafe bağımsız olarak basınç artırılarak iyileştirilebileceği sonucuna varmışlardır. Basıncın, incelenen tüm yüzey özelliklerinin değişiminde anahtar faktör olduğu belirlenmiştir. Mikroyapısal analiz, kumlama işleminin yüzey altında tane incelmeye ve deforme olmuş kristal yapıya neden olduğunu, yüksek basınçlarda ise çatlak ve boşluk gibi kusurların oluştuğunu göstermiştir.

Chintapalli ve ark. [41], kumlama işleminin % 3 mol itriya ile stabilize tetragonal zirkonya üzerindeki mekanik özelliklere etkisini araştırdıkları çalışmalarında; 110 ve 250 µm iki farklı parçacık boyutu, 2, 4 barlık iki basınç ve 30° ve 90° iki çarpma açısı gibi farklı kumlama koşullarını incelemişlerdir. Yazarlar, 90° çarpma açısı için, 110 µm parçacıklarla kumlanmış 3Y-TZP'nin iki eksenli mukavemetinin arttığını, ancak 250 µm parçacıklarla kumlandığında mukavemetin azaldığını tespit etmişlerdir. Parçacık boyutundan bağımsız olarak 30° çarpma açısıyla kumlandığında mukavemetin hafifçe yükseldiğini de rapor etmişlerdir. Ayrıca, 110 µm parçacıklarla kumlama uygulamasının elastik modül ve temas sertliğini etkilemediği, ancak yüzeyde yaklaşık 10 µm derinliğe kadar basınçlı kalıntı gerilmeler oluşturduğu gözlemlenmiştir.

Nishigawa ve arkadaşları [42], dental restorasyonlarda simantasyon öncesi yüzeyde kalan kumlama parçacıklarının uzaklaştırılmasının yapışma dayanımı üzerindeki etkisini inceledikleri çalışmalarında; kumlama parçacığı kalıntılarının rezin siman malzemesi ile yapışma dayanımının, simanın restoratif malzeme ile yapışma dayanımını aşabileceği hipotezini öne sürmüşlerdir. Yazarlar, bu durumda kumlama parçacıklarının yapışkanlığı artırıcı bir mekanizma görevi görebileceğini belirtmişlerdir. Bu nedenle, kumlama ile ön işlem görmüş bağlanma yüzeylerinin ultrasonik temizlenmesinin rezin siman malzemesinin dental restoratif malzemelere yapışma dayanımını etkileyebileceğini öngörmüşlerdir.

Guo ve arkadaşları [43], alümina tozu ile titanyumun kumlanması yüzeyde negatif elektrik yükü oluşturduğu bilgisi üzerine, farklı kumlama malzemelerinin titanyum yüzeyinde negatif yük oluşumuna etkilerini araştırmışlardır. Çalışmanın amacı, bu sonuçları kullanarak kumlama yoluyla yük oluşumunun altında yatan mekanizmayı belirlemektir. Bulgulara göre, yalnızca 45–75 μm cam küreler ile kumlama, titanyum yüzeyinde pozitif yük oluşumuna yol açarken; diğer tüm kumlama malzemelerinin kullanımı negatif yük oluşumuna neden olmuştur. Aynı toz malzemeye ait ancak farklı boyutlardaki kumlama tanelerinin, oluşan yükün miktarı ve polaritesinde farklılıklara yol açabileceği bulunmuştur. Bu sonuçlar, kumlama yoluyla yük oluşumunun ana mekanizmasının triboelektrik etki olması muhtemel olduğunu göstermektedir.

Beata Śmielak ve arkadaşları [44], aşındırıcı kumlama işleminin koşullandırılmış malzemeye aşındırıcı parçacıkların gömülmesi olgusuna eşlik edip etmediğini araştırmışlardır. Çalışmada, krom/kobalt, krom/nikel ve titanyum metal alaşımları ile sinterlenmiş zirkonyum dioksit olmak üzere dört tip malzeme, 0.2, 0.4, 0.6 MPa farklı basınçlarda ve 50, 110, 250 μm tane boyutlarında alüminyum oksit kullanılarak kumlanmıştır. Kantitatif metalografi sonuçları, en düşük gömülü aşındırıcı miktarının 2.62 μm zirkonyum dioksit malzemesinde, en yüksek miktarın ise 38.19 μm titanyum alaşımında meydana geldiğini göstermiştir. Bulgular, aşındırıcının tane boyutundaki ve basınçtaki artışın, gömülü tane miktarında sistematik bir artışa neden olduğunu ve gömülen aşındırıcı miktarının işlenen malzemenin sertliğine bağlı olduğunu ortaya koymuştur. Sonuç olarak, aşındırıcı kumlama sonrasında malzemelerin yüzeyinde aşındırıcı parçacıklar bulunmuştur.

Albakry ve arkadaşları [45], preslenebilir seramik malzemeler olan IPS Empress ve Empress 2'ye uygulanan taşlama, cilalama ve kumlama gibi işlemlerin ortalama eğilme mukavemetine etkilerini araştırmışlardır. Cilalanmış gruplar, her iki materyalde de anlamlı ölçüde en yüksek ortalama eğilme mukavemeti değerlerini sergilemiştir. Buna karşın, işlenmemiş, kumlanmış ve taşlanmış grupların ortalama mukavemet değerleri arasında anlamlı bir fark bulunmamıştır. Yüzey pürüzlülüğü açısından ise işlenmemiş ve kumlanmış gruplar en yüksek değerleri verirken, cilalanmış gruplar en düşük pürüzlülüğü göstermiştir. Weibull modülü, cilalanmış ve işlenmemiş gruplar için daha yüksek, taşlanmış ve kumlanmış gruplar için ise daha düşük çıkmıştır. Isıl işlemin mukavemet üzerinde bir etkisi olmamıştır. Çalışma, yüzey pürüzlülüğünün tek başına mukavemeti belirleyen özellik olmayabileceğini; porozite, mikroyapısal kalıntı gerilmeler ve yüzey/hacim kusurları gibi diğer faktörlerin de etkili olduğunu belirtmiştir.

Ding ve arkadaşları [46], kumlama işlemine tabi tutulmuş çeliğin beton ortamındaki pasivasyon ve korozyon performansını araştırmayı amaçlamıştır. Çalışmada, çelik numunelerin yüzeyleri 5, 10 ve 15 dakika olmak üzere üç farklı süre boyunca kumlanmış ve klorür içeren simüle edilmiş beton gözenek çözeltisine maruz bırakılmıştır. Elektrokimyasal testler, kumlanmış numunelerin korozyon direncinde önemli bir iyileşme olduğunu göstermiştir ve bu iyileşme kumlama süresindeki artışla orantılıydı. 15 dakika kumlanmış olanlar hariç, klorür iyonlarının varlığı pasif tabakanın incelmeye ve korozyona neden olmuştur. Mikroskobik analiz, kumlanmış numunelerin yüzeyinde yoğun, kalsiyum bakımından zengin kristal bir yapının oluştuğunu göstermiştir. Bu tabakanın yoğunluğu ve tekdüzeliği, kumlama süresinin artırılmasıyla artmıştır. Araştırmacılar, korozyon direncindeki iyileşmenin hem gelişmiş pasif tabaka oluşumu hem de bu kalsiyum bakımından zengin yoğun kristal yapının oluşumuyla ilişkili olduğunu hipotez olarak ileri sürmüşlerdir.

Finger ve ark. [47], dental uygulamalarda veneer seramiğin zirkonya alt yapılara yapışması için önemli olan yüzey pürüzlülüğüne ve kalıntı gerilmeye kumlama işleminin etkilerini araştırmışlardır. İyi tanımlanmış ve yüksek tekrarlanabilirlik sağlamak amacıyla özel yapım otomatik bir kumlama makinesi kullanılarak, 3Y-TZP numuneleri 45, 60, 90° kumlama açısı, 2, 4, 6 bar kumlama basıncı ve 0.5, 1, 1.5 cm çalışma mesafesi gibi değişen parametrelerle işlenmiştir. Bulgular, yüzey pürüzlülüğündeki en büyük değişimlere kumlama basıncındaki değişikliklerin neden olduğunu ve en yüksek yüzey pürüzlülüğü değerlerinin numune yüzeyine dik yapılan kumlamalarla elde edildiğini göstermiştir. Ayrıca, ortalama yüzey pürüzlülüğü ile kalıntı gerilme arasında bir korelasyon bulunmuştur.

Iqbal ve arkadaşları [48], tıbbi implantlar için kullanılan AISI 316L paslanmaz çeliğe uygulanan kumlama işleminin mekanik özelliklere etkisini araştırmışlardır. Çalışmada farklı kumlama süresi kullanılarak yüzey kalitesindeki değişimler incelenmiştir. Sonuçlar, kumlama süresi uzadıkça yüzey pürüzlülüğünün arttığını ve bu işlemin pürüzlülüğü 0.67 μm 'den 1.46 μm 'ye yükselterek çelik yüzeyinde bir değişime neden olduğunu göstermiştir.

Bahcepinar ve ark. [49], 316L paslanmaz çelik implant malzemesinin yüzeyleri, cam bilyelerle kumlama işlemine tabi tutulduktan sonra, elektroforetik biriktirme yöntemiyle hidroksiapatit kaplama sürecine alınmıştır. Kaplamaların mekanik ve metalografik özellikleri, kumlama ile işlem görmüş yüzeyler ve 320 kum Silisyum Karbür zımpara ile zımparalanmış yüzeyler karşılaştırılarak incelenmiştir. Yapılan testler sonucunda, kumlanmış yüzeylerin, zımparalanmış yüzeylere kıyasla HA kaplamaları için daha iyi sonuçlar verdiği ortaya konmuştur.

Kaynakça

- [1] Draganovská, D., Ižaríková, G., Guzanová, A., & Brezinová, J. (2018). General regression model for predicting surface topography after abrasive blasting. *Metals*, 8(11), 938.
- [2] Smil, V. (2005). *Creating the twentieth century: Technical innovations of 1867-1914 and their lasting impact*. Oxford University Press.
- [3] Kumar, P. (2024). Design and operation of abrasive jet machining of polydimethylsiloxane or silicone elastomer with abrasive particles of aluminum oxide. *Journal of Mechanical Engineering Advancements*, 1(1), 24-32.
- [4] Achtsnick, M., Geelhoed, P. F., Hoogstrate, A. M., & Karpuschewski, B. (2005). Modelling and evaluation of the micro abrasive blasting process. *Wear*, 259(1-6), 84-94.
- [5] Ke, J. H., Tsai, F. C., Hung, J. C., & Yan, B. H. (2012). Characteristics study of flexible magnetic abrasive in abrasive jet machining. *Procedia CIRP*, 1, 679-680.
- [6] Li, H. Z., Wang, J., & Fan, J. M. (2009). Analysis and modelling of particle velocities in micro-abrasive air jet. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(11), 850-858.
- [7] Shoup, W. L. (2009). SSPC: The Society for Protective Coatings Annual Report (January 1, 2008 to December 31, 2008). *Journal of Protective Coatings & Linings*, 61.
- [8] Zulkarnain, I., Mohamad Kassim, N. A., Syakir, M. I., Abdul Rahman, A., Md Yusuff, M. S., Mohd Yusop, R., & Keat, N. O. (2021). Sustainability-based characteristics of abrasives in blasting industry. *Sustainability*, 13(15), 8130.
- [9] Mundt, K. A., Birk, T., Parsons, W., Borsch-Galetke, E., Siegmund, K., Heavner, K., & Guldner, K. (2011). Respirable crystalline silica exposure–response evaluation of silicosis morbidity and lung cancer mortality in the German porcelain industry cohort. *Journal of occupational and environmental medicine*, 53(3), 282-289.
- [10] Linch, K. D. (2002). Respirable concrete dust--silicosis hazard in the construction industry. *Applied occupational and environmental hygiene*, 17(3), 209-221.
- [11] Kosmač, T., Oblak, C., Jevnikar, P., Funduk, N., & Marion, L. (1999). The effect of surface grinding and sandblasting on flexural strength and reliability of Y-TZP zirconia ceramic. *Dental materials*, 15(6), 426-433.
- [12] Mundt, K. A., Birk, T., Parsons, W., Borsch-Galetke, E., Siegmund, K., Heavner, K., & Guldner, K. (2011). Respirable crystalline silica exposure–response evaluation of silicosis morbidity and lung cancer mortality in the German porcelain industry cohort. *Journal of occupational and environmental medicine*, 53(3), 282-289.
- [13] Radnoff, D. L., & Kutz, M. K. (2014). Exposure to crystalline silica in abrasive blasting operations where silica and non-silica abrasives are used. *Annals of occupational hygiene*, 58(1), 19-27.

- [14] Flynn, M. R., & Susi, P. (2004). A review of engineering control technology for exposures generated during abrasive blasting operations. *Journal of occupational and environmental hygiene*, 1(10), 680-687.
- [15] Mohammadyan, M., Rokni, M., & Yosefinejad, R. (2013). Occupational exposure to respirable crystalline silica in the Iranian Mazandaran province industry workers. *Arhiv za higijenu rada i toksikologiju*, 64(1), 139-142.
- [16] Tiwari, R. R., & Sharma, Y. K. (2008). Respiratory health of female stone grinders with free silica dust exposure in Gujarat, India. *International journal of occupational and environmental health*, 14(4), 280-282.
- [17] Si, S., Carey, R. N., Reid, A., Driscoll, T., Glass, D. C., Peters, S., ... & Fritschi, L. (2016). The Australian Work Exposures Study: prevalence of occupational exposure to respirable crystalline silica. *Annals of Occupational Hygiene*, 60(5), 631-637.
- [18] IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. (2012). Silica dust, crystalline, in the form of quartz or cristobalite. In *Arsenic, Metals, Fibres and Dusts*. International Agency for Research on Cancer.
- [19] Elo, S., & Kyngäs, H. (2008). The qualitative content analysis process. *Journal of advanced nursing*, 62(1), 107-115.
- [20] Veloz, N. F. (1987). Successful use of soft abrasives (walnut shells) for cleaning outdoor bronze sculpture by air jets.
- [21] MCfinishing. Blasting Technical Information. US. 2006. Available online: <https://mcfinishing.com/> (accessed on 19 May 2021).
- [22] Carlson, J. R. J., & Townsend, T. G. (1998). Management of solid waste from abrasive blasting. *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*, 2(2), 72-77.
- [23] Radnoff, D. L., & Kutz, M. K. (2014). Exposure to crystalline silica in abrasive blasting operations where silica and non-silica abrasives are used. *Annals of occupational hygiene*, 58(1), 19-27.
- [24] Drinkwater, D., Napier-Munn, T. J., & Ballantyne, G. (2012, January). Energy reduction through eco-efficient comminution strategies. In *26th International Mineral Processing Congress, IMPC 2012: Innovative Processing for Sustainable Growth-Conference Proceedings* (pp. 1223-1229). Technowrites.
- [25] Kura, B., Kambham, K., Sangameswaran, S., & Potana, S. (2006). Atmospheric particulate emissions from dry abrasive blasting using coal slag. *Journal of the air & waste management association*, 56(8), 1205-1215.
- [26] Rothstein, H. R., & Hopewell, S. (2009). Grey literature. *The handbook of research synthesis and meta-analysis*, 2, 103-125.

- [27] Stachowiak, G. B., & Stachowiak, G. W. (2001). The effects of particle characteristics on three-body abrasive wear. *Wear*, 249(3-4), 201-207.
- [28] Hamblin, M. G., & Stachowiak, G. W. (1995). A multi-scale measure of particle abrasivity. *Wear*, 185(1-2), 225-233.
- [29] Hansel, D. (2000). Abrasive blasting systems. *Metal Finishing*, 98(7), 23-37.
- [30] Satıcı, M. E. (2004). Kumlama işleminin ve bu işleme etkiyen parametrelerin incelenmesi.
- [31] Hangzhou color powder coating equipment co.,ltd, erişim: 14 Aralık 2025, http://powdercoater-de.com/upload/2274/download/5/pdf/12-2-dry-sandblasting-machine_03.pdf
- [32] Akkaş, A. (2019). Askılı kumlama makinesinin plc ile kontrolü ve kumlama işlemi için gereken işlemlerin optimizasyonunun gerçekleştirilmesi.
- [33] Uzun, M. (2013). Türbinli kumlama tezgâhında işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin deneysel olarak incelenmesi (Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük).
- [34] Uzun, M., Gökkaya, H., & Metlioglu, M. R. (2014). St37 çelik levhanın türbinli kumlama tezgâhında kumlanması esnasında işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin deneysel olarak incelenmesi. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 4(1), 58-62.
- [35] Baş, M., Ertan, R., & Yavuz, N. (2011). Yüzey işleme yöntemlerinin soğuk iş takım çeliğinin yorulma davranışına etkisinin incelenmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 16(1).
- [36] Akcan, E., Mehmetlioğlu, C., Özüyağlı, A., & Akıncı, A. (2016). Alüminyum alaşımında anodizasyonun arayüzey özelliklerine etkisinin incelenmesi. *Sakarya University Journal of Science (SAUJS)/Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 20(3).
- [37] Bulutsuz, A. G. (2020). Ha/B-TCP Kumlama ve Anodizasyon İşlemlerinin Yüzey Kontak Açısına ve Topografyasına Etkilerinin İncelenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8(1), 1072-1083.
- [38] Küçükeşmen, H. C., & Önel, A. (2018). Farklı tiplerdeki titanyum altyapı materyali ile kompozit materyalinin bağlantı dayanıklılığının incelenmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Sağlık Bilimleri Dergisi*, 9(2), 79-84.
- [39] Rudawska, A., Danczak, I., Müller, M., & Valasek, P. (2016). The effect of sandblasting on surface properties for adhesion. *International journal of adhesion and adhesives*, 70, 176-190.
- [40] Peñuela-Cruz, C. E., Márquez-Herrera, A., Aguilera-Gómez, E., Saldaña-Robles, A., Mis-Fernández, R., Peña, J. L., ... & Hernández-Rodríguez, E. (2023). The effects of

- sandblasting on the surface properties of magnesium sheets: A statistical study. *Journal of Materials Research and Technology*, 23, 1321-1331.
- [41] Chintapalli, R. K., Rodriguez, A. M., Marro, F. G., & Anglada, M. (2014). Effect of sandblasting and residual stress on strength of zirconia for restorative dentistry applications. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 29, 126-137.
- [42] Nishigawa, G., Maruo, Y., Irie, M., Maeda, N., Yoshihara, K., Nagaoka, N., ... & Minagi, S. (2016). Various effects of sandblasting of dental restorative materials. *PloS one*, 11(1), e0147077.
- [43] Guo, C. Y., Tang, A. T. H., Tsoi, J. K. H., & Matinlinna, J. P. (2014). Effects of different blasting materials on charge generation and decay on titanium surface after sandblasting. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 32, 145-154.
- [44] Śmielak, B., Klimek, L., & Krześniak, K. (2023). Effect of sandblasting parameters and the type and hardness of the material on the number of embedded Al₂O₃ grains. *Materials*, 16(13), 4783.
- [45] Albakry, M., Guazzato, M., & Swain, M. V. (2004). Effect of sandblasting, grinding, polishing and glazing on the flexural strength of two pressable all-ceramic dental materials. *Journal of dentistry*, 32(2), 91-99.
- [46] Ding, L., & Poursaei, A. (2017). The impact of sandblasting as a surface modification method on the corrosion behavior of steels in simulated concrete pore solution. *Construction and Building Materials*, 157, 591-599.
- [47] Finger, C., Stiesch, M., Eisenburger, M., Breidenstein, B., Busemann, S., & Greuling, A. (2020). Effect of sandblasting on the surface roughness and residual stress of 3Y-TZP (zirconia). *SN Applied Sciences*, 2(10), 1700.
- [48] Iqbal, M., Prasetya, D., Mahardika, M., Suyitno, S., Arifvianto, B., Prihandana, G. S., & Dewo, P. (2011, November). The effect of sandblasting on AISI 316L stainless steels. In *Prosiding Industrial Research Workshop and National Seminar* (Vol. 2, pp. 58-61).
- [49] BAHÇEPİNAR, A., & Aydın, I. (2022). Investigation of the Effect of Shot Blasting on the Surface Properties of the HA Coatings Processed by the EPD Method. *Kovove Materialy*, 60(5).

BÖLÜM 8

EĞİTİM KURUMLARINDA TERMAL KONFOR VE İÇ HAVA KALİTESİNİN SAĞLIK VE AKADEMİK PERFORMANS AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

Hande UFAT¹

¹ Öğr.Gör.Dr., Bursa Uludağ Üniversitesi, ORCID: 0000-0001-8350-245X

1. Giriş

Kötü iç hava kalitesi (IAQ), kapalı alanlarda bulunan insanlar için olumsuz sağlık etkileri, iş veya okulda devamsızlığın artması ve bilişsel performansın düşmesi gibi sorunların nedeni olarak kabul edilmektedir. Yaygın görülen belirtiler baş ağrısı, göz veya burun tahrişi, deri döküntüsü veya kaşıntı, halsizlik veya konsantrasyon güçlüğü gibi spesifik olmayan semptomlarla kendini gösterir. Bu tür semptomlar genellikle belirli bir nedene bağlı değildir ve belirli bir ortamda bu semptomlar yaşanıyorsa bu ortamların olduğu binalarda “hasta bina sendromu” olduğu söylenir. Bu duruma neden olan iç mekan kirleticileri arasında partikül madde (PM), aldehytler (özellikle formaldehit) dahil olmak üzere uçucu organik bileşikler (VOC) ve azot dioksit (NO₂) ve ozon gibi oksidatif gazlar bulunabilir. Bu kirleticiler ofis ekipmanlarından, temizlik ve dezenfeksiyon malzemeleri veya diğer tüketici ürünleri tarafından salınabilir veya yapı malzemeleri, boyalar ve mobilyalardan gaz olarak açığa çıkabilir. Kirleticiler ayrıca dış ortamdan iç ortama da girebilir. Örneğin, karbon monoksit (CO), azot oksitler (NO_x) ve partikül madde gibi araç egzoz bileşenleri, binadaki açıklıklardan veya sızıntı yoluyla, ısıtma, soğutma ve havalandırma (HVAC) sistemi tarafından çekilen hava yoluyla içeri girebilir. Bunlara ek olarak ortamda bulunan insanların kendileri de birer kirletici kaynağıdır. Çalışmalarda CO₂'nin insan sağlığı için çok zararlı olmadığı belirtilmekle birlikte konsantrasyon ve algılamayı etkilediği belirtilmektedir (J.Allen ve diğerleri 2016).

İnsanların çoğu iç hava kalitesinin önemi ve etkileri konusunda bilgi sahibi olmakla birlikte bulundukları ortam havasının dış havadan daha kalitesiz olduğunun farkında değildir. Günümüzde zamanımızın %80-90'ını sınıf, ofis, ev v.b. kapalı ortamlarda geçirmekteyiz. Özellikle COVID-19 salgını sonrası evden çalışma sistemi oldukça yaygın hale gelmiştir. Ayrıca pandemide bakteri ve virüslerden korunmak için ortamın havalandırmasının ve iç hava kalitesinin yükseltilmesinin önemi anlaşılmıştır. Ancak sonrasında havalandırma bu süreçteki önemini yitirmiştir.

Sınıflarda, öğrenciler birbirleriyle daha yakın temastır ve bu sebeple iç hava kalitesini korumak oldukça önemlidir. Özellikle küçük ve genç yaş grubunun biyolojik olarak daha kırılgan olduğunu göz önüne alırsak, bulundukları ortamdaki hava kirliliği öğrencilerin fizyolojik ve psikolojik gelişimleri üzerinde olumsuz etkisi olacaktır. İyi bir iç hava kalitesi ve termal konfor aynı zamanda kişinin üretkenliği, konsantrasyon gücü, performansı ve refahındaki artışla da bağlantılıdır [T.G. Theodosiou 2008, Zufeng Pei ve diğerleri, 2015, Krystallia ve diğerleri, 2016]. Sınıflarda çoğunlukla havalandırmayı sağlamak için pencereler açılır, ancak kış aylarında bu da ihmal edilir. Sıcak havalarda ise eğer sınıfta klima varsa, pencereler kapatılarak klima açılması tercih edilir. Dış havanın kirli olduğu yerlerde pencere açmak kirleticilere maruz bırakabilirken, klima kullanımı da içeride karbondioksit (CO₂) artışına sebep olmaktadır (Chen ve diğerleri, 2022). Klima tercih edildiğinde de içerideki serinliği korumak amacıyla yine havalandırma ihmal edilmekte, sıcaklık olarak uygun iç hava kalitesi kötü bir ortama sebebiyet verilmiş olur. Birçok çalışma CO₂ oranının 1500 ppm, bazı yerlerde 4500 ppm'in üzerine çıktığını göstermiştir. (Awbi, 2003; Griffiths and Eftekhari, 2008; Mumovic ve diğerleri, 2009; Greene et al., 2012).

Bu tür konsantrasyon değerleri, Dünya Sağlık Örgütü (WHO, 2000) ve Amerikan Isıtma, Soğutma ve İklimlendirme Mühendisleri Derneği (ASHRAE, 2020; Tucker, 1992) standartlarının oldukça üzerindedir. Aerosollerin sağlık üzerindeki etkisi partikül büyüklüğüne göre değişir; kirleticiler solunum veya kardiyovasküler hastalıklara sebep olabilir ve hatta ölümle sonuçlanabilir (Fann ve diğerleri, 2012; Wu ve diğerleri, 2020). Yüksek CO₂ konsantrasyonu solunum zorluğuna sebep olur, baş ağrısı, uyuşukluk, reflekslerde azalma ve yorgunluk gibi problemlere neden olabilir.

Sınıflarda aşırı yüksek CO₂ konsantrasyonu, algıyı ve buna bağlı olarak öğrenmeyi olumsuz etkiler. (Seppänen ve diğerleri, 1999; Griffiths ve Eftekhari, 2008; Shriram ve diğerleri, 2019;

Bogdanovica ve diğerleri, 2020). Bak'o-Bir'o (2012), ilkokullarda bulunan sınıflarındaki yetersiz havalandırmanın öğrenci odağını ve uyanıklığını önemli ölçüde azalttığını, öğretim ile öğrenmeyi, hafıza ve dikkati olumsuz yönde etkilediğini bildirmiştir.

Yapılan çalışmalarda elde edilen veriler, eğitim binalarında standartlarda verilen termal konfor aralıklarının dar bir çerçevede olduğunu ortaya koymuştur. ASHRAE'nin yürüttüğü projede özellikle konfor sıcaklığı için, doğal havalandırmada kullanılan Fanger Metodunda belirtilen aralıktan 2 kat daha büyük bir aralık elde edilmiştir (Fabozzi ve Dama, 2020). Başka bir çalışmada 19-30°C öğrencilerin memnuniyetleri ölçülmüş ve başlangıçta artış gösterirken sonrasında düşmüştür. Optimum bölge 23-27°C arasında belirlenmiştir (Yang ve Mak, 2020). Her ne kadar kabul edilmiş genel standartlar olsa da eğitim kurumlarında bulunan yaş aralıkları, fizyolojik durumları ve algı seviyeleri çok farklıdır. Ayrıca bulunulan coğrafi konum ve mevsim şartları da iç hava ka Bu sebeplerden dolayı standartlarla birlikte dünya çapında yapılan farklı deneysel çalışmaları değerlendirmek faydalı olacaktır.

2. Sınıf Ortamlarında İç Hava Kalitesini Etkileyen Faktörler ve Akademik Performansa Etkileri

2.1. İç Mekân Kirletici Kaynakları

ASTM Standart Kılavuzu'nda (ASTM D6245) yazdığı şekilde araştırmalar, insan kaynaklı CO₂'nin arka plan seviyelerinin yaklaşık 650 ppm üzerinde tutulması durumunda, bir alandaki vücut kokularının çoğu kişi için rahatsız edici olmayacağını göstermiştir. Burada rahatsız edici olan CO₂ değil, solunan havadaki VOC'ler ve diğer gaz halindeki bileşiklerdir. CO₂, kolayca ölçülebilmesi ve konsantrasyonunun rahatsız edici türlerin konsantrasyonu ile ilişkili olması nedeniyle bir gösterge olarak kullanılmaktadır. İç mekanlarda CO₂'nin insan kaynaklı kirleticileri kontrol etmek için standartlarda 1000 ppm'nin altında tutulması gerektiği, kentsel havadaki normal arka plan CO₂ konsantrasyonuna (yaklaşık 300-350 ppm) 650 ppm değerinin eklenmesiyle ortaya çıkmıştır (ASTM D6245). Bu nedenle CO₂, endişe verici bir kirletici olarak değil, diğer insan kaynaklı kirleticilerin, özellikle koku yapan bileşiklerin ne kadar iyi kontrol edildiğinin bir göstergesi olarak görülmüştür. Ancak, son zamanlarda yapılan kontrollü çalışmalar, CO₂'nin tek başına 1000 ppm gibi düşük konsantrasyonlarda yetişkinlerin karar verme performansında orta derecede azalmaya, 2500 ppm'nin üzerinde çok daha fazla düşüşe neden olabileceğini göstermiştir (Johnson ve diğerleri, 2018). Başka bir çalışmada da CO₂ arttıkça memnuniyetsizliğin arttığı ve kabul edilebilir üst limitin 654 ppm olduğu tespit edilmiştir ve standartların çok altında bir değer olduğu vurgulanmaktadır. Yani standartlara göre düşük olarak kabul edilebilecek bir CO₂ değerinin okullarda performansı önemli derecede etkilemektedir (Yang ve Mak, 2020).

Yüksek CO₂ ve VOC konsantrasyonunun algıda düşüşe neden olmasının yanında okulda devamsızlık oranını arttırdığı bazı çalışmalarda kanıtlanmıştır. Dış ortamdaki polenlerde meydana gelen %10'luk bir artışın, alerjisi olan kişilerde %10'luk performans kaybına sebep olduğu bildirilmektedir.

Hava kirleticileri arasında, partikül madde (PM) IAQ üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Aslında, solunum yoluyla maruz kalma, insan sağlığı için PM tehlikesinin önemli bir kaynağıdır. Konsantrasyonlar, maruz kalma süresi, partiküllerin boyutu ve bileşimi sağlık riskinin düzeyini belirler (Stabile ve diğerleri, 2017).

Yapılan çalışmalarda PM₁₀ ve PM_{2,5} partikül seviyelerinin artmasının öğrenciler arasında astım gibi akut ve kronik sağlık sorunlarının yaygınlığını artırabileceği gösterilmiştir (Daisey ve diğerleri, 2003; Mendell ve Heath, 2005). Sınıf içindeki havadaki kirleticiler, havalandırma ve sızma yoluyla içeri giren dış havadaki kirleticilerle büyük ölçüde aynıdır. İç mekan

kaynaklarının bulunmadığı durumlarda, kimyasal kirleticilerin iç mekan konsantrasyonları, özellikle doğal havalandırılmalı binalarda, bulunduğu dış ortama benzer özellikler gösterebilir. Ancak diğer kirleticiler (VOC'ler, formaldehit vb.) mobilyalar ve boyalardan olduğu gibi iç mekanlardan kaynaklanabilir. Havalandırmanın artması, dış mekan kirleticilerinin içeri girmesini kolaylaştırır ve bu nedenle iç mekan kaynaklı kirleticilerin giderilmesi ve seyreltilmesi yerine, dış mekandan gelen kirleticilerle hava kalitesi daha fazla bozulabilir. Bu sebeple dış mekandan alınan havanın da iyi bir şekilde filtrelenmesi gerekir. Sigara içme, ısıtma ve yemek pişirme (kafeterya bulunmadığında) gibi tipik iç mekan PM kaynakları normalde okullarda bulunmaz. Sınıflarda tebeşir kullanımı önemli bir kaynak olabilir (Dorizas ve diğerleri, 2015).

2.2. Termal Konfor Parametreleri

Sıcaklık ve Bağıl Nem

İç mekan termal ortamının kalitesi öğrencilerin sağlığı ve performansı için çok önemlidir ve sınıf, öğretim ve öğrenmeyi teşvik edecek uygun bir ortam sağlamalıdır (Mendell ve diğerleri, 2005). Sıcaklık ve bağıl nem değerleri termal konfor parametreleri içerisinde en önemlileridir ve ortamdaki kişilerin sağlık durumu ile performansını önemli ölçüde etkiler. Termal konfor parametreleri ile ilgili ISO 7730, EN 15251 ve ASHRAE 55 gibi kabul edilen standartlar olmakla birlikte yapılan çalışmalarda eğitim binalarında çok fazla memnuniyetsizlik tespit edilmiştir. Öğrencilerin termal konforları standartlardaki hükümlerde çok fazla yansıtılmamaktadır (de Dear ve Diğerleri, 2015). Dünya Sağlık Örgütü, iç mekan sıcaklığının en az 18°C, yaşlılar ve küçük çocuklar için ise 20–21°C olmasını önermektedir (WHO, 1987; WHO 2009)). Bir araştırma, konfor aralığı içindeki sıcaklığın her 1°C artışı ile verimlilikte %4,1'lik bir düşüş olduğunu ortaya koymuştur. Daha yüksek bağıl nem seviyelerinde ise devamsızlık düşmüştür. Bağıl nemdeki her yüzde bir artışla devamsızlık oranları %3-9 oranında azalmıştır. Ancak burada bağıl nemde belirtilen artış %22 seviyelerinden %35'e gelmesidir. Yani düşük bağıl nem değerinden kaynaklı problemlerin giderilmesi ile meydana gelen bir değişim görülmektedir (Green, 1974). ASHRAE standartlarına göre termal konfor şartları 21-26°C sıcaklık ve %30-60 arası bağıl nem olarak önerilir.

İngiltere'nin Hampshire bölgesinde doğal havalandırılmalı sınıflarda yapılan termal konfor anketleri ve iç ortam değişkenlerinin ölçümlerinden elde edilen bulgular ise, çocukların yetişkinlere göre yüksek sıcaklıklara daha duyarlı olduğunu ve konfor sıcaklıklarının sırasıyla PMV ve EN 15251 adaptif konfor modeli tahminlerinden yaklaşık 4°C ve 2°C daha düşük olduğunu göstermektedir (Teli ve diğerleri, 2012). Candido ve diğerleri Brezilyada yaptıkları çalışmada bir okul binasında alınan ölçümler sonucu en düşük hava hızını 0.4 m/s ve 26°C hava sıcaklığında isterken, en yüksek ise 30°C'de 0.9 m/s istemişlerdir ki bu hız değeri ASHRAE'nin belirlediği maksimum hız değeri olan 0.8 m/s'de daha yüksektir. Memon ve diğerleri Pakistan'da bir üniversitede yaptıkları çalışmada katılımcıların çoğu 30°C'ye yakın sıcaklıklarda kendilerini konforlu hissettiklerini bildirmişlerdir. Bu değer ASHRAE standartlarının 4°C üzerindedir (Candido ve diğerleri, 2010). Bunlarla birlikte solunum yolu enfeksiyonunu sınırlamak için iç ortam sıcaklık eşliğinin 16°C olduğu da bilinmektedir (Su ve diğerleri, 2022). Bu çalışmalara bakıldığında eğitim binalarının bulunduğu coğrafya ve yaş grubuna bağlı olarak standartlardan farklı olduğu görülmektedir. Benzer iklim şartlarındaki coğrafyalarda ve yaş gruplarında yapılan deneysel çalışmalara bakılarak kendi ülkemize uygun, eğitim binaları için termal konfor parametreleri belirlenebilir.

3. İç Hava Kalitesini Etkileyen Kirleticiler Ve Kirletici Kaynakları

İç hava kalitesine etkileyen kirleticiler iç, dış ve biyolojik kaynaklı kirleticiler olarak sınıflandırılır. İç kaynaklı kirleticiler bina içindeki ve bina yapı malzemelerden kaynaklı oluşan kirleticilerdir. Dış kaynaklı olanlar ise bina dışındaki ortam ve atmosfer kaynaklı olarak değerlendirilir. Biyolojik olanlar ise bakteri, virüs ve mantar gibi canlı kirleticilerdir.

3.1 Yanma Kaynaklı Kirleticiler

Sınıf içinde bulunan ısıtıcılar, bacası yanlış kurulan sistemler, okul mutfaklarındaki gazlı ısıtıcılar, okul binasının otoyol gibi yoğun trafiğin veya sanayi bölgesi gibi yerlere yere yakın olması gibi sebeplerden dolayı yanma kaynaklı kirleticiler bina içi hava kalitesini etkilemektedir. Özellikle doğal havalandırma için pencerelerin açıldığı zaman dış kaynaklı olan kirleticiler iç havayı olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Özellikle azot oksit (NO_2) ve karbonmonoksit (CO) bu kirleticiler içinde en etkilileridir.

NO_2 astım atağı tetiklenmesi (NSAF), derslere devamsızlık artışı üst solunum yolu irritasyonuna ve akciğer fonksiyonu bozukluklarına yok açabilir. Dünya Sağlık Örgütü NO_2 değerinin 40-60 $80\mu\text{g}/\text{m}^3$ aralığında kalması gerektiğini söylemektedir. Özellikle $80\mu\text{g}/\text{m}^3$ üzerinde değerleri ile öğrenci devamsızlığı arasında kuvvetli bir ilişki bulunmuştur. 23 Avrupa ülkesinden toplanan verilerde NO_2 düzeylerinin yüksek olduğu şehirlerde çocuklarda solunum semptomlarının artış gösterdiği raporlamıştır (Pilotto ve diğerleri, 2004; Mendell ve Heath, 2005; European Commission, 2014).

CO ise okullarda düşük seviyelerde görülmektedir. Gazlı cihazların yanlış kullanımı sonucu tehlikeli bir kirletici olmaktadır. Yapılan bir çalışmada 60 ppm'lik yüksek CO değerinin temizlik makineleri kaynaklı olduğu görülmüştür (Johnson ve diğerleri 2018).

3.2 Uçucu Organik Bileşikler (VOC ve Aldehitler)

Bu kirleticilerin kaynakları çoğunlukla kullanılan kimyasal malzemeler ve bina yapı kaynaklarıdır. Yeni mobilyalar, boya ve vernikler, temizlik malzemeleri, fotokopi makinesi ve bilgisayarlar, kişisel bakım ürünleri, markör kalemler ve yapıştırıcılar, halı kaplamalar ve izolasyon malzemeleri bu kirleticiler arasında sayılabilir. Göz, burun ve boğaz irritasyonu, baş ağrısı, yorgunluk ve dikkat eksikliği gibi problemlere sebep olurken, uzun süreli maruziyetlerde kanser gibi tehlikeli hastalıklar bile görülebilmektedir. Sınıflarda uçucu organik bileşik (VOC) seviyelerinin 200-500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ aralığında olduğu ve temizlik sonrası bu değerin yükseldiği görülmektedir. Markör kalem kullanılan sınıflarda da benzer şekilde VOC artışı gözlenmiştir ve VOC maruziyetinin bilişel faaliyetleri olumsuz yönde etkilediği bilinmektedir (Daisey ve diğerleri 2003; Brown ve diğerleri, 2014).

3.3 Partikül Madde Miktarları

Partikül maddeler de iç hava kalitesini önemli derecede etkileyen parametrelerdendir. Tamamen ortadan kaldırmak mümkün olmamakla birlikte sağlık açısından müsaade edilen değerler standartlarda belirtilmektedir. Yaşadığımız ortamlarda özellikle $\text{PM}_{2.5}$ ve PM_{10} boyutundaki partiküllerin miktarı sağlık açısından önemlidir. Dünya Sağlık Örgütü $\text{PM}_{2.5}$ partikül oranının 10-15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{10} partiküllerinin ise 30-50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ aralığında olması gerektiğini söylemektedir.

Toz miktarı; öğrencilerin hareketi, tebeşir tozu, halı kaplamalar, yetersiz temizlik ve dış ortam partiküllerinden kaynakları olarak artış gösterir. Partikül madde miktarının yüksek olduğu sınıflarda astım belirtilerinde artış görülmüştür (Schibuola ve Tambani, 2020). Bu sebeple

özellikle temizlik ve uygun havalandırma yöntemleri ile bu kirleticiler kontrol altında tutulmalıdır.

3.4 Biyolojik Kirleticiler

Biyolojik kirletici olarak bilinen küf ve mantarlar genelde nemli ortamlarda sıklıkla görülürler. Su basması, çatı akıntıları, ortamda yetersiz nem kontrolü yani ortamda bağıl nemin yüksek değerlerde olması, halıfleks zeminler, klima ve merkezi iklimlendirme sistemlerinin bakımlarının yapılmaması biyolojik kirletici artışına sebep olur. Astım riski nem oranı yüksek olan okullarda yüksek seviyelerde görülmüş ve aynı zamanda öğrencilerde öksürük problemleri ile mantar sporları arasında güçlü bir bağlantı görülmüştür (IOM, 2004).

3.5 Karbondioksit (CO₂) Miktarı

Karbondioksit aslında bir kirletici değil yetersiz havalandırma göstergesi olarak kabul edilir. Solunumdan kaynaklı ortaya çıkan CO₂ ve yetersiz havalandırmadan dolayı ortamdaki değer yükselir. Özellikle eğitim kurumlarında öğrenci sayısının yüksek olmasından kaynaklı gerekli taze hava sağlanmadığında ortamda memnuniyetsizliğe sebep olan bir ortam oluşur. CO₂ oranı arttığında konsantrasyon ve algı düşer. Taze hava sağlandığında bilişsel performansın arttığını gösteren bilimsel kanıtlar mevcuttur (Bakó-Biró ve diğerleri, 2012). ASHRAE CO₂ değerinin 1000 ppm altında olması gerektiğini ifade etmektedir. 1000-2000 ppm aralığında öğrencilerin karar verme becerilerinin %44 düştüğü görülmüştür (Satish ve diğerleri, 2012).

4. Sınıf Ortamlarında Havalandırma Yöntemleri

Okul binalarında çoğunlukla mekanik iklimlendirme sistemleri yerine doğal havalandırma metodları tercih edilmektedir. Ancak bununla beraber gün geçtikçe binalar ne yazık ki hava geçmesine imkan vermeyecek şekilde inşa edilmekte bu da iç hava kalitesini düşürmektedir (Asif ve diğerleri, 2018).

4.1. Doğal Havalandırma

Doğal havalandırma, pencere ve kapıları açarak veya binalardaki boşluklardan faydalanılarak yapılan, mekanik bir sistem kullanılmayan bir havalandırma şeklidir. Genellikle eğitim kurumlarına ait yapılarda doğal havalandırma kullanılmaktadır. Danimarka’da yapılan bir çalışmada okulların %52’sinde doğal havalandırma tercih edildiği görülmüştür. Hollanda’da yapılan bir çalışmada da camlardaki güneşliklerin pencere kullanımını engellediği bildirilmektedir (Ding ve diğerleri, 2022). Eğitim binalarında çoğunlukla kış aylarında pencereler açılmaz ve yeterli havalandırma olmaz. Ancak doğal havalandırma iç hava kalitesini önemli miktarda iyileştirmektedir. Ancak yine mekanik bir havalandırma sisteminin yanında da eksik kalmaktadır. Taze hava sağlandığında ortamdaki CO₂ seviyesi düşeceğinden öğrencilerin konsantrasyon ve algıları iyileşecektir.

CO₂’nin yanında partikül madde miktarı da önemli derecede iyileşmektedir. Özellikle öğrenci hareketinden kaynaklı zeminden yükselen partiküller doğal havalandırma yoluyla ortamdaki hızla uzaklaştırılabilir. VOC konsantrasyonları ise genelde kaynağı ortamdaki kaldırmadıkça çok fazla düşmeyecektir ancak havalandırma yoluyla seyreltilir. Bu sebeple kış aylarında bile olsa havalandırma ihmal edilmemelidir. Kısa süreli de olsa pencereler belirli aralıklarla açılmalı ve ortamın taze hava oranı yükseltilmelidir.

4.2. Mekanik Havalandırma Sistemleri

Mekanik havalandırma sistemlerinde kontrollü taze hava sağlama ve kirli havayı egzost etme açısından daha kontrollü bir havalandırma stratejisi sunar. Özellikle doğal havalandırmayla desteklenen hibrit sistemler oldukça verimli olmaktadır. Mekanik havalandırma özellikle CO₂, VOC ve PM miktarını düşürmekte doğal havalandırmaya göre daha başarılıdır. Yapılan çalışmalarda mekanik havalandırma olan sınıflardaki CO₂ ve VOC seviyelerinin doğal havalandırmaya kıyasla daha düşük olduğu belirtilmiştir. Ancak bu sistemler iyi kullanılmadığına IAQ değerinin düştüğü, bakım ve onarımlardan sonra ise iyileştiği tespit edilmiştir. Bu sebepten dolayı mekanik sistemlerin bakımı ve temiz tutulması oldukça önemlidir(Ding ve diğerleri, 2022).

Mekanik sistemlerde hava, menfez ve difüzörler yardımıyla homojen bir şekilde dağıtılıp toplanabilir ve bu sayede hızlı ve homojen bir hava dağılımı sağlanmış olur. Hava çoğunlukla tavandan dağıtılıp toplanmakla birlikte Kore’de yapılan bir çalışmada zeminden hava toplanmış ve sonucunda zemindeki tozu ve kiri ortamdan hızlıca uzaklaştırdığından dolayı çapraz enfeksiyon riskinin azaldığı, solunum seviyesindeki havanın daha iyi tazelendiği tespit edilmiştir (Son ve Jang, 2021). Buna bağlı olarak PM miktarının çok daha düşük çıkacağı da aşıkardır.

Mekanik havalandırma ek yatırım ve işletme maliyeti getirdiğinden pek fazla tercih edilmemektedir. Ancak yeterli doğal havalandırmanın sağlanamadığı durumlarda mekanik havalandırmanın sağlık ve eğitim performansının etkinliği açısından kullanılması oldukça önemlidir.

5. İç Hava Kalitesi ve Termal Konforun Akademik Performansa Etkisi

Sınıf içi sıcaklığı ile öğrencilerin performansı arasında doğrusal olmayan ancak oldukça güçlü bir ilişki mevcuttur. 20-23°C sıcaklıkları arası uygun bir sıcaklık aralığı olarak belirlenirken, 26°C üzerinde dikkat, işlem hızı ve problem çözme becerilerinde düşüş görülmüştür. Öğrencilerin yüksek sıcaklıkta çabuk yorulduğu ve hata yapma performansının arttığı söylenmektedir. Termal konforun yeterli olmadığı zamanlarda öğrencilerin derse odaklanma süresi kısalmakta, öğretmenleri sınıf hakimiyeti zorlaşmakta ve uygulanan standardize edilmiş test sonuçlarında düşüşler görülmektedir. Kısa süreli konforsuzluk, uzun vadede öğrenme çıktıları üzerinde birikerek etki gösterebilir.

Aşırı sıcak veya aşırı soğuk ortamlarda özellikle küçük yaştaki çocuklar yetişkinlere göre çevre şartlarına kolay adapte olamadığından dolayı daha savunmasızdırlar. Bu tip bir sınıfta baş ağrısı, halsizlik, dehidrasyon ve soğuk algınlığı gibi problemler daha fazla görülmektedir. Termal konforun uygun olmaması aynı zamanda meydana gelebilecek hastalıklar sebebiyle doğrudan, konfor ve refah düşüşünden dolayı devamsızlık artışına sebep olmaktadır.

Termal konforun yanında kirleticilerin miktarı da konsantrasyon ve okula devam durumunu etkilemektedir. Sıcak havalarda VOC miktarının emisyon hızı artmaktadır. Özellikle kış aylarında havalandırmanın yapılmaması veya mevcut havalandırma sisteminin kapatılması sebebiyle ortamdaki CO₂ ve kirleticilerin miktarı artmaktadır. Ayrıca enerji maliyetleri yeteli havalandırma yapılmamaktadır. Bu tip binalarda iklimlendirme ve havalandırma sistemi tasarlarken konfor-enerji-sağlık üçgenini dengede tutmak gereklidir. Enerji tüketiminin oldukça önemli olduğu günümüzde çoğunlukla enerji odaklı bina tasarımları yapılmaktadır. Hava geçirmeyen, daha az havalandırılan, termal olarak çok iyi ancak iç hava kalitesi açısından zayıf binalar inşa edilmektedir. Enerji tüketimi düşük olmakla birlikte öğrencilerin akademik performansını ve sağlığını etkileyen ortamlar oluşturulmaktadır. Bu sebeple sadece termal

konfor odaklı değil iç hava kalitesinin de düşünüldüğü okul binaları tasarlanmalıdır. Ayrıca eğitimin her kademesin farklı yaş ve fizyolojik özelliklerde öğrenci grupları olduğundan her gruba özel tasarım gerekmektedir (Su ve diğerleri, 2022).

6. Sonuç

Bu çalışmada iç hava kalitesi ve termal konforun öğrencilerin refah, sağlık ve akademik performansına etkileri yapılan akademik çalışmalar üzerinden değerlendirilmiştir. Çalışmalarda ilkokuldan, üniversitelere kadar olan sınıflarda büyük çoğunla CO₂ oranları çok yüksek çıkmış yani yetersiz havalandırma olduğu görülmüştür. Bu durum bilişsel hızı, konsantrasyonu ve akademik performansı etkilemektedir. Havalandırmanın artırıldığı sınıflarda öğrencilerin bilişsel hızı ve konsantrasyonunun olumlu derece etkilendiği ispatlanmıştır. NO₂ seviyesi yükseldikçe devamsızlığın arttığı, düşük nem ve biyolojik kirleticilerin de solunum yolu problemlerine neden olduğu belirtilmektedir. (Papadopoulos ve diğerleri, 2020; Chen ve diğerleri, 2022; Mendell ve Heath, 2005)

Termal konforun sadece rahat olup olmama durumu olarak değerlendirilmemesi, öğrenciler için konsantrasyon, problem çözme becerisi ve bilişsel hızlarını etkileyen bir parametre olduğunun unutulmaması gerekir. Ayrıca ortamı sadece sıcak veya soğuk kavramı üzerinden değerlendirmemeli, termal konfor ve iç hava kalitesinin ayrılmaz bir bütün olması gerektiği unutulmamalıdır. Literatürlerde en çok vurgulanan hata, enerji tasarrufu sağlama adına iç hava kalitesinin feda edilmesidir.

Çalışmalara bakıldığında eğitim binalarda hızlıca uygulanması gereken bazı eylemler ön plana çıkmaktadır. Bu eylemleri özetlemek gerekirse;

- Havalandırmanın ve taze hava akışının artırılması,
- Bina yapısında bulunan nem ve su hasarlarının giderilmesi,
- Küf ve biyolojik kirleticilere maruziyetin azaltılması,
- Kimyasal ve yanma kaynaklı iç ortam kirleticilerinin kontrol altına alınması,
- Yeni okul binaları tasarımında ve mevcut binaların işletilmesinde iç hava kalitesine öncelik verilmesi gerekmektedir.

Termal performans ve iç hava kalitesinin iyileştirilmesini “lüks bir konfor” konusu olarak görmekten vaz geçmeli, bunun eğitimde fırsat eşitliği ve öğrenmeyi direk olarak ilgilendiren kamusal bir sağlık ve eğitim politikası olarak görmeliyiz.

Kaynaklar

- ASHRAE, 2020. Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2019. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc, Atlanta, GA, 2016.
- Asif, A., Zeeshan, M. ve Jahanzaib, M., 2018. Indoor temperature, relative humidity and CO₂ levels assessment in academic buildings with different heating, ventilation and air-conditioning systems. *Building and Environment*, 133, pp.83-90. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.10.015>
- ASTM, Standard Guide for Using Indoor Carbon Dioxide Concentrations to Evaluate Indoor Air Quality and Ventilation, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
- Awbi, H.B., 2003. Ventilation of Buildings, second ed. Spon Press, Taylor & Francis group, New York, NY. USA.
- Bakó-Biró, Z., Clements-Croome, D. J., Kochhar, N., Awbi, H. B., ve Williams, M. J. (2012). Ventilation rates in schools and pupils' performance. *Building and environment*, 48, 215-223. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.08.018>.
- Bogdanovica, S., Zemitis, J., ve Bogdanovics, R. (2020). The effect of CO₂ concentration on children's well-being during the process of learning. *Energies*, 13(22), 6099. 9. <https://doi.org/10.3390/en13226099>.
- Brown, S. K., Sim, M. R., Abramson, M. J., ve Gray, C. N. (1994). Concentrations of volatile organic compounds in indoor air—a review. *Indoor air*, 4(2), 123-134. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.1994.t01-2-00007.x>
- Cândido, C., De Dear, R. J., Lamberts, R., ve Bittencourt, L. (2010). Air movement acceptability limits and thermal comfort in Brazil's hot humid climate zone. *Building and environment*, 45(1), 222-229. doi:10.1016/j.buildenv.2009.06.005
- Chen, Y. H., Tu, Y. P., Sung, S. Y., Weng, W. C., Huang, H. L., ve Tsai, Y. I. (2022). A comprehensive analysis of the intervention of a fresh air ventilation system on indoor air quality in classrooms. *Atmospheric Pollution Research*, 13(4), 101373. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101373>
- Daisey, J. M., Angell, W. J., & Apte, M. G. (2003). Indoor air quality, ventilation and health symptoms in schools: an analysis of existing information. *Indoor air*, 13(1).
- de Dear, R., Kim, J., Candido, C., ve Deuble, M. (2015). Adaptive thermal comfort in Australian school classrooms. *Building Research & Information*, 43(3), 383-398. <https://doi.org/10.1080/09613218.2015.991627>
- Ding, E., Zhang, D., ve Bluysen, P. M. (2022). Ventilation regimes of school classrooms against airborne transmission of infectious respiratory droplets: A review. *Building and Environment*, 207, 108484. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108484>

- Dorizas, P. V., Assimakopoulos, M. N., Helmis, C., ve Santamouris, M. (2015). An integrated evaluation study of the ventilation rate, the exposure and the indoor air quality in naturally ventilated classrooms in the Mediterranean region during spring. *Science of the Total Environment*, 502, 557-570. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.09.060>
- European Commission. (2014). *Schools indoor pollution and health: Observatory network in Europe (SINPHONIE Project)*. Publications Office of the European Union
- Fabozzi, M., ve Dama, A. (2020). Field study on thermal comfort in naturally ventilated and air-conditioned university classrooms. *Indoor and Built Environment*, 29(6), 851-859. <https://doi.org/10.1177/1420326X19887481>
- Fann, N., Lamson, A.D., Anenberg, S.C., Wesson, K., Risley, D. ve Hubbell, B.J., (2012). Estimating the national public health burden associated with exposure to ambient PM_{2.5} and ozone. *Risk Anal.* 32, 81–95. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2011.01630.x>.
- Green, G.H. (1974) The effect of indoor relative humidity on absenteeism and colds in schools, *ASHRAE Trans.*, 80,131–141.
- Greene, R., Eftekhari, M., Clements-Croome, D., ve Georgiou, G. (2012). Measurements of CO₂ levels in a classroom and its effect on the performance of the students.
- Griffiths, M. ve Eftekhari, M., (2008). Control of CO₂ in a naturally ventilated classroom. *Energy Build.* 40, 556–560. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.04.013>.
- Institute of Medicine (IOM), 2004. *Damp Indoor Spaces and Health*. National Academies Press, Washington, DC.
- Allen, J. G., MacNaughton, P., Satish, U., Santanam, S., Vallarino, J., & Spengler, J. D. (2015). Associations of cognitive function scores with carbon dioxide, ventilation, and volatile organic compound exposures in office workers: a controlled exposure study of green and conventional office environments. *Environmental health perspectives*, 124(6), 805.
- Johnson, D.L., Lynch, R.A., Floyd, E.L., Wang, J. ve Bartels, J.N., (2018). Indoor air quality in classrooms: Environmental measures and effective ventilation rate modeling in urban elementary schools. *Building and Environment*, 136, pp.185-197.
- Kalimeri, K. K., Saraga, D. E., Lazaridis, V. D., Legkas, N. A., Missia, D. A., Tolis, E. I., ve Bartzis, J. G. (2016). Indoor air quality investigation of the school environment and estimated health risks: Two-season measurements in primary schools in Kozani, Greece. *Atmospheric Pollution Research*, 7(6), 1128-1142. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2016.07.002>
- Mendell, M. J., ve Heath, G. A. (2005). Do indoor pollutants and thermal conditions in schools influence student performance? A critical review of the literature. *Indoor air*, 15(1), 27-52.
- Mumovic, D., Davies, M., Ridley, I., Altamirano-Medina, H., ve Oreszczyn, T. (2009). A methodology for post-occupancy evaluation of ventilation rates in schools. *Building*

- Services Engineering Research and Technology*, 30(2), 143-152.
<https://doi.org/10.1177/0143624408099175>.
- Papadopoulos, G., Panaras, G., ve Tolis, E. (2020). Thermal comfort and Indoor Air Quality assessment in university classrooms. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 410, No. 1, p. 012095). IOP Publishing. Doi:10.1088/1755-1315/410/1/012095
- Pilotto, L. S., Douglas, R. M., Attewell, R. G., ve Wilson, S. R. (1997). Respiratory effects associated with indoor nitrogen dioxide exposure in children. *International journal of epidemiology*, 26(4), 788-796. <https://doi.org/10.1093/ije/26.4.788>
- Satish, U., Mendell, M. J., Shekhar, K., Hotchi, T., Sullivan, D., Streufert, S., ve Fisk, W. J. (2012). Is CO₂ an indoor pollutant? Direct effects of low-to-moderate CO₂ concentrations on human decision-making performance. *Environmental health perspectives*, 120(12), 1671.
- Schibuola, L., ve Tambani, C. (2020). Indoor environmental quality classification of school environments by monitoring PM and CO₂ concentration levels. *Atmospheric Pollution Research*, 11(2), 332-342. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2019.11.006>
- Seppänen, O.A., Fisk, W.J. ve Mendell, M.J., (1999). Association of ventilation rates and CO₂ concentrations with health and other responses in commercial and institutional buildings. *Indoor Air* 9, 226–252. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.1999.00003.x>
- Shriram, S., Ramamurthy, K., ve Ramakrishnan, S. (2019). Effect of occupant-induced indoor CO₂ concentration and bioeffluents on human physiology using a spirometric test. *Building and Environment*, 149, 58-67. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.12.015>.
- Son, S., ve Jang, C. M. (2021). Air ventilation performance of school classrooms with respect to the installation positions of return duct. *Sustainability*, 13(11), 6188. <https://doi.org/10.3390/su13116188>
- Stabile, L., Dell'Isola, M., Russi, A., Massimo, A., ve Buonanno, G. (2017). The effect of natural ventilation strategy on indoor air quality in schools. *Science of the Total Environment*, 595, 894-902. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.048>
- Su, B., Jadresin Milic, R., McPherson, P., ve Wu, L. (2022). Thermal performance of school buildings: Impacts beyond thermal comfort. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(10), 5811. <https://doi.org/10.3390/ijerph19105811>
- Theodosiou, T. G., ve Ordoumpozanis, K. T. (2008). Energy, comfort and indoor air quality in nursery and elementary school buildings in the cold climatic zone of Greece. *Energy and Buildings*, 40(12), 2207-2214. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.06.011>
- Teli, D., Jentsch, M. F., ve James, P. A. (2012). Naturally ventilated classrooms: An assessment of existing comfort models for predicting the thermal sensation and preference of primary school children. *Energy and buildings*, 53, 166-182. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.06.022>

- Tucker, W.G., 1992. ASHRAE Standard 62: Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. EPA/600/A-92/210. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Air and Energy Engineering Research Laboratory, Research Triangle Park, NC, USA.
- WHO, World Health Organization (1987). Health Impact of Low Indoor Temperatures; World Health Organisation, Regional Office for Europe: Copenhagen, Denmark.
- WHO, World Health Organization, (2000). Air Quality Guidelines for Europe, second ed. World Health Organization. Regional Office for Europe. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/107335>.
- WHO World Health Organization, (2009). WHO Guidelines for Indoor Air Quality: Dampness and Mould; World Health Organization, Regional Office for Europe: Copenhagen, Denmark.
- Wu, X., Braun, D., Schwartz, J., Kioumourtzoglou, M. A., ve Dominici, F. J. S. A. (2020). Evaluating the impact of long-term exposure to fine particulate matter on mortality among the elderly. *Science advances*, 6(29), eaba5692. 92. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aba5692>.
- Yang, D., ve Mak, C. M. (2020). Relationships between indoor environmental quality and environmental factors in university classrooms. *Building and Environment*, 186, 107331. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107331>
- Pei, Z., Lin, B., Liu, Y., ve Zhu, Y. (2015). Comparative study on the indoor environment quality of green office buildings in China with a long-term field measurement and investigation. *Building and Environment*, 84, 80-88. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.10.015>

BÖLÜM 9

MÜHENDİSLİK EKONOMİSİNDE PAZARLAMA İLKELERİ VE DAĞITIM KANALLARI YÖNETİMİ

Hakan MUMCU¹, Murat ÖZALP²

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, ORCID: 0009-0005-2306-5522

² Prof. Dr., Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, ORCID: 0000-0003-1651-3487

1. GİRİŞ

Pazarlama kavramı, günümüz ekonomik yapısı içerisinde üretici ile tüketici arasındaki ilişkilerden kamu ve özel sektör uygulamalarına, işveren-çalışan etkileşimlerinden toplumsal iletişim süreçlerine kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir. Ancak bu yaygın kullanıma rağmen, pazarlama teriminin tüm kullanıcılar tarafından aynı anlam çerçevesinde ele alındığını söylemek güçtür. Başka bir ifadeyle, pazarlama kavramı çoğu zaman doğru ya da yanlış, eksiksiz ya da sınırlı biçimde kullanılmakta; bu durum hem işletmeler hem de tüketici grupları açısından yaygın bir görünüm arz etmektedir.

Benzer biçimde, pazarlama alanında akademik çalışmalar yürüten araştırmacılar arasında da kavramın tanımı konusunda tam bir görüş birliği sağlanabilmiş değildir. Bunun temel nedeni, diğer bilim dallarında olduğu gibi pazarlama disiplininin de tarihsel gelişim süreci içerisinde farklı yaklaşımlar ve kavramsal çerçeveler üretmesidir. Nitekim farklı dönemlerde kaleme alınmış pazarlama literatürü incelendiğinde, pazarlama olgusunun birbirinden ayrılan tanımlarına rastlamak mümkündür. Bu çeşitlilik, ekonomik ve toplumsal dönüşümlere paralel olarak pazarlama anlayışının da sürekli bir değişim ve gelişim göstermesinden kaynaklanmaktadır.

Pazarlama anlayışının tarihsel gelişimi incelendiğinde, kavramın farklı aşamalardan geçerek günümüzdeki kapsamlı yapısına ulaştığı görülmektedir. İlk aşamada pazarlama, üretilmiş malların satılmasını sağlamakla sınırlı bir işlev olarak ele alınmıştır. Bu çerçevede pazarlama, üretimi tamamlanmış malların tüketicilere ulaştırılmasına yönelik faaliyetlerin bütünü şeklinde tanımlanmakta ve esas olarak fiziksel dağıtım faaliyetlerine indirgenmektedir. Söz konusu yaklaşım, ilgili dönemin ekonomik koşulları açısından yeterli görülmüş olsa da, günümüz pazar yapıları açısından yetersiz kalmaktadır.

İkinci aşamada, işletme yönetimlerinin ağırlıklı olarak finansman ve örgütlenme ilkelerine odaklandığı bir dönemde, pazarlamanın satışları artırıcı rolü ön plana çıkmıştır. Bu süreçte pazarlamaya yalnızca dağıtım faaliyetleri değil, aynı zamanda reklam, tutundurma ve satış geliştirme işlevleri de yüklenmiştir. Ancak pazarlamayı bu çerçevede ele alan yaklaşım da kavramın bütüncül yapısını açıklamakta yetersizdir.

Üçüncü aşamada ise pazara dayalı işletme yönetimi anlayışının benimsenmesiyle birlikte pazarlamanın kapsamı önemli ölçüde genişlemiştir. Bu dönemde pazarlama; tüketici ihtiyaç ve beklentilerinin belirlenmesi, bu ihtiyaçlar doğrultusunda üretilecek mal ve hizmetlerin planlanması ve söz konusu ürünlerden mümkün olan en geniş tüketici kitlesinin faydalanmasını sağlayacak stratejilerin geliştirilmesi görevlerini üstlenmiştir. Bu bağlamda pazarlama faaliyetlerinin beş temel noktada yoğunlaştığı görülmektedir: (i) tüketici ihtiyaç ve isteklerinin belirlenmesi ya da oluşturulması, (ii) bu ihtiyaçları karşılayacak mal ve hizmetlerin saptanması, (iii) üretilen mal ve hizmetlerin tutundurma faaliyetlerinden yararlanılarak pazara sunulması, (iv) ürünlerin etkin bir biçimde dağıtımının sağlanması ve (v) satış sonrası hizmetler aracılığıyla kullanım faydasının artırılması.

Bu açıklamalar doğrultusunda, klasik pazarlama anlayışı; üretilmiş mal ve hizmetlerin nihai tüketici veya kullanıcıya ulaştırılmasına kadar geçen süreçte gerçekleştirilen faaliyetlerin tümü olarak tanımlanabilmektedir. Bu yaklaşım literatürde satış odaklı pazarlama anlayışı olarak da ifade edilmektedir.

Modern pazarlama yaklaşımında ise süreç, mevcut ya da potansiyel tüketici ihtiyaçlarından hareketle başlamakta; bu ihtiyaçlara uygun mal ve hizmetlerin belirlenmesi, üretilmesi ve nihai tüketiciye ulaştırılarak kullanım sürecinin tamamlanmasına kadar devam etmektedir. Bu süreçte kullanılan tüm yöntem ve tekniklerin temel amacı, tüketici tatminini sağlayarak işletmeye sürdürülebilir kâr elde etmektir.

2. PAZARLAMA KARAMI, TANIMI VE ÖNEMİ

2.1. Tanımlar ve Karşılaştırma

Ekonominin söz konusu ettiğimiz gelişme aşamaları dikkate alındığında pazarlama kavramının gelişmesi daha anlamlı bir biçimde izlenebilmektedir. Bu gelişme aşamalarına göre de pazarlama kavramının değişik tanımlarıyla karşılaşmaktayız.

2.1.1. Klasik ve modern pazarlama anlayışları karşılaştırılması

Klasik pazarlama yaklaşımında pazarlama faaliyetleri, üretim sürecinin tamamlanmasının ardından başlamakta ve pazarlamaya esas olarak “üretilmiş malların satılması” görevi yüklenmektedir. Bu anlayışta işletmeler, mevcut ürünleri piyasada elden çıkarmayı amaçlamakta; satış faaliyetleri reklam, promosyon ve benzeri satış artırıcı uygulamalarla desteklenerek ürünlerin satışı sağlanmaya çalışılmaktadır. Sürecin sonunda elde edilmesi beklenen temel çıktı ise satışlar yoluyla oluşan kârdır.

Modern pazarlama anlayışında ise pazarlama süreci, üretimden önce başlamaktadır. Bu yaklaşımda öncelikle tüketicilerin istek, ihtiyaç ve beklentileri analiz edilmekte; satın alma eğilimi gösterecekleri mal ve hizmetler bu veriler doğrultusunda belirlenerek üretim sürecine yön verilmektedir. Üretim tamamlandıktan sonra, pazarlamanın tüm araç ve teknikleri kullanılarak mal ve hizmetlerin hedef kitleye ulaştırılması sağlanmaktadır. Bununla birlikte süreç, yalnızca satış aşamasıyla sınırlı kalmamakta; satış sonrası hizmetler aracılığıyla tüketicilerin ürünlerden en yüksek faydayı elde etmeleri ve tatmin olmaları hedeflenmektedir. Bu çerçevede kâr kavramı, yalnızca satış hacminden elde edilen bir sonuç olmaktan çıkarak, tüketici tatminine dayalı sürdürülebilir bir kazanç anlayışına dönüşmektedir.

Dolayısıyla modern pazarlama yaklaşımında pazarlama faaliyetleri, pazarın ve tüketici ihtiyaçlarının analiz edilmesiyle başlamakta; tüketicilerin mal ve hizmetleri kullanmaları sonucunda tatmin olmalarıyla tamamlanmaktadır. Bu yönüyle modern pazarlama anlayışında pazarlama sürecinin hem başlangıç hem de bitiş noktası pazar olarak değerlendirilmektedir.

2.1.2. Toplumsal (sosyal) pazarlama anlayışı

Söz konusu pazarlama yaklaşımı, özellikle son yıllarda başta Amerika Birleşik Devletleri olmak üzere Batı toplumlarında modern işletmecilik anlayışı ile işletmelerin toplumsal ve etik sorumlulukları üzerine yürütülen tartışmaların bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır. Bu çerçevede toplumsal pazarlama kavramı literatürde iki temel anlamda ele alınmaktadır.

Toplumsal pazarlamanın ilk anlamı, sosyal düşünce ve amaçların pazarlanması olarak ifade edilmektedir. Bu yaklaşımda nüfus artışının kontrol altına alınması, sigara ve alkol kullanımının azaltılması, enerji tasarrufunun teşvik edilmesi gibi toplumsal fayda sağlamayı amaçlayan kampanyaların benimsenmesini kolaylaştırmak amacıyla pazarlama disiplinine ait araç ve tekniklerden yararlanılmaktadır. Ürün tasarımı, fiyatlandırma, tutundurma, dağıtım ve pazarlama araştırmaları gibi unsurlar, sosyal amaçlı programların etkinliğini artırmak için kullanılmaktadır. Bu tür pazarlama faaliyetleri, özel sektör işletmelerinin katkılarıyla ya da doğrudan toplumsal fayda odaklı kurum ve kuruluşlar tarafından yürütülmektedir.

Toplumsal pazarlamanın işletmeler açısından daha fazla önem taşıyan boyutu ise sosyal sorumluluk temelli pazarlama anlayışıdır. Bu yaklaşım, işletmelerin yalnızca tüketici istek ve ihtiyaçlarını karşılamayı değil, aynı zamanda toplumun uzun dönemli çıkarlarını ve genel

refahını kendi kâr hedefleriyle uyumlu hâle getirmelerini esas almaktadır. Bu doğrultuda toplumsal pazarlama; belirli tüketici gruplarının kısa vadeli beklentilerine odaklanmak yerine, bu grupları da kapsayan daha geniş bir toplumsal kesimin, hatta tüm toplumun ortak ve uzun vadeli ihtiyaç ve isteklerine olanaklar ölçüsünde yanıt vermeyi amaçlayan bir pazarlama yaklaşımı olarak tanımlanabilir (Kurdoğlu, 1982).

2.2. Pazarlamanın Önemi

Pazarlama olgusunun önemi, iki temel boyut çerçevesinde değerlendirilebilir. Bu boyutlardan ilki, pazarlama faaliyetlerinin toplumsal düzeyde ortaya çıkardığı faydalardır. İkinci boyut ise pazarlamanın işletmeler açısından sağladığı katkı ve avantajları kapsamaktadır.

2.2.1. Pazarlamanın toplumsal önemi

Pazarlamanın toplumsal açıdan taşıdığı önem, ortaya koyduğu toplam fayda düzeyi üzerinden değerlendirilmektedir. Her ne kadar bu konuda farklı görüşler ileri sürülse de, pazarlama faaliyetlerinin genel olarak üç temel fayda türü yarattığı kabul edilmektedir.

2.2.1.1. Yer faydası

Yer faydası, pazarlamanın temel işlevlerinden biri olan mal ve hizmetlerin üretildikleri noktadan tüketildikleri alanlara taşınması sürecinden kaynaklanmaktadır. Üretim ile tüketim mekânlarının farklı olduğu durumlarda, söz konusu mal ve hizmetlerin tüketim bölgelerine ulaştırılmaması hâlinde, tüketicilerin bu ürünleri kullanarak tatmin elde etmeleri mümkün olmamaktadır. Bu nedenle mal ve hizmetlerin, talebin bulunduğu yerlere etkin bir biçimde aktarılması gerekmektedir.

Bu noktada pazarlama faaliyetleri devreye girerek yer faydasının oluşmasını sağlamaktadır. Örneğin Türkiye’de muz üretimi belirli coğrafi bölgelerle, özellikle Alanya ve Anamur çevresiyle sınırlıdır. Üretilen muzların tüketim merkezlerine taşınmaması durumunda, bu ürünlerin ülke genelindeki tüketiciler tarafından kullanılması söz konusu olmayacaktır. Pazarlama süreci, söz konusu ürünlerin farklı bölgelerdeki tüketicilere ulaştırılmasını sağlayarak hem ülke genelinde tüketimini mümkün kılmakta hem de ekonomik değer taşıyan ürünlerin fayda yaratmadan yok olmasını önlemektedir. Bu sayede ekonomide üretilen değerlerin etkin bir biçimde değerlendirilmesine katkı sağlanmaktadır.

2.2.1.2. Zaman faydası

Zaman faydası, pazarlamanın sağladığı önemli katkılardan biri olup, mal ve hizmetlerin üretildikleri dönem ile tüketildikleri zaman diliminin örtüşmediği durumlarda ortaya çıkmaktadır. Başka bir ifadeyle, üretim ve tüketim süreçleri farklı zamanlarda gerçekleşen mal ve hizmetlerde, bu iki sürecin uyumlu hâle getirilmesi zaman faydasının oluşmasını sağlamaktadır. Bu durum, mal ve hizmetlerin zaman boyutu içerisinde aktarılması ya da yönetilmesi şeklinde de ifade edilmektedir. Örneğin buğday üretimi yılın belirli bir döneminde, genellikle yaz aylarında gerçekleştirilmektedir. Buna karşın ekmek ve unlu mamuller yıl boyunca sürekli olarak tüketilmektedir. Yaz aylarında hasat edilen buğdayın uygun koşullarda depolanarak yılın her döneminde kullanılabilir hâle getirilmesi, malların zaman içerisinde hareket ettirilmesine örnek teşkil etmektedir. Stoklama faaliyetinin pazarlamanın temel işlevleri arasında yer alması ve zaman faydası yaratması, pazarlama faaliyetlerinin ekonomik ve toplumsal açıdan değer üreten süreçler olduğunu ortaya koymaktadır.

2.2.1.3. Mülkiyet faydası

Mülkiyet faydası, pazarlama faaliyetleri kapsamında gerçekleştirilen satın alma ve satış işlemleri sonucunda ortaya çıkmaktadır. Pazarlama süreci, belirli mal ve hizmetlere sahip olmakla birlikte bunları kullanma gereksinimi duymayan kişi ya da kuruluşlardan, değişim mekanizmaları aracılığıyla bu ürünleri devralmakta; ardından söz konusu mal ve hizmetleri ihtiyaç duyan birey veya gruplara aktarılmasını sağlamaktadır.

Bu süreç sayesinde, ekonomik kaynakların kullanımı sonucu üretilen mal ve hizmetlerin tüketimi mümkün hâle gelmekte ve böylece sınırlı kaynakların daha etkin ve verimli bir biçimde değerlendirilmesine katkı sağlanmaktadır. Dolayısıyla mülkiyet faydası, pazarlamanın değişim odaklı yapısının ekonomik sistem içindeki işlevsel rolünü açık biçimde ortaya koymaktadır.

Pazarlamanın yarattığı üç değişik fayda ile topluma yararlı olması yanında, ekonominin sahip olduğu kıt kaynakların da en olumlu alanlarda kullanımını sağlayacak yararlı olduğu söylenebilir.

Bilindiği gibi pazarlama tüketici ihtiyaçlarından hareket ederek, pazarda talep edilen yani tüketicilerin satın alarak tüketebileceği mal ve hizmetlerin üretilmesini sağlamaktadır. Böylece kıt yatırım kaynaklarının en iyi şekilde kullanımı sağlanmış olmaktadır (Tokol, 1978).

2.2.2. Pazarlamanın işletmeler bakımından önemi

Pazarlama, işletme ile pazar arasında karşılıklı bilgi akışını mümkün kılan çift yönlü bir iletişim sistemi oluşturmaktadır. Pazarlama faaliyetlerinin pazardan başlayarak yine pazarda tamamlandığı ilkesi esas alındığında, bu iletişim yapısının nasıl işlediği ve sağladığı yararlar daha açık bir biçimde anlaşılmaktadır. Bu kapsamda pazarlama süreci, öncelikle pazarın analiz edilmesine; talep yapısının, tüketici ihtiyaç ve beklentilerinin, satın alma davranışlarının ve benzeri unsurların incelenmesine yönelik çalışmalarla başlamaktadır.

Söz konusu veriler, işletmelerin kendi pazarlama birimleri tarafından toplanabileceği gibi, bağımsız pazarlama araştırma kuruluşları aracılığıyla da elde edilebilmektedir. Elde edilen bilgiler doğrultusunda, tüketici beklentilerini karşılamaya yönelik mal ve hizmetlerin üretimine karar verilmektedir. Üretim sürecinin ardından ise, geliştirilen mal ve hizmetlere ilişkin bilgiler bu kez pazara yöneltilmekte; ürünlerin özellikleri, kalite düzeyleri, fiyatlandırmaları ve hangi dağıtım kanalları aracılığıyla sunulacağı gibi unsurlar tüketicilere aktarılmaktadır.

Pazarlamanın sağladığı bu karşılıklı bilgi akışının bulunmaması durumunda, işletmeler hem pazarın talep ettiği niteliklere uygun mal ve hizmetler geliştirmekte zorlanacak hem de üretilen ürünlerin tüketicilere etkin bir biçimde ulaştırılmasında önemli güçlüklerle karşılaşacaktır (Tortop, 1978).

2.3. Pazarlamanın Maliyeti

Pazarlamanın topluma ve işletmelere sağladığı yararlar karşılığında bir maliyeti de vardır. İşletmeler açısından ele alındığında pazarlama maliyetini tutundurma (reklam ve promosyon) ve fiziksel dağıtım (taşıma, depolama) vb. maliyetleri belirlemektedir. Ancak hemen belirtmekte yarar vardır ki, işletmelerin pazarlama maliyetlerini hesap etmeler, üretim maliyetlerinin hesap edilmesi kadar kolay değildir. Bunun önemli nedenleri arasında, bazı faaliyetlerin üretim faaliyeti mi yoksa pazarlama faaliyeti mi olduğu konusundaki görüş farklılıklarıdır.

Örneğin; depolama faaliyeti bunlardan biridir. İşletme pazarlama faaliyetlerini, işletme içi pazarlama birimleri aracılığı ile yürütüyorsa bu durum tartışma konusu olmaktadır. Ayrıca

genel idare giderlerinden pazarlama faaliyetlerine ne kadarının isabet ettiği sorunu da her zaman kolay çözümlenememektedir.

Belirsizlikler ve tartışmaları bir yana bırakırsak diyebiliriz ki, üretim işletmelerinin pazarlama maliyetleri, ürettikleri malları ellerinden çıkarıncaya kadar yapmak zorunda oldukları pazarlama faaliyetlerinin maliyetlerinden oluşmaktadır. Şüphesiz bu maliyetler mal ve hizmetlerin maliyetlerine ya da satış fiyatlarına yansıtılmaktadır.

Böylece toplumun katlandığı pazarlama maliyeti, mal ve hizmetlerin üretimlerinden tüketicilerin eline geçene kadar yapılan pazarlama giderleri ve pazarlama faaliyetlerinin üretim işletmeleri dışındaki pazarlama kurumlarınca gerçekleştirilmesi durumunda, bu tür kuruluşların kar marjları toplamından oluştuğu görülmektedir. Öyle ise mal ve hizmetler üreticiden tüketicieye ne kadar kısa yoldan ulaştırılırsa o ölçüde pazarlama maliyetleri azalacaktır.

Bu arada bilinmesi gereken önemli bir nokta, pazarlama faaliyetlerinin, kim tarafından gerçekleştirilirse gerçekleştirilsin, mutlaka bir maliyetinin olduğudur. Pazarlama faaliyetlerinin zorunlu olması nedeniyle, bu maliyetlere de katlanmak kaçınılmaz olmaktadır. Ancak gereksiz eylemler elenerek pazarlama faaliyetleri rasyonel hale getirilirse, pazarlama maliyetlerini azaltmak mümkün olacaktır (Yükselen, 1989).

3. PAZAR VE PAZARLAMA KARMASI

3.1. Pazar ve Türleri

3.1.1. Pazarın tanımlanması

Karmaşık bir kavram olan pazar, birçok anlamda kullanılmaktadır. Bir borsacı için pazar, hisse senetlerinin alınıp satıldığı yerdir. Bir tacir için pazar, bir şehirde malların geldiği, bölümlendirildiği ve satıldığı yerdir. Bir ekonomist için pazar, bir mal grubu ile ilgilenen veya ilgilendirilebilecek alıcılar ve satıcıların toplamıdır.

Bir pazarlamacı için ise, ihtiyaçlarını gidermek isteyen, harcamak için parası olan ve parasını harcamaya istekli olan kişi veya kuruluşlar topluluğudur.

3.1.2. Pazar türleri

İhtiyaçların farklılığına paralel olarak ihtiyaç giderici mal ve hizmetlerin de farklı olması, pazarlarında farklılaşmasına neden olmaktadır. Nitekim sabun ve demir-çelik ürünlerinin alım ve satımında ortak yanlardan çok, farklılıklar söz konusu olacaktır. Bunun gibi saç kestirme hizmeti ile avukatlık hizmetlerinin alım ve satımında da önemli farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Bu nedenlerle pazarlamacıların, bu farklılaşmaya uygun önlemleri almaları zorunlu olmaktadır. Kaldı ki aynı malın farklı tüketici ya da kullanıcı gruplarınca satın alınmasında etkili olan güdüler, satın alma alışkanlıkları, biçimleri, davranışları vb. gibi farklılıklar da pazarların farklılaşmasına yol açmaktadırlar. Hatta denebilir ki pazarın farklılaşmasında mal ve hizmetlerin özelliklerinden çok onları satın alanların etkisi vardır. Bunlar;

- Tüketici ya da kullanıcıları dikkate aldığımızda mal ve hizmetleri niçin satın aldıklarını incelemek mümkün olmaktadır.
- En son tüketiciler, kendi ihtiyaçlarını karşılamak için mal ve hizmetleri satın alan birey ve ailelerdir.
- Üreticiler, üretim yapmak üzere mal ve hizmetleri satın alan birey veya kurumlardır.
- Ticari kuruluşlar, yeniden satmak üzere mal ve hizmetleri satın almaktadırlar.

- Devlet ise, kamu hizmetlerini yerine getirmek üzere mal ve hizmetlere ihtiyaç duymaktadır.

Görüldüğü gibi pazarı oluşturan kişi ya da kuruluşların mal ve hizmetleri satın alma nedenleri birbirinden farklıdır. Buna ek olarak, her bir grubun satın alma alışkanlıkları, satın alma biçimleri vb. de farklılıklar göstermektedir. Öyle ise bir pazarlamacının başarısı, pazarın özelliklerini bilmesine, yani pazarını tanımasına bağlıdır. Pazarı tanımak için pazar analizine gerek duyulmaktadır. Pazarı analiz etmek ise bazı temel sorulara cevap aramakla mümkündür:

- Hangi mallar satın alınıyor?
- Niçin satın alınmaktadır?
- Kim satın almaktadır?
- Mallar nasıl satın alınıyor?
- Ne kadar satın alınıyor?
- Nereden ve ne zaman satın alınıyor?

Bu soruların cevapları bulunduğunda pazarın nitelikleri ortaya çıkmış olacaktır. Pazarın sayısal olarak belirlenebilmesi için ise, değişik tekniklerden yararlanılarak pazar potansiyeli tahmin edilmeye çalışılır. Böylece pazarlama eylemlerinin planlanmasında hareket noktası belirlenmiş olmaktadır. Hareket noktası belirlendikten sonra pazar bölümlere ayırarak birbirinden farklılıklar gösteren, değişik tür pazarların da incelenmesi, pazarın daha iyi tanınması için kaçınılmaz olmaktadır. Bu çalışmalar sonucu işletmenin hizmet edeceği pazar bölümü ya da bölümleri seçilir ve seçilen Pazar bölümünün özelliklerine göre pazarlama eylemleri planlanır.

Mal ve hizmetleri satın alanların rolüne göre pazar bölümlendiğinde beş tür pazardan söz edilebilir:

- Tüketiciler pazarı,
- İşletmeler pazarı,
- Kurumlar pazarı,
- Devlet pazarı,
- Uluslararası pazar.

Bu pazarlar kısaca izlenerek, birbirlerinden hangi özellikleri nedeniyle farklılaştıkları gözlemlenebilir.

3.1.2.1. Tüketiciler pazarı

Tüketici pazarı, bireyler ve aileler tarafından kişisel kullanım veya tüketim amacıyla satın alınan mal ve hizmetlerin oluşturduğu pazar olarak tanımlanmaktadır. Bu pazar, sıklıkla nihai tüketicilerin oluşturduğu pazar olarak da adlandırılmaktadır.

Bu pazarın temel özelliği, mal ve hizmetlerin doğrudan bireysel veya aile ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla edinilmesi ve tüketilmesidir. Tüketici pazarının doğru bir şekilde analiz edilebilmesi, öncelikle tüketici davranışlarının ve tercihlerinin incelenmesine bağlıdır. Pazarı etkileyen temel faktörler arasında nüfus yapısı, ekonomik koşullar ve tüketici davranışları yer almakta olup, bu etmenlerin detaylı olarak değerlendirilmesi, tüketici pazarının kapsamlı bir biçimde tanınmasını mümkün kılmaktadır.

3.1.2.2. İşletmeler pazarı

İşletmelerin oluşturduğu pazar çok karmaşıktır. Bunun nedeni, oluşturan işletmelerin mal ve hizmetleri satın alma nedenlerinin işletme türüne göre farklılıklar göstermesidir. Gerçekten de kar amacı güden işletmeleri bir bölümlemeye tabi tuttuğumuzda birbirinden farklı işletmelerle karşılaşmaktayız. Örneğin; doğal kaynakları işleten işletmeler, madencilik,

ormancılık, balıkçılık ve tarım işletmelerinden oluşur. Her alanda kullanılan araç gereç diğerlerinden farklıdır.

3.1.2.3. Kurumlar pazarı

Kurumlar, kamu ya da kamunun bir bölümüne hizmet sağlayan kuruluşlardır. Hastaneler, okullar, dispanserler, kitaplıklar, kamuya yararlı dernekler bunlar arasında sayılabilir.

Kurumlarda mal ve hizmetlerin bir kısmı tüketilmek, bir bölümü de kullanılmak üzere satın alınırlar. Buralarda satın almalar belli bir düzene bağlanmıştır. Yöneticiler ve teknik elemanlar alımlar üzerinde etkili olurlar. Kurumlarda mal ve hizmetlerin uygun koşullarda satın alınmaları önem kazanır.

3.1.2.4. Devlet pazarı

Devlet de ülkenin her yanına yayılmış birimleri ile bir alıcıdır. Bu da gösteriyor ki, devlet pazarı bir yere toplanmamıştır, aksine oldukça yaygın bir görünümüdür. Devletin alımları ile bilinmesi gereken nokta, toplum yararına korumak üzere alımların yasal düzenlemelerle, sıkı bir kayda bağlı olmasıdır. Bilindiği gibi devlet gıda maddelerinden atom reaktörüne kadar her tür malın alıcısı durumundadır.

3.1.2.5. Uluslararası Pazar

Uluslararası pazarlar, diğer ülkelerin yukarıda sayılan dört tür pazarının toplamı olarak karşımıza çıkar, Özellikleri şunlardır:

- Uluslararası pazarların çevresel koşulları birbirinden farklıdır,
- Ülkenin ekonomik yapıları farklıdır,
- Tüketicilerin satın alma davranışları farklıdır,
- Uluslararası pazarlarda mal tasarımları, rekabet, fiyatlama ve reklam uygulamalarına ilişkin yasal düzenlemeler birbirinden çok farklıdır.

3.2. Pazarlama Karması

Pazarlama birimleri, ister işletmenin kendi bünyesinde yer alsın ister bağımsız pazarlama kurumları aracılığıyla yürütülsün, işletmenin bir alt sistemi olarak çevresel faktörlerin etkisi altında faaliyet göstermektedir. Başka bir deyişle, pazarlama süreçleri de iç ve dış çevresel etmenlerden etkilenmektedir. Dış çevre faktörleri, işletmenin kontrolü dışında kalan ve pazarlama faaliyetlerini dolaylı olarak etkileyen unsurları ifade etmektedir. Pazarlama çalışmalarının etkinliği, büyük ölçüde işletmenin faaliyet gösterdiği çevre koşullarına uyum sağlama derecesiyle ilişkilidir (Durmaz ve Efendioğlu, 2016a)

İşletme içi etmenler veya iç çevre, işletmenin denetimi altındaki öğelerden oluşur. Bu öğeler; dört tanedir ve bunlar bir işletmenin pazarlama karmasını oluşturur: mamul, dağıtım, fiyat, tutundurma bileşenleri (Durmaz ve Efendioğlu, 2016b).

Bir pazarlama yöneticisinin başarılı olabilmesi için öncelikli şart, işletme dışı çevresel koşullara uyum sağlayabilmesidir. İkinci ve eş derecede önemli şart ise, pazarlama bileşenlerini birbirleriyle uyumlu bir biçimde bir araya getirerek etkili bir pazarlama karması oluşturabilmektir. Pazarlama karması, işletmenin yürüttüğü tüm pazarlama faaliyetlerinden oluşan bir bütün olarak değerlendirildiğinden, pazarlama çabalarının etkinliği, söz konusu karmanın ne derece doğru ve uyumlu biçimde tasarlandığına bağlıdır. Nitekim, pazarlama unsurlarını birbirinden bağımsız ele almak mümkün değildir.

Etkili ve uyumlu bir pazarlama karması oluşturmanın temel koşulu ise güvenilir ve sağlam verilere dayanmaktır. Bu bağlamda, öncelikle pazarlama araştırmaları gerçekleştirilmekte, ardından elde edilen veriler ışığında pazarlama karmasının planlanması ve uygulanması gerekmektedir (Tek, 1990).

3.3. Pazarlama Araştırmaları

Sağlıklı pazarlama kararlarının alınması, sağlam ve güvenilir verilerden hareket ederek karar verilmesine bağlıdır. Pazarın sürekli değişen dinamik bir yapıya sahip olması, üreticilerle tüketiciler arasındaki uzaklığın giderek artması ve pazarlama sorunlarının karmaşıklığı pazarlama yöneticilerinin, riskleri ve belirsizlikleri azaltmak için, karar vermede güvenilir ve yeterli bilgilere daha fazla gereksinim duymalarına neden olmaktadır. Pazarlama yöneticilerinin hedef pazarın belirlenmesi, uygun bir pazarlama karmasının oluşturulması ve çevreye uyum sağlanması için gereksinim duydukları bilgiler pazarlama araştırması ile toplanabilir.

Bu durumda pazarlama araştırmalarını; tüm pazarlama sorunlarına ilişkin verilerin sistematik ve objektif olarak toplanması, kaydedilmesi ve analiz edilmesi olarak tanımlayabiliriz (Tokol, 1978).

3.3.1. Pazarlama araştırmasında toplanan veri türleri ve veri toplama yöntemleri

3.3.1.1. İkincil veriler

İkincil veriler araştırmayı yapan kişi veya grup dışında, başka kişi veya kurumlarca önceden ve kendi amaçlarına uygun olarak toplanmış verilerdir. Bu verilerin elde edilmesi oldukça kolaydır. Zira araştırmacı için hazır olan bu veriler ilgili kaynaklara başvurularak elde edilebilirler. Bu verilerin kaynağı:

İşletme içi kaynaklar: Başta işletmenin muhasebe kayıtları olmak üzere normal faaliyetleri için tutulan kayıtlar ve belgelerden ibarettir.

İşletme dışı kaynaklar: İşletmelerin dışındaki Bakanlıklar, Merkez Bankası, Dış Ticaret Müsteşarlığı, Nüfus Daireleri vb. gibi resmi kaynaklarla, Ticaret ve Sanayi Odaları, Odalar ve Borsalar Birliği, Bankalar, Meslek Kuruluşları vb. gibi özel kaynaklardan oluşmaktadır.

3.3.1.2. Birincil veriler

Birincil veriler araştırmacı tarafından, kişisel olarak toplanan araştırma konusuna ilişkin verilerden oluşmaktadırlar. Bu nedenle birincil verilerde ikincil verilerden farklı olarak veri toplama kaynakları değil yöntemleri önem kazanmaktadır. Nitekim ikincil verilerin sağlamlığı konusunda kaynaklara bakılırken, birincil verilerde bilgi toplama yöntemlerine önem verilmektedir.

Başlıca birincil veri toplama yöntemleri şunlardır:

- Anket yöntemi,
- Gözlem yöntemi,
- Deney yöntemi,
- Projeksiyon yöntemi.

Anket yönteminin esasını ana kitleyi temsil eden deneklere sözlü veya yazılı sorular yöneltmek ve cevap almak teşkil etmektedir.

Gözlem yönteminde, araştırma konusu olaylara hiçbir müdahalede bulunmadan olaylar gözlenir ve bu yolla veri elde edilmeye çalışılır.

Deney yöntemi, kontrol edilen bir ortama belirli uyarıcıların verilmesine ve bu uyarıcıların sistemli bir şekilde değiştirilmesine dayanır.

Projeksiyon yöntemi ise, dolaylı yoldan bilgi toplama yöntemidir. Cevaplayıcı hakkında ipuçları verecek şekilde geliştirilmiş, kelime veya cümle tamamlama testi, resim yorumlama testi vb. gibi, psikolojik testlerle kişi hakkında bilgiler toplanır (Kurtuluş, 1976).

3.3.2. Pazarlama araştırmalarının uygulama alanları

3.3.2.1. Reklam Araştırması

- Gündüleme araştırması,
- Reklam sloganı araştırması,
- Media araştırması,
- Reklam etkinliğinin araştırması.

3.3.2.2. Mamul araştırması

- Yeni mamul araştırması,
- Rakip mamullerle ilgili araştırmalar,
- Fiyatlandırma araştırması,
- Mamul denemesi,
- Ambalajlama araştırması,
- Mevcut mamule yeni kullanma alanları araştırması.

3.3.2.3. Satış ve pazar araştırması

- Pazar payı analizi,
- Pazar özelliklerinin belirlenmesi,
- Satış analizi,
- Satış bölgelerinin belirlenmesi,
- Dağıtım kanalları ve dağıtım maliyetleri çalışmaları,
- Dağıtım merkezlerinin yer seçimi,
- Tüketici araştırmaları.

3.3.2.4. İşletme politikaları araştırmaları

- Kısa ve uzun dönemli tahminlerle ilgili araştırmalar,
- Kuruluş yeri araştırmaları,
- Dış pazarlarla ilgili araştırmalar,
- Maliyetlerle ilgili araştırmalar,
- Kar ve değer analizleri,
- Satın alma ile ilgili araştırmalar.

4. DAĞITIM VE BAYİLİK

4.1.1. Dağıtım

Dağıtım kavramını açıklarken, iki temel ekonomik işlev üzerinden hareket etmek uygundur: üretim ve tüketim. Bu iki işlev, birbirine zıt olduğu kadar birbirini tamamlayıcı nitelik taşımaktadır. Dağıtım açısından incelendiğinde, üretimin genellikle belirli bir mekâna bağlı olduğu ve büyük miktarlarda gerçekleştiği gözlemlenmektedir. Buna karşılık, tüketim daha geniş bir alana yayılmış olup, nispeten küçük miktarlarda gerçekleşmektedir (Biçer 2015).

Bu farklılıklar sonucunda üretim ile tüketim arasında yer, zaman, miktar ve hatta kalite açısından uyumsuzluklar ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla üretilen mal ve hizmetlerin tüketiciye uygun biçimde ulaştırılmasını sağlayacak, üretim ve tüketim süreçlerini birbirine uyumlu hâle getirecek bir işlevin varlığı zorunludur. İşte bu işlev dağıtım olarak tanımlanmaktadır.

Geniş anlamda dağıtım, bir mal veya hizmeti üretildiği noktadan tüketileceği yere taşımak için yürütülen tüm faaliyetleri kapsamaktadır. İşletme düzeyinde ise dağıtım, bir ürünün tüketiciye ulaşmasıyla ilgili olarak işletmenin aldığı kararlar ve sergilediği davranışları ifade eder. Başka bir ifadeyle dağıtım, mal ve hizmetin üreticinin satış birimlerinden başlayarak nihai tüketici veya kullanıcıya ulaşana kadar geçen tüm işlem ve faaliyetleri kapsayan bir süreçtir (Kurtuluş, 1976).

4.1.2. Dağıtım kanallarının tanımı

Dağıtım kanalı, bir mal veya hizmetin üreticiden nihai tüketiciye doğru izlediği yol olarak tanımlanmaktadır. Mal ve hizmetlerin kendi kendine tüketiciye ulaşması mümkün olmadığından, çeşitli pazarlama kurumları, değişik pazarlama işlevlerini yerine getirerek bu hareketi sağlamaktadır. Bu bağlamda dağıtım kanalı kavramı, üretici ile tüketici arasında yer alan çok sayıda pazarlama kuruluşunu kapsamaktadır. Bu kuruluşlar, üretim, toptan ve perakende düzeylerinde faaliyet göstermektedir.

Dağıtım kanalı sürecinde, malın sahipliği üreticiden tüketiciye doğru el değiştirir; bu süreçte hem ilk sahip hem de son sahip ile aradaki araçlar ve sahiplik değişimini etkileyen diğer kurumlar kanalın bir parçasını oluşturur.

Bu çerçevede dağıtım kanalı, malları ve hizmetleri mülkiyetleriyle birlikte üretim noktasından tüketici veya kullanıcıya ulaştırmak amacıyla yürütülen faaliyetleri kapsayan, işletme içi örgütsel birimler ve işletme dışı pazarlama kurumlarının karşılıklı toplumsal ve ekonomik ilişkiler içerisinde oluşturduğu bir yapı olarak tanımlanabilir (Chaffy ve Chadwick, 2016).

4.1.2.1. Doğrudan dağıtım

Üreticinin, herhangi bir aracı kurum veya organizasyon kullanmaksızın mal ve hizmetleri doğrudan tüketici veya kullanıcıya ulaştırması durumunda, bu süreç doğrudan dağıtım olarak adlandırılmaktadır. Dolayısıyla bir dağıtım kanalının oluşup oluşmaması, büyük ölçüde üretilen mal ve hizmetlerin türüne, üretici işletmenin özelliklerine ve tüketicilerin üretim noktasına olan yakınlığına bağlıdır.

4.1.2.2. Dolaylı dağıtım

Üretici ile tüketici arasında, alıcı ve satıcı konumunda bulunan ve ekonomik açıdan bağımsız işletmelerin yer alması durumunda, söz konusu dağıtım dolaylı dağıtım olarak tanımlanmaktadır. Dolaylı dağıtım sürecinde, üretici ile tüketici arasındaki mal ve hizmet alım-satım işlemlerinde yasal ve ekonomik açıdan bağımsız olan aracılar veya işletmeler rol oynamaktadır.

4.1.2.3. Bağımsız dağıtım kuralları

Bağımsız dağıtım kanalları olarak da adlandırılan geleneksel dağıtım kanalları, üreticiler, toptancılar ve perakendecilerden oluşan ve birbirinden ayrı işletmelerden meydana gelmektedir. Geleneksel kanallar, kurumlar arasında görece gevşek bir işbirliği ilişkisi barındıran bir yapı sergiler. Bu kurumlar arasında satış koşulları ve işlemlere ilişkin pazarlık süreçleri yürütülmekte olup, taraflar arasında anlaşma sağlanamadığında ilişkiler kesintiye uğrayabilmektedir. Kanalda yer alan her kurum, her bir alım-satım işlemine ilişkin çabayı bağımsız olarak yürütmek ve söz konusu faaliyetleri her seferinde yeniden gerçekleştirmek durumundadır (Mucuk, 1982).

4.2. Dikey Pazarlama Sistemleri

Dikey pazarlama sistemleri, geleneksel dağıtım kanallarıyla rekabet edebilmek ve kanalın farklı aşamalarında ortaya çıkabilecek aynı hizmetin yinelenmesini önlemek, ölçek ekonomilerinden ve pazarlık güçlerinden yararlanmak amacıyla oluşturulmuştur. Bu sistemler, kanal üyeleri arasında daha etkili koordinasyon ve kaynak kullanımını mümkün kılmakta ve yatırımların getirisini artırmaktadır.

Yönetim ve denetim ilişkileri açısından değerlendirildiğinde, dikey pazarlama sistemleri üç ana kategori altında sınıflandırılabilir.

4.2.1. Yasal bütünleşme sistemi

Dağıtım kanalında ardışık aşamalarda faaliyet gösteren işletmelerin yasal olarak tek bir mülkiyet çatısı altında birleşmesi, dikey entegrasyonun kurumsal biçimini oluşturmaktadır. Bu durumda, kanalın herhangi bir aşamasında yer alan işletme, diğer aşamalardaki işletmeleri ya satın alarak ya da yeniden yapılandırarak yasal bütünleşmeyi sağlamaktadır.

Yasal bütünleşme sistemi, üretim ve dağıtımın birbirini takip eden aşamalarının tek bir sahiplik altında toplanması sonucunda meydana gelmektedir ve kanal üzerinde tam kontrol ve koordinasyon imkânı sunmaktadır.

4.2.2. İdari bütünleşme sistemi

Bu sistemde, dağıtım kanalını oluşturan üyelerin koordinasyonu ve denetimi, ekonomik açıdan güçlü olan bir veya birkaç kanal üyesi tarafından yürütülmektedir. Genellikle kanal lideri konumundaki üye, sahip olduğu ekonomik güç ve kaynakları kullanarak, daha zayıf üyelerin faaliyetlerini kendi belirlediği doğrultuda sürdürmelerini sağlamaktadır.

4.2.3. Sözleşmeye dayalı dikey pazarlama sistemleri

Sözleşmeye dayalı dikey pazarlama sistemleri, üretim ve dağıtımın farklı aşamalarında faaliyet gösteren bağımsız işletmelerin, pazarlama çabalarını tek başlarına elde edebileceklerinden daha yüksek satış hacimlerine ulaşmak ve çeşitli avantajlar sağlamak amacıyla yazılı bir sözleşme aracılığıyla uyumlaştırmaları ile ortaya çıkmaktadır.

Bu sistemde, bağımsız kanal üyeleri belirli alanlarda sözleşmeye dayalı işbirliği yapmaktadır. Temel hedef, diğer pazarlama sistemleri karşısında rekabet gücünü korumaktır. Sözleşmeye dayalı dikey pazarlama sistemleri farklı şekillerde uygulanmakta olup, bu uygulamalar genel olarak üç ana kategori altında sınıflandırılabilir.

- Toptancının kurduğu gönüllü zincirler,
- Perakendecilerin kurduğu gönüllü işbirliğine dayalı sözleşmeli dikey pazarlama sistemleri,
- Franchising örgütleri (bunlara imtiyaz örgütleri veya bayilik örgütleri de denmektedir).

4.2.3.1. Toptancının kurduğu gönüllü zincirler

Toptancılar öncülüğünde oluşturulan bu sistem, bağımsız perakendecilerin, pazarda varlıklarını sürdürebilmeleri için gerekli satış hacmini sağlamak amacıyla tek bir çatı altında toplanmasını hedeflemektedir. Sistem, bütünleşmiş pazarlama yapılarına karşı bir alternatif olarak geliştirilmiş olup, toptancının rolünü merkezî bir koordinatör olarak kullanarak perakendecilerin ortak fayda elde etmelerini sağlamaktadır.

4.2.3.2. Perakendecilerin gönüllü işbirliğine dayalı sözleşmeli dikey pazarlama sistemi

Bu sistem, bağımsız perakendecilerin rekabet güçlerini artırmak amacıyla bir araya gelmeleriyle oluşmaktadır. Bağımsız perakendeciler, örgüt içindeki bir üye aracılığıyla toptancı işlevlerini üstlenebilir, ortak reklam faaliyetlerine katılabilir ve tedariklerini daha ekonomik bir şekilde gerçekleştirebilmek için örgütün sağladığı toptancı hizmetlerinden faydalanabilirler. Son yıllarda bu tür uygulamaların çeşitliliği ve kapsamı önemli ölçüde artmıştır.

4.2.3.3. Franchising örgütlerine, bayilik örgütleri

Franchising örgütlerine “bayilik örgütleri” denilmesinin nedeni, özellikle Amerika Birleşik Devletleri’nde “franchising” teriminin, her tür bayilik yapılanmasını kapsayacak şekilde geniş anlamda kullanılmasıdır (Mahanoğlu, 2003).

Daha dar bir anlamda franchising, örgütü yöneten liderin, iş yapmak isteyen üyelere belirli bir işi yürütme yetkisi verdiği ve bu yetki kapsamında çeşitli destekler sağladığı, karşılığında ise üyenin lidere belirli bir ödeme yaptığı, sözleşmeye dayalı sürekli bir işbirliği biçimidir.

Lider, üyeye yalnızca marka ve firma imajını kullanma hakkı vermekle kalmayıp, aynı zamanda pazar araştırması, reklam ve satış yöntemleri konularında destek sağlamakta; yönetim süreçlerinde rehberlik yapmakta, üye ve personelinin eğitimini üstlenmekte ve bölgesel imtiyaz hakları tanımaktadır (Kurdoğlu, 1982).

4.3. Bayilik

Dağıtım sistemi, zaman içinde kendi üyelerini ve fonksiyonlarını geliştirmiştir. Bu sistemin en önemli üyelerinden biri bayi veya acentedir. Üretici işletmeler, ürettikleri mal ve hizmetlerin dağıtımını yönetmeye yeterli zaman ve kaynağa sahip olamamak veya üretim faaliyetlerine öncelik vermek amacıyla, dağıtım görevini bağımsız işletmelere devretmeyi tercih etmektedirler. Bu çerçevede, üretici işletme, belirli bir mal veya hizmetin dağıtımını, bağımsız bir işletmeye belirli bir bölge ve süre için devredebilir.

Bayilerden, bulundukları bölgede üretilen mal ve hizmetlerin tüketiciler tarafından tercih edilmesini sağlamak ve satış hacmini artırmak amacıyla faaliyet göstermeleri beklenmektedir. Ancak bu beklentiler her zaman tam olarak gerçekleşmemektedir. Bu nedenle, bayilik sistemi kurulduktan sonra bayilerin etkin bir şekilde denetlenmesi büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, bayilerin temsil ettikleri işletmeyi daha iyi tanıyabilmeleri ve markaya uygun faaliyet göstermeleri için eğitim programları uygulanabilir.

Ülkemizde bayilik sistemi, dünyadaki benzer uygulamalardan farklı olarak toplumsal açıdan daha büyük bir öneme sahiptir. Bunun nedeni, yasal düzenlemelerin henüz yerleşmediği birçok alanda, bayilerin girişimci bir rol üstlenerek risk almasıdır. Örneğin, taksitli satış uygulamalarının ülkemizde yaygınlaşması ve kabul görmesi, bayilerin etkin çalışmaları sayesinde mümkün olmuştur.

5. MOBİLYA SEKTÖRÜNDEN SERHAT MOBİLYA HAKKINDA BİLGİLER

- **Firmanızın tarihi hakkında bilgi verir misiniz?**

Firmamız, 1970'li yıllarda H. Nuh Akkaş tarafından küçük ölçekli bir esnaf işletmesi olarak kurulmuştur. Kuruluşun ilk dönemlerinde mobilya sektöründe sınırlı bir mağazada faaliyet gösteren SERHAT MOBİLYA, zaman içerisinde hem büyüyerek hem de iş kapasitesini artırarak üretim, pazarlama ve satış alanlarında faaliyet gösteren öncü firmalardan biri hâline gelmiştir.

- **Firmanızda hangi tür örgüt yapısını kullanıyorsunuz?**

Firmamız genelde karma örgüt yapısını kullanmaktadır.

- **Bu örgüt yapısını kullanmanızın sebebi nedir?**

Bizler çok farklı alanlarda satış yaptığımız için mesela gelir seviyesi düşük kesime satış yaptığımız gibi gelir seviyesi çok yüksek kesime de hitap ediyoruz. Açıkçası toplumdaki tüm kitlelere hitap ettiğimizi söyleyebiliriz.

- **Firmanızın satışçıların seçiminde göz önünde bulundurduğu kriterler nedir?**

Satış personelinin seçimi sürecinde, adayların deneyim düzeyi, eğitim seviyesi, ikna yeteneği ve fiziksel uygunlukları öncelikli değerlendirme kriterleri arasında yer almaktadır.

- **Kullandığınız ücretlendirme sistemi nelerdir?**

Mağaza içi satışçılarımızda maaş, dışarıdaki satışçılarıma ise maaş + prim sistemi uyguluyoruz.

- **Satıcıları işine motive ederken hangi yöntemleri kullanıyorsunuz?**

Gruplar arasında rekabet ortamı hazırlayarak sonunda başarılı olan grupları ödüllendirme yoluna gidiyoruz.

- **Firmanızın ödüllendirme ilkeleri hakkında bilgi verir misiniz?**

Satışlar sonrası müşterilerin izlenimleri bizim için çok önemlidir. Çok satış yapıp müşteri kazanmaktansa, az satışla çok müşteri kazanmak bizim için prensiptir. Bu şartları göz önünde tutarak satışçıların performansını ölçerek gerekli ödüllendirmeyi yaparız.

- **Satışçılara verdiğiniz eğitim hakkında bilgi verir misiniz?**

Satışçılarımızı genelde eğitilmiş ve tecrübeli insanlardan seçiyorum. Çünkü bulunduğumuz sektör alanında deneyimli ve eğitilmiş satıcı bulmak zor değil. Verdiğimiz eğitim firmanın prensipleri hakkında küçük ve önemli birkaç süreçten oluşmaktadır.

- **Satışçılarınızı bölgelere göre atamasını yaparken nelere dikkat ediyorsunuz?**

Satışçılarımızı o bölgenin coğrafi şartlar, kültürü ve gelir durumları hakkında bilgi durumlarına göre atama yapıyoruz.

- **Firmanızın Pazar payı hakkında bilgi verir misiniz?**

Firmanız mobilya, kanepe, yatak ve ev tekstil üretiminde Türkiye’de ilk 10 firma arasında yer almaktadır.

- **Satış sonrası hizmetlere önem veriyor musunuz?**

Bizim için en önemli noktalardan birisi satış sonrası hizmettir. Yaptığımız hizmetler montaj, bakım, eve teslim ve garantidir.

- **Satış bölgelerini oluştururken hangi kriterleri göz önüne alıyorsunuz?**

Satış bölgeleri oluştururken bölgedeki yaşam standartlarının ürünlerimizle olan ilişkisini araştırırız.

- **İthalat-İhracat yapıyor musunuz?**

İtalya’dan mobilya takımları getirip müşterinin hizmetine sunuyoruz. Buradaki ürünlerimizi de Avrupa ülkelerindeki bayilerimize gönderiyoruz.

- **Müşteri şikâyetlerini nasıl karşılıyorsunuz?**

Müşteri şikâyetlerini yerinde ve en kısa zamanda halletmeye çalışıyoruz. Bununla ilgili olarak servis araçlarımızın gündüz saatlerinde müşterinin kendisine ulaşacak isteklerini cevaplamaktadırlar.

- **Fiyat politikamız hakkında bilgi verir misiniz?**

Fiyatlarımızı kaliteyle orantılı tutmaya çalışıyoruz.

- **Dağıtım kanallarını ve maliyetini neye göre belirliyorsunuz?**

Dağıtım kanalı olarak bayilikler, satış mağazaları, showroomlar vb. aracılığıyla talep miktarına göre belirliyoruz.

- **Satış miktarını adet bazında mı, lira bazında mı yapıyorsunuz?**

Adet bazında yapıyoruz.

6. SONUÇLAR

Günümüzde teknoloji ve küreselleşme, ekonomik ve toplumsal değişim süreçlerini birlikte şekillendirmektedir. 1980’li yılların sonlarına gelindiğinde, dünya ekonomisi ve siyasal yapısı hızlı bir dönüşüm sürecine girmiştir. Ulusal egemenlik anlayışı yeniden ele alınmış, daha önce yalnızca ulusal düzeyde değerlendirilen konular giderek uluslararası bir boyut kazanmış, sermayenin serbest dolaşımı artmış ve sınırların önemi azalarak ulusal rekabet yerini küresel rekabete bırakmıştır.

Uluslararası ticaret ve yatırım engellerinin azalmasıyla birlikte, ulusal piyasalar birbirine daha bağımlı hâle gelmiş ve rekabet baskısı önemli ölçüde artmıştır. Bu bağlamda, firmalar rekabetçi ve dinamik bir çevrede varlıklarını sürdürmek için, rakipleriyle kıyasıya rekabet etmeye, daha kaliteli ürünleri maliyet etkin biçimde üretmeye, stratejik planlarını yeniden gözden geçirmeye ve dünya ölçeğinde kâr elde etme hedefi doğrultusunda faaliyet göstermeye başlamışlardır.

Artan ticaret ve yatırım hacmi son derece güçlü bir küresel rekabete yol açınca, şirketler arasındaki ortaklık ihtiyacı da hızla artmıştır. Ulusal piyasada ya da dünya piyasalarında rekabet etmek isteyen firmalar faaliyetlerini artık global bir temel üzerine koordine etmek, üretim sistemlerini uluslararası bir esas üzerine entegre ederek küresel olmak zorundadır.

Uluslararası şirket stratejileri her geçen gün artan rekabet koşullarında esnek olabilme kabiliyetini de bünyesinde taşımak zorundadır. Son yıllarda değişen stratejiler de buna örnek olarak gösterilebilir.

KAYNAKÇA

- Biçer, D. F. (2015). Sosyal medyanın viral (elektronik ağızdan ağıza) pazarlama ve tüketici satın alım niyetine etkileri. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Chaffy, D. ve Chadwick, F. E. (2016). *Digital marketing: Strategy, implementation and practice*. Harlow: Pearson.
- Durmaz, Y., & Efendioğlu, I. H. (2016a). *Travel from traditional marketing to digital marketing*. Global Journal of Management and Business Research.
- Durmaz, Y., & Efendioğlu, I. H. (2016b). *Brand Management in Retailing with Customer and Producer Perspective*. IOSR Journal of Business and Management (IOSR-JBM) 18 (7)
- Kurdoğlu, Ç. (1982). *Üretimin Uluslararasılaşması ve Teknolojik Gelişme*. Ankara.
- Kurtuluş, K. (1976). *Pazarlama Araştırmaları*. İstanbul.
- Mahanoğlu, E. (2003). İlaç dağıtım kanallarında müşteri memnuniyeti. (Ankara Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi)
- Mucuk, İ. (1982). *Pazarlama İlkeleri*. İstanbul.
- Tek, Ö. B. (1990). *Pazarlama İlkeler ve Uygulamalar*. İzmir.
- Tokol, T. (1978). *Pazarlama Araştırması*. Ankara.
- Tortop, N. (1978). *Halkla İlişkiler*. Ankara.
- Yükselen, C. (1989). *Temel Pazarlama Bilgileri*. Ankara.

BÖLÜM 10

ARAMİD FİBER TAKVİYELİ KOMPOZİTLERİN MEKANİK, DİNAMİK, BALİSTİK, TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİ, ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ VE YAPAY ZEKA UYGULAMALARI

Benek HAMAMCI¹

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Kafkas Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 0000-0002-5180-6798

1. Giriş

Aromatik Poliamid kelimelerinin kısaltılmasıyla türetilen aramid, U.S. Federal Trade Commission tarafından, amid bağlarının (-CO-NH-) en az %85' inin doğrudan iki aromatik halkaya bağlı olduğu uzun zincirli sentetik poliamid lifleri olarak tanımlanmaktadır [1]. Bu tanım, aramidleri naylon gibi alifatik poliamidlerden kesin bir çizgiyle ayırmaktadır. Aromatik halkaların varlığı, polimer zincirine olağanüstü bir termal kararlılık ve mekanik rijitlik kazandırmaktadır. Aramid liflerinin tarihsel gelişimi, eski dönemlerin teknolojik yarışına ve uzay çağı gereksinimlerine dayanmaktadır. 1960'ların başında, DuPont firması tarafından piyasaya sürülen ve meta-aramid sınıfına giren Nomex, üstün ısı direnci ile koruyucu giysilerde bir devrim yaratmıştır. Bunu takiben, 1970'lerin başında geliştirilen para-aramid Kevlar, çelikten beş ila yedi kat daha yüksek mukavemet/ağırlık oranı sunarak balistik koruma, havacılık ve denizcilik uygulamalarında yeni bir dönem başlatmıştır. Günümüzde aramid ailesi, Kevlar, Twaron, Technora ve Nomex gibi markalarla temsil edilmekte ve mühendislik malzemeleri spektrumunda vazgeçilmez bir yer tutmaktadır [1-4].

Kompozit malzemeler, aramid liflerinin keşfi ve ticarileşmesi ile köklü bir değişim geçirmiştir. Aramid fiber takviyeli kompozitler, yalnızca yüksek mukavemetlerinden değil, aynı zamanda düşük yoğunlukları, mükemmel darbe sönümleme kapasiteleri ve korozyon dirençlerinden gözleri üstüne toplamış ve endüstride tercih sebebi olmuştur [4, 5]. Metallerin ve hatta cam veya karbon fiberlerin yetersiz kaldığı özellikle darbe tokluğunun ve titreşim sönümlemenin kritik olduğu dinamik yükleme senaryolarında aramidler benzersiz çözümler sunmaktadır. Ancak, bu malzemelerin kompozit matrisler içerisindeki davranışları, inorganik liflerden belirgin şekilde farklıdır. Aramid liflerinin organik kimyası, anizotropik mekanik özellikleri ve yüzey enerjisi karakteristikleri, kompozit tasarımında, üretiminde ve işlenmesinde spesifik mühendislik yaklaşımlarını zorunlu kılmaktadır [6].

2. Aramid Liflerinin Kimyası, Sentezi ve Mikroyapısal Özellikleri

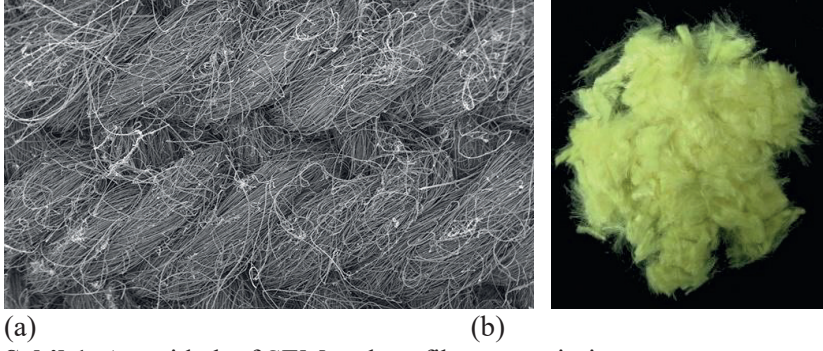
Bir kompozit malzemenin makro ölçekteki performansı, takviye elemanının moleküler düzeydeki mimarisi ile doğrudan ilişkilidir. Aramid liflerinin sentez süreci ve kimyasal yapısı, onların neden süper lif olarak adlandırıldığını anlamak için temel teşkil eder.

2.1. Polimerizasyon Kinetiği ve Çözücü Sistemleri

Para-aramidlerin en bilinen üyesi olan poli (p-fenilen tereftalamid) (PPTA), p-fenilendiamin (PPD) ve tereftaloil klorür (TPC) monomerlerinin düşük sıcaklıkta polikondenzasyonu ile sentezlenir [7]. Bu reaksiyon, polimer zincirlerinin büyümesi ve istenen molekül ağırlığına ulaşılması açısından son derece hassas stokiometrik kontrol gerektirir. PPTA'nın rijit çubuk benzeri yapısı, onun erimesini engeller ve geleneksel çözücülerde çözünmesini imkansız kılar. Bu çözünürlük sorunu, polimerizasyon sürecinde özel çözücü sistemlerinin kullanılmasını zorunlu kılar. Endüstriyel standart, N-metil-2-pirolidon (NMP) içerisinde inorganik tuzların, özellikle kalsiyum klorür veya lityum klorür katkısıyla gerçekleştirilen bir çözelti polimerizasyonudur. Burada CaCl_2 'nin rolü kritiktir. Amid grupları ile kompleks oluşturarak büyüyen polimer zincirlerinin çözücü içinde daha uzun süre asılı kalmasını sağlar ve erken çökelmeyi önler. Araştırmalar, NMP/ CaCl_2 sisteminin reaksiyon sırasında yarı kararlı bir jel fazı oluşturduğunu göstermektedir. Bu jel fazı, polimerin yüksek molekül ağırlıklarına ulaşana kadar çözelti halinde kalmasına olanak tanıyan hayati bir ara durumdur. Son dönem araştırmaları, bu geleneksel sistemlere alternatif olarak iyonik sıvıların kullanımını da incelemekte ve bu yöntemle sentezlenen PPTA'nın viskozite değerlerinin endüstriyel standartlara yaklaştığını göstermektedir [8].

2.2. Sıvı Kristal Davranışı ve Eğirme Süreci

PPTA'nın en belirleyici özelliği, liyotropik sıvı kristal davranış göstermesidir. Polimer, derişik sülfürik asit içerisinde çözüldüğünde, rijit moleküler zincirler kendiliğinden paralel bir düzende hizalanarak sıvı kristal alanları oluşturur. Bu anizotropik çözelti, kuru-jet yaş eğirme yöntemi ile lif haline getirilir. Süreç şu şekilde işlemektedir. Sıvı kristal çözelti, bir spinneret içerisinde basınçla geçirilir. Düzeden çıkan jet, bir hava boşluğundan geçer. Bu bölge, sürecin en kritik aşamasıdır. Zira hava boşluğundaki çekme kuvvetleri, polimer zincirlerinin lif eksenini boyunca neredeyse mükemmel bir şekilde oryante olmasını sağlar. Lifler daha sonra soğuk su banyosuna girerek katılaşır ve asitten arındırılır [9].

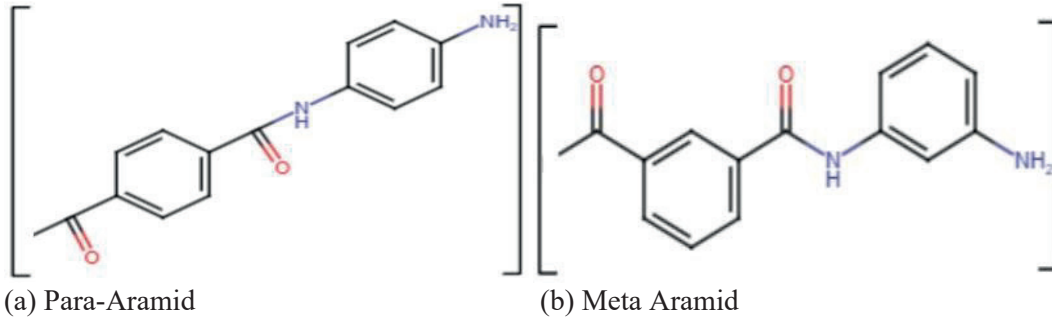


Şekil 1. Aramid elyaf SEM ve kısa fiber gösterimi

Elde edilen mikroyapı, radyal olarak düzenlenmiş ve lif eksenine boyunca uzanan pilili levhalar şeklindedir. Bu levhalar, hidrojen bağları ile birbirine tutunurken, levhalar arası etkileşim daha zayıf Van der Waals kuvvetleri ile sağlanır. Bu yapısal anizotropi, aramid liflerinin neden boyuna yönde inanılmaz bir çekme mukavemetine sahipken, enine yönde ve basma yükleri altında zayıf olduğunu açıklar [7, 10]. Şekil 1’ de SEM görüntüleri ve kısa aramid fiber yapısı görülmektedir.

2.3. Para-Aramidler ve Meta-Aramidler Arasındaki Yapısal Farklar

Aramid ayrımı, kimyasal bağların aromatik halka üzerindeki konumuna dayanmaktadır. Para-Aramidler, amid bağları, benzen halkasının 1 ve 4 numaralı karbonlarına bağlıdır. Bu doğrusal geometri, zincirlerin sıkı bir şekilde paketlenmesine ve yüksek kristaliniteye izin verir, bu da yüksek modül ve mukavemet sağlar. Meta-Aramidlerde bağlar, 1 ve 3 numaralı karbonlar üzerindedir. Bu kırık veya zikzak yapı, zincirlerin doğrusal olarak hizalanmasını engeller. Sonuç olarak, meta-aramidler para-aramidlere göre daha düşük mukavemete sahiptir ancak mükemmel termal ve elektriksel yalıtım özellikleri sunarlar. Şekil2’ de para-aramid ve meta-aramid kimyasal yapılarını gösterilmektedir.



Şekil 1. Para-aramid ve Meta -aramid kimyasal yapıları

Kevlar türleri ve mikroyapısal varyasyonları ise endüstriyel uygulamalarda kullanılan Kevlar lifleri, uygulanan ısı işlemleriyle farklı özellikler kazanır. Kevlar 29 standart tokluk sınıfıdır, balistik ve halat uygulamalarında kullanılır. Kevlar 49 gerilim altında ısı işleme tabi tutulur. Bu işlem kristaliniteyi ve moleküler oryantasyonu artırarak modülü yükseltir, ancak kopma uzamasını düşürür. Havacılık kompozitlerinde standarttır. Kevlar 149 Ultra yüksek modül varyantıdır ve rijitlik açısından karbon fiberlere en yakın davranışı sergiler [11].

3. Aramid Kompozitlerin Fiziksel, Mekanik, Dinamik, Balistik, Tribolojik Özellikleri

3.1. Fiziksel Özellikleri

3.1.1. Düşük Yoğunluk ve Hafiflik

Aramid kompozitlerin en belirgin fiziksel karakteristiklerinden olan özellikler düşük yoğunluk ve hafifliktir. Aramid lifleri, yüksek özgül çekme mukavemeti ile karakterize edilir ve yoğunluğu cam fiberin neredeyse yarısı kadardır. Aramid lifleri, çelikten beş ila yedi kat daha yüksek bir

mukavemet/ağırlık oranı sunmaktadır. Standart bir aramid lifinin yoğunluğu yaklaşık 1.44 g/cm^3 iken, bu değer karbon fiberde yaklaşık 1.76 g/cm^3 , E-cam fiberde ise 2.55 g/cm^3 seviyelerindedir [3, 5, 12].

3.1.2. Termal Kararlılık ve Negatif Genleşme

Aramidler, termoplastiklerin aksine belirgin bir erime noktasına sahip değildir. Lifler, 427°C ile 482°C arasındaki sıcaklıklara kadar yapısal bütünlüğünü korur ve bu noktadan sonra bozunmaya başlar. Örneğin fren balataları gibi yüksek sürtünme ısısı üreten alanlarda kritik olduğunu vurgulamaktadır. Aramid lifleri, ısıtıldığında boyca uzamak yerine kısılma eğilimi gösterir buda negatif boyuna termal genleşme katsayısına sahip olduğu anlamındadır. Bu fiziksel özellik, polimer zincirlerinin ısı altında enine titreşiminin artarak boyuna eksenini kısaltmasıyla açıklanır [13, 14].

3.1.3. Nem Duyarlılığı

Aramid liflerinin fiziksel olarak en zayıf yönlerinden birinin nem emme davranışı olduğunu teyit etmektedir. Lifler doğası gereği nem çekicidir ve ortam koşullarına bağlı olarak ağırlıklarının %3 ile %7'si oranında nem absorbe edebilirler. Bu durum, kompozit üretiminde boşluk oluşumuna yol açabileceği için üretim öncesi kurutma işlemi fiziksel bir zorunluluktur [15].

3.1.4. UV Radyasyonuna Karşı Fiziksel Bozunum

Aramidlerin güneş ışığına (UV) karşı fiziksel hassasiyeti mevcuttur. UV ışınlarına maruz kalan liflerin rengi sararır ve yüzeylerinde fiziksel bir bozulma meydana gelir. Bu fotokimyasal bozunma, lifin yüzey enerjisini ve mukavemetini düşürür. Bu nedenle dış ortam uygulamalarında liflerin fiziksel olarak izole edilmesi önerilir [16].

3.1.5. Kimyasal Direnç

Aramid lifleri, moleküler yapılarındaki güçlü aromatik halkalar ve hidrojen bağları sayesinde kimyasal olarak **pasif** bir davranış sergiler. Bu pasiflik, lifin dış ortamdaki maddelerle reaksiyona girmesini zorlaştırır ve malzemenin ömrünü uzatır. Endüstriyel uygulamalarda aramidlerin en güçlü olduğu alanlardan biri organik kimyasallara karşı gösterdiği dirençtir. Aramid lifleri, çoğu organik çözücüye, endüstriyel yağlara ve yakıtlara karşı tam direnç gösterir. Bu maddelere maruz kaldığında şişme, çözünme veya mekanik özelliklerinde belirgin bir kayıp yaşanmaz. Bu sayede otomotiv ve havacılık sektörlerinde güvenle kullanılırlar. Normal koşullarda asit ve bazlara karşı dirençlidirler. Ancak geri dönüşüm süreçlerinde, lifleri matrizen ayırmak veya bozundurmak için koşullar veya özel kimyasal solvoliz yöntemleri gerekmektedir. Bu durum, malzemenin standart çevre koşullarında ne kadar dirençli olduğunun dolaylı bir kanıtıdır [17, 18].

3.2. Mekanik Performans

Aramid lifleri, yüksek özgül çekme mukavemeti ile karakterize edilir [19]. Standart para-aramid lifleri yaklaşık 3-3.6GPa çekme mukavemetine sahiptir [20]. Bu değer yüksek mukavemetli karbon fiberlerle yarışır düzeydedir ancak yoğunluğu cam fiberin neredeyse yarısıdır. Bu düşük yoğunluk, hafifliğin kritik olduğu havacılık yapılarında büyük bir avantaj sağlar [18, 21]. Ancak, aramidlerin basma mukavemetinde daha zayıftır. Lifler, basma yükü altında çekme mukavemetlerinin çok daha altında bir değerde deforme olur [22]. Bu durum, polimer zincirlerinin basma altında bükülmesi ve kink bandı oluşturmasıyla açıklanır. Bu plastik deformasyon mekanizması, aramid kompozitlerin gevrek kırılma yerine sünek bir davranış sergilemesini sağlar, ancak aynı zamanda yüksek basma yükü taşıyan yapısal elemanlarda tek başına kullanılmasını sınırlar. Bu nedenle, aramidler sıklıkla karbon fiber ile hibritlenerek kullanılır [23].

3.3. Dinamik Performans

Aramid kompozitler, özellikle darbe tokluğu ve titreşim sönümlemenin kritik olduğu dinamik yükleme senaryolarında benzersiz çözümler sunar [24]. Aramid lifleri, özellikle darbe, şok ve titreşim gibi dinamik yükleme koşulları altında, gevrek karaktere sahip karbon ve cam elyaflara kıyasla üstün enerji sönümleme kapasitesi ve tokluk sergilemektedir. Özellikle karbon fiber kompozitlerin düşük darbe direncini iyileştirmek amacıyla aramid liflerinin hibrit sistemlerde kullanılmasına odaklanılmıştır. Aramid/karbon hibrit yapılarının darbe enerjisini sönümlemede saf karbon yapılarına göre belirgin şekilde daha yüksek performans gösterdiğini kanıtlamıştır. Düşük hızlı darbe testlerinde aramid katmanların

varlığı, yapının delinme direncini artırarak hasarın geniş bir alana yayılmasını ve böylece enerjinin sönümlenmesini sağlamaktadır. Yüksek hızlı dinamik yüklemelerde ise, aramid liflerinin yüksek elastisite modülü ve düşük yoğunluğu, mermi veya şarapnel enerjisinin etkin bir şekilde dağıtılmasına olanak tanımaktadır [25–27].

3.4. Balistik Performans

Aramid liflerinin en ikonik kullanım alanı balistik korumadır [28]. Liflerin yüksek ses hızı ve yüksek kopma uzaması, mermi darbesinin enerjisini çok geniş bir alana yayarak sönümlenmesini sağlar. Aramidin balistik başarısını sadece lifin mukavemetine değil, sistemin enerji dağıtma hızına bağlamaktadır. Mermi malzemeye çarptığında, doğrudan temas eden birincil iplikler çekme gerilimi altında koparken, bunlarla kesişen ikincil iplikler sürtünme kuvvetleri sayesinde yükü geniş bir alana yayar. Çalışmalar, iplikler arası sürtünmenin enerji sönümlenmede kritik olduğunu göstermiştir. Sürtünme ne kadar optimize edilirse iplik sıyrılması o kadar zorlaşır ve kumaş daha fazla enerji yutar. Merminin arkasında oluşan deformasyon konisi, enerjinin dağıtıldığı hacmi temsil eder. Aramidlerin yüksek ses hızı (düşük yoğunluk/yüksek modül), bu koninin hızla genişlemesini ve enerjinin lokal bir noktada birikip delinmeye yol açmasını engeller [14]. Ayrıca aramidler yüksek ve düşük sıcaklıklara dayanımları ile UHMWPE gibi rakiplerine göre termal şoklara daha dirençlidir. Bu durum, sürtünme ısısının yükseldiği balistik çarpışmalarda malzemenin eriyerek delinmesini engeller. Aramid katmanlar, kalan enerjiyi esnek deformasyon yoluyla sönümler ve kullanıcının vücuduna iletilen travmayı azaltırlar [29].

3.5. Tribolojik Performans

Asbestin yasaklanmasından sonra, aramid fiberler otomotiv fren balatalarında ve debriyaj disklerinde ana takviye malzemesi olmuştur. Fren balataları, reçineler, metal tozları, yağlayıcılar ve dolgu maddelerinden oluşan karmaşık bir karışımdır. Aramid, fibrilleşmiş benzersiz yapısı sayesinde bu toz karışımı içinde mekanik bir ağ oluşturur. Bu yapı, karışımın kalıplama öncesindeki taşınma ve presleme aşamalarında formunu korumasını sağlayan mukavemet artırır. Düşük oranlarda eklenen aramid bile, karışımın segrege olmasını engelleyerek homojen bir fren balatası üretilmesini mümkün kılar. Frenleme sırasında aramid liflerinin en kritik rolü, disk ile balata arayüzeyinde kararlı bir transfer filmi veya üçüncü cisim tabakası oluşturmaktır. Aramid, frenleme esnasında disk yüzeyine ince, polimerik bir film tabakası sıvanmasına yardımcı olur. Bu film, diskin metal yüzeyi ile balatanın doğrudan temasını keserek hem sürtünme katsayısını stabilize eder hem de diskin aşınmasını önler [30–32]. Yapılan mikroskobik analizler, aramid bazende aramide farklı metal tozlarının balatalara eklenmesiyle frenleme sırasındaki gürültü ve titreşimi azalttığını göstermektedir [33]. Aramid lifleri, yüksek sıcaklıklarda bile mekanik özelliklerini büyük ölçüde korur. Bu termal kararlılık, fren sistemlerinde sıkça karşılaşılan fade olayını, yani yüksek ısıda fren performansının düşmesini engeller. Araştırmalar, aramid içeriği arttıkça fren balatasının sürtünme katsayısının yükseldiğini ve yüksek sıcaklıklarda daha kararlı hale geldiğini göstermektedir. Ayrıca, aramid lifleri matris reçinesini güçlendirerek, frenleme sırasındaki yüksek makaslama kuvvetlerine karşı direnç sağlar ve balatanın koparak parça kaybetmesini engeller [34].

4. Aramid Kompozitlerde Arayüzey Mühendisliği

Bir kompozit malzemenin performansı, yükün matristen ne kadar etkin aktarıldığına bağlıdır. Bu aktarım, lif ve matris arasındaki arayüzey bölgesinde gerçekleşir. Aramid lifleri, yüksek kristaliniteleri ve pürüzsüz, kimyasal olarak inert yüzeyleri nedeniyle, özellikle epoksi ve fenolik gibi termoset reçinelere yapışmakta zorluk çekerler. Zayıf arayüzey bağı, düşük tabakalar arası kayma mukavemetine ve erken hasara yol açar [3, 35].

4.1. Fiziksel Yüzey İşlemi

Plazma işlemi, aramid liflerinin yüzey enerjisini artırmak ve pürüzlülük oluşturmak için en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Plazma içindeki yüksek enerjili iyonlar ve radikaller, lif yüzeyindeki kimyasal bağları kırarak polar fonksiyonel grupların oluşmasını sağlar. Aynı zamanda yüzeyde mikro ölçekli çukurlaşmalar yaratarak mekanik kilitlemeyi artırır. Plazma işleminin süresi ve gücü kritik öneme sahiptir. Aşırı işlem, lifin dış kabuğunu zayıflatarak, arayüzey yapışmasını artırsa bile lifin kendi çekme mukavemetinde düşüşe neden olabilir [36, 37].

4.2. Kimyasal İşlemler

Aramid liflerinin yüksek kristalinitesinden kaynaklanan kimyasal eylemsizliği ve pürüzsüz yüzey morfolojisi, polimer matrislerle güçlü arayüzey bağları kurmasını engelleyen temel faktörlerdir. Bu yapısal kısıtı aşmak amacıyla uygulanan kimyasal yüzey işlemleri; asit dağlama, silan bağlayıcı ajan kullanımı ve son yıllarda öne çıkan doğrudan kimyasal aşılama yöntemlerini kapsamaktadır. Bu işlemler, lif yüzeyinde matris reçinesiyle kovalent bağ kurabilecek amin, hidroksil veya karboksil gibi aktif fonksiyonel grupların oluşumunu sağlarken, aynı zamanda yüzey pürüzlülüğünü artırarak mekanik kenetlenme mekanizmasını devreye sokar [38, 39]. Literatürde, agresif asitler yerine çevre dostu yaklaşımlar sunan biyomimetik yüzey modifikasyonlarının, lifin iç yapısına zarar verip çekme mukavemetini düşürmeden arayüzey kesme mukavemetini optimize ettiğini vurgulayan çalışmalar mevcuttur [40].

4.3. Nanoyapılandırma

Arayüzey alanını ve mekanik kilitlenmeyi maksimize etmek için lif yüzeyinde nanoyapılar büyütme veya biriktirme yöntemleri geliştirilmiştir. Aramid liflerinin yüzeyine karbon nanotüp veya grafen oksit eklenmesi, yüzey pürüzlülüğünü nanometre ölçeğinde artırır [41, 42]. Bu yapılar matris içerisine uzanarak yük aktarımını iyileştirir ve arayüzey kayma mukavemetini önemli ölçüde artırır [41].

5. Kullanım Alanları

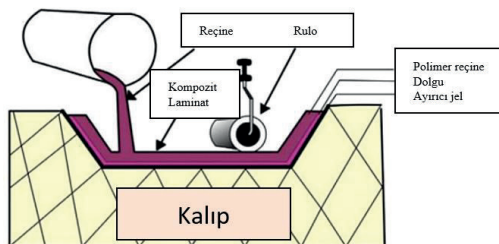
Aramid kompozitler, yüksek mukavemet, düşük ağırlık ve üstün darbe direnci gibi benzersiz özelliklerinden dolayı savunma sanayinden havacılığa kadar geniş bir yelpazede tercih edilmektedir. En bilinen kullanım alanı olan kurşun geçirmez yelek ve miğfer üretiminin yanı sıra, uçak kanatlarının iç kısımlarında, gövde panellerinde ve uzay araçlarının yapısal elemanlarında hafiflik sağlamak amacıyla sıklıkla kullanılırlar. Ayrıca otomotiv sektöründe yüksek ısıya dayanıklı fren balataları ve debriyaj disklerinde, denizcilikte tekne gövdelerinde, spor ekipmanlarında ise dayanıklı tenis racketleri, kano ve bisiklet gövdelerinde yaygın olarak yer bulurlar. Endüstriyel alanda ise optik lifli kabloların korunmasında ve basınç dayanıklı boruların üretiminde kritik bir rol oynarlar [4, 5, 18, 20, 28, 36].

6. Aramid Kompozitlerinin Üretim Teknolojileri

Kompozit malzeme üretimi, takviye lifleri ile matris fazının belirli tekniklerle bir araya getirilerek yapısal bütünlük kazandırıldığı karmaşık bir süreçtir. El yatırması ve vakum infüzyon gibi geleneksel yöntemlerden, yüksek hassasiyetli otoklavda kürlenme, filament sarma ve Reçine Transfer Kalıplama gibi ileri teknolojilere kadar geniş bir metodoloji yelpazesi bulunur. Bu süreçlerin başarısı, sıcaklık ve basınç çevrimleri, reçine viskozitesi, kürlenme süresi ve vakum seviyesi gibi kritik süreç parametrelerinin titizlikle kontrol edilmesine bağlıdır. Bu parametrelerdeki en ufak sapma, malzeme içerisinde boşluk oluşumuna, liflerin yanlış dizilmesine veya yetersiz sertleşmeye yol açarak nihai parçanın mekanik performansını doğrudan etkiler.

6.1. Elle Yatırma ve Vakum Torbalama

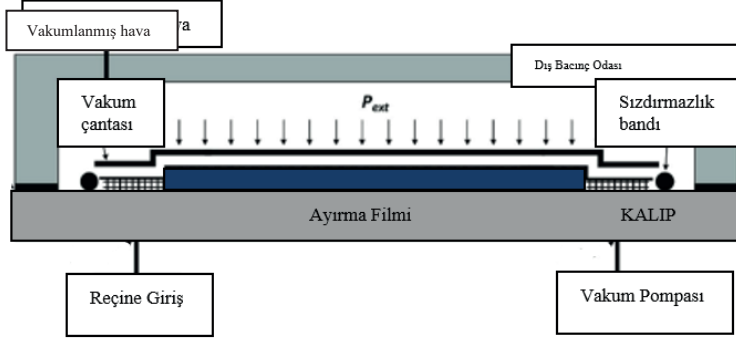
Elle yatırma, düşük kalıp maliyeti ve tasarım esnekliği nedeniyle prototip üretimi, tekne yapımı ve zırh panellerinin onarımında yaygın olarak kullanılır. Ancak aramid elyafların organik yapısı, bu basit süreci deneyim gerektiren bir sanat haline getirir. Elle yatırma yöntemine kıyasla %60' a varan lif hacim oranları ve %1' in altında gözenek oranı sunsa da, aramid elyafların infüzyon karakteristiği inorganik liflerden belirgin şekilde ayrılır [5, 43].



Şekil 2. Elle yatırma yöntemi [5]

6.2. Vakum İnfüzyon Yöntemi

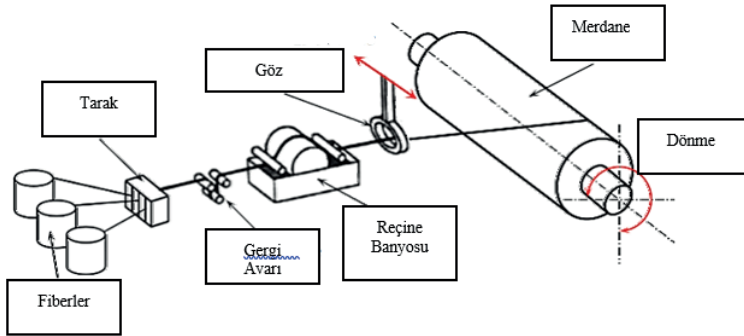
Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama veya yaygın adıyla Vakum İnfüzyon, özellikle geniş yüzeyli ve yüksek performanslı aramid kompozit parçaların üretiminde standart yöntem haline gelmiştir. Bu süreç, kuru lif takviyesinin tek taraflı bir kalıp üzerine yerleştirilmesi, esnek bir vakum torbası ile kapatılması ve atmosferik basınç farkı kullanılarak reçinenin yapıya emdirilmesi prensibine dayanır [44, 45]. Vakum destekli reçine transfer kalıplama yöntemi şekil 3' de gösterilmiştir.



Şekil 3. Vakum destekli reçine transfer kalıplama [5]

6.3. Filament Sarma

Basıncılı kaplar, roket motor gövdeleri ve boru hatları üretiminde kullanılan bu yöntemde, sürekli lif demetleri reçine banyosundan geçirilerek dönen bir mandrel üzerine sarılır. Filament sarma esnasında gergi Kontrolü yapmak önemlidir. Aramid lifleri için sarım gerginliği en kritik parametredir. Düşük gerginlik, liflerin gevşek kalmasına, buruşmasına ve yüksek boşluk oranına neden olur. Yüksek gerginlik ise lif hacim oranını artırır ancak artık gerilmeler yaratabilir. Özellikle kompozit sargılı basınçlı kaplarda, aramid liflerinin yüksek modülü ve sarım gerginliği, ince astarlar üzerinde büyük bir basınç oluşturur [46]. Şekil 4' de filament sarma yöntemişematik göstermektedir.

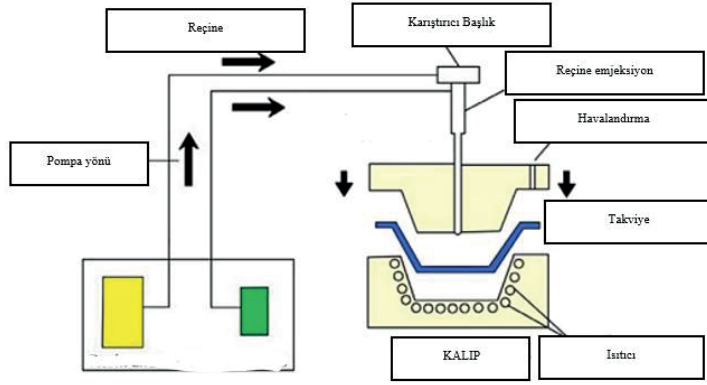


Şekil 4. Filament sarma yöntemi [47]

6.4. Reçine Transfer Kalıplama

Karmaşık geometrilere sahip yapısal parçaların üretiminde Reçine Transfer Kalıplama (RTM) tercih edilir.

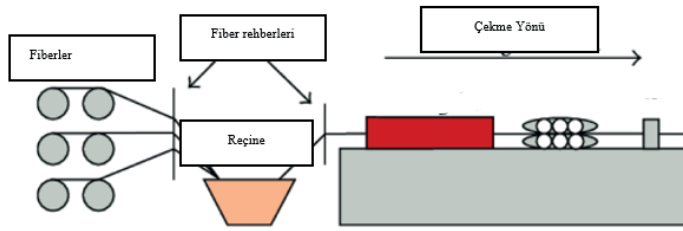
Aramid kumaşlar kalıp kapatıldığında sıkışır, bu da geçirgenliği azaltarak reçine akışını zorlaştırabilir. RTM işleminde, özellikle yüksek sıcaklıkta kürlenene epoksi sistemleri kullanıldığında, aramid liflerinin nem içeriği kritik bir sorundur. Lifler işlem öncesinde mutlaka kurutulmalıdır. Reçine viskozitesinin enjeksiyon sıcaklığında düşük tutulması, liflerin tam ıslanması için elzemdir [5, 48]. Şekil 5, geleneksel bir kompozit imalat reçine transfer kalıplama prosedürünü göstermektedir.



Şekil 5. Reçine transfer kalıplama [5]

6.5. Pultrüzyon

Sabit kesitli profillerin sürekli üretiminde kullanılan pultrüzyon, aramid için zorlu bir süreçtir. Şekil 6, kompozitler oluşturmak için kullanılan standart bir pultrüzyon yolunu göstermektedir. Aramid lifleri, kılavuz gözlerden ve reçine banyosundan geçerken sürtünme nedeniyle kolayca tüylenir. Bu tüyler, kalıp girişinde birikerek tıkanıklıklara yol açabilir. Ayrıca pultrüzyon hızı, reçinenin jel süresi ile dengelenmelidir. Aramid liflerinin düşük termal iletkenliği, kalıp içindeki ısı transferini etkiler [49].



Şekil 6. Pultrüzyon kompozit üretimi [5]

7. Aramid Kompozit Araştırmalarında Yapay Zeka

Son yıllarda malzeme bilimi, deneme-yanılma temelli geleneksel yöntemlerden, veri odaklı ve yapay zeka destekli yaklaşımlara doğru evrilmektedir. Aramid fiber takviyeli kompozitlerin karmaşık, doğrusal olmayan davranışları ve yüksek maliyetli deneysel süreçleri, Makine Öğrenimi (ML) ve Derin Öğrenme (DL) algoritmalarını bu alanda vazgeçilmez bir araç haline getirmiştir.

7.1. Mekanik Özelliklerin Tahmini

Aramid elyaf takviyeli polimer (AFRP) kompozitlerin mekanik davranışlarının karakterizasyonunda, geleneksel deneysel yöntemlerin yüksek maliyeti ve zaman alıcı doğası, son yıllarda araştırmacıları veri odaklı yaklaşımlara yöneltmektedir. Literatürdeki güncel çalışmalar, Yapay Sinir Ağları (ANN), Destek Vektör Makineleri (SVM) ve Rastgele Orman (Random Forest) gibi makine öğrenimi algoritmalarının; kompozitlerin çekme dayanımı, yorulma ömrü ve özellikle balistik darbe performansı gibi karmaşık lineer olmayan davranışlarını tahmin etmede yüksek başarı oranlarına ulaştığını göstermektedir [50, 51]. Bu algoritmalar, yalnızca makro mekanik özellikleri değil, aynı zamanda matris ile elyaf arasındaki arayüz dayanımını ve nano-dolgu maddelerinin yapısal bütünlüğe etkisini modellemede de etkin bir şekilde kullanılmaktadır [52]. Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) ile entegre çalışan bu hibrit modeller, binlerce fiziksel test gerekliliğini ortadan kaldırarak, nano-yapılı arayüzeylere sahip yeni nesil aramid zırh sistemlerinin optimizasyon sürecini günler mertebesinden saniyeler mertebesine indirmektedir [53].

7.2. Balistik Performansı Tahmini

Aramid elyaf takviyeli kompozitlerin yüksek hızlı darbe altındaki davranışlarının modellenmesi, malzemenin anizotropik yapısı ve deformasyon mekanizmalarının karmaşıklığı nedeniyle geleneksel yöntemlerle oldukça zordur [51]. Son dönem literatürü, Makine Öğrenmesi (ML) algoritmalarının,

özellikle Yapay Sinir Ağları (ANN) ve Destek Vektör Regresyonu (SVR), Genetik Algoritma (GA) modellerinin, balistik performansın kilit göstergeleri olan sınır hız, artık hız ve arka yüzey deformasyonu parametrelerini tahmin etmede deneysel verilerle yüksek korelasyon gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu veri tabanlı yaklaşımlar, pahalı ve yıkıcı balistik testlere duyulan ihtiyacı azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda aramid kumaşların katman dizilimi ve arayüzey özelliklerinin zırhın enerji sönmeme kapasitesine etkisini optimize etmek için de kullanılmaktadır. FEA ile eğitilen hibrit ML modelleri, merminin nüfuz etme derinliğini ve kompozit tabakalardaki hasar yayılımını saniyeler içinde simüle ederek yeni nesil hafif zırh sistemlerinin tasarım sürecini hızlandırmaktadır [54, 55].

7.3. Üretim Süreçlerinin Optimizasyonu

Aramid fiber üretim süreçlerindeki parametrelerin optimizasyonu için makine öğrenme metodlarında kullanılmaktadır [56]. Genetik algoritmalar, hibrit laminatların istifleme sırasını ve lif açılarını optimize ederek, belirli yükleme koşulları altında yapının ağırlığını azaltabilmektedir. Birde süreç kontrolü işlemlerinde de örneğin otoklav üretiminde sıcaklık ve basınç döngülerini kontrol etmek için YZ kullanılarak, artık gerilmelerin minimize edildiği ve üretim kalitesinin standartlaştırıldığı süreçler geliştirilmiştir [57].

8. Sonuç

Bu kapsamlı inceleme, aramid fiber takviyeli kompozitlerin sentez kimyasından nanoteknolojik modifikasyonlarına, zorlu üretim süreçlerinden yapay zeka destekli analizlerine kadar uzanan çok boyutlu dünyasını ortaya koymuştur. Aramid lifleri, rijit moleküler yapıları ve sıvı kristal eğirme süreçleri sayesinde, metalik malzemelerle yarışan mukavemet değerlerine ulaşırken polimerlerin hafiflik avantajını korumayı başarmıştır. Ancak literatürdeki veriler, bu malzemelerin sadece güçlü olmadığını, aynı zamanda yönetilmesi gereken karmaşık bir kişiliğe sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle basma yükleri altındaki kink bandı oluşumu, nem duyarlılığı ve matris ile zayıf arayüzey etkileşimi, mühendislik tasarımlarında dikkate alınması gereken temel kısıtlardır. Plazma aktivasyonu, polidopamin kaplamalar ve nanotüp hibritlemeleri gibi arayüzey mühendisliği stratejileri, bu kısıtları aşmak için kritik rol oynamaktadır.

İncelememizin son bölümünde detaylandırıldığı üzere, malzeme bilimi artık dijital bir devrimin eşiğindedir. Geleneksel deneme-yanılma süreçleri, yerini veri odaklı yaklaşımlara bırakmaktadır. Yapay zeka algoritmaları, balistik limit ve yorulma ömrü gibi pahalı test süreçlerini sanal ortamda yüksek doğrulukla simüle edebilmektedir. Derin öğrenme destekli görüntüleme teknikleri, üretim hatalarını mikron seviyesinde tespit ederek yapısal bütünlüğü garanti altına almaktadır.

Gelecekte aramid kompozitlerin, sadece pasif birer koruyucu veya yapısal eleman olmaktan çıkıp sensörlerle donatılmış, kendi sağlığını izleyen ve yapay zeka ile optimize edilmiş akıllı malzemelere dönüşmesi kaçınılmazdır. Aramid nanofiberlerin enerji depolama sistemlerindeki potansiyeli ve kimyasal geri dönüşümdeki gelişmeler de eklendiğinde, bu malzemelerin havacılıktan savunma sanayine, sürdürülebilir ve yüksek performanslı mühendislik çözümlerinin merkezinde kalmaya devam edeceği açıktır.

9. Kaynakça

1. Yang, H. H. (1993). *Kevlar Aramid Fiber*. John Wiley & Sons.
2. Gore, P. M., & Kandasubramanian, B. (2018). Functionalized Aramid Fibers and Composites for Protective Applications: A Review. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 57(49), 16537–16563. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b04903>
3. Zhang, B., Jia, L., Tian, M., Ning, N., Zhang, L., & Wang, W. (2021). Surface and interface modification of aramid fiber and its reinforcement for polymer composites: A review. *European Polymer Journal*, 147, 110352. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2021.110352>
4. Zhao, J. (2013). Effect of surface treatment on the structure and properties of para-aramid fibers by phosphoric acid. *Fibers and Polymers*, 14(1), 59–64. <https://doi.org/10.1007/s12221-013-0059-x>
5. Dharmavarapu, P., & M.B.S, S. R. (2022). Aramid fibre as potential reinforcement for polymer matrix composites: a review. *Emergent Materials*, 5(5), 1561–1578. <https://doi.org/10.1007/s42247-021-00246-x>
6. Patterson, B. A., Malakooti, M. H., Lin, J., Okorom, A., & Sodano, H. A. (2018). Aramid nanofibers for multiscale fiber reinforcement of polymer composites. *Composites Science and Technology*, 161, 92–99. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.04.005>
7. Güldiken, Ç. G., & Gerçel, H. F. (2024). Synthesis and modification of poly (p-phenylene terephthalamide) for production of light-weight hybrid composite armors reinforced with polymer composite nanofiber mats. *Polymer Composites*, 45(3), 2307–2323. <https://doi.org/10.1002/pc.27921>
8. Dewilde, S., Vander Hoogerstraete, T., Dehaen, W., & Binnemans, K. (2018). Synthesis of Poly-p-phenylene Terephthalamide (PPTA) in Ionic Liquids. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6(1), 1362–1369. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b03727>
9. Teng, C., Li, H., Liu, J., Gu, H., Kong, H., & Yu, M. (2020). Effect of High Molecular Weight PPTA on Liquid Crystalline Phase and Spinning Process of Aramid Fibers. *Polymers*, 12(5), 1206. <https://doi.org/10.3390/polym12051206>
10. Lyu, J., Kim, H., Kim, M. W., Kim, J., Choi, H., Lee, D., ... Chae, H. G. (2025). Optimizing p-aramid copolymer superfibers: The synergistic effect of solution rheology and fiber structure. *Polymer Testing*, 152, 108987. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2025.108987>
11. Manyukov, E. A., Sadova, S. F., Baeva, N. N., & Platonov, V. A. (2005). Study of Dyeing of Thermostable Para/Meta-Aramid Fibre. *Fibre Chemistry*, 37(1), 54–58. <https://doi.org/10.1007/s10692-005-0053-1>
12. Nasser, J., Lin, J., Steinke, K., & Sodano, H. A. (2019). Enhanced interfacial strength of aramid fiber reinforced composites through adsorbed aramid nanofiber coatings. *Composites Science and Technology*, 174, 125–133. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.02.025>
13. Zhang, D., Zhang, M., Su, X., & Feng, Y. (2024). Preparation and application of aramid nanofiber via carbodiimide assisted polymerization. *Materials & Design*, 246, 113317. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.113317>
14. Fonseca, V. M., Oliveira, J. R. de A., Bezerra, C. H. R., Santos, J. M., Werkhauser, W., Ferreira, E. P. da C., & Fonseca, V. M. (2025, March 25). Terminal Ballistic Study of Polyester Composites Reinforced with Aramid Fabrics. Preprints. <https://doi.org/10.20944/preprints202503.1894.v1>
15. Karvanis, K., Rusnáková, S., Krejčí, O., & Kalendová, A. (2021). Thermal analysis of postcured aramid fiber/epoxy composites. *REVIEWS ON ADVANCED MATERIALS SCIENCE*, 60(1), 479–489. <https://doi.org/10.1515/rams-2021-0036>
16. He, A., Xing, T., Shi, Z., Zhang, Y., Luo, Y., Wang, M., ... Xu, W. (2024). Facile fabrication of multifunctional aramid fibers for excellent UV resistance in extreme environments. *Materials & Design*, 242, 112989. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.112989>
17. Amesimeku, J., Song, W., & Wang, C. (2019). Fabrication of electrically conductive and improved UV-resistant aramid fabric via bio-inspired polydopamine and graphene oxide coating. *The Journal of The Textile Institute*, 110(10), 1484–1492. <https://doi.org/10.1080/00405000.2019.1607453>

18. He, A., Xing, T., Liang, Z., Luo, Y., Zhang, Y., Wang, M., ... Xu, W. (2024). Advanced Aramid Fibrous Materials: Fundamentals, Advances, and Beyond. *Advanced Fiber Materials*, 6(1), 3–35. <https://doi.org/10.1007/s42765-023-00332-1>
19. Wang, Y., Dong, X., Wang, Y., Hu, Z., Chen, Y., Yu, J., & Zhu, M. (2025). Enhanced mechanical properties of aramid fiber/epoxy composites through reinforcing interfacial adhesion based on strong hydrogen bonding interactions. *Composites Science and Technology*, 262, 111057. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2025.111057>
20. Xu, X., Guo, Y., Shen, Z., Liu, B., Yan, F., & Zhong, N. (2025). Aramid Fiber-Reinforced Plastics (AFRPs) in Aerospace: A Review of Recent Advancements and Future Perspectives. *Polymers*, 17(16), 2254. <https://doi.org/10.3390/polym17162254>
21. Yuan, Y., Teng, F., Cao, Y., Yu, J., Li, N., Hu, Z., & Wang, Y. (2025). Defect-repairing aramid fiber interfaces: covalent anchoring enables stable multiscale mechanical properties in extreme environments. *Composites Science and Technology*, 270, 111297. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2025.111297>
22. Baumann, A., & Hausmann, J. (2025). Influence of polymer properties and fiber–matrix interface on the kink band initiation in compression-compression fatigue loading of continuous fiber reinforced plastics. *International Journal of Fatigue*, 201, 109191. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2025.109191>
23. Mamolo, S. U., & Sodano, H. A. (2024). Interfacial reinforcement of carbon fiber composites through a chlorinated aramid nanofiber interphase. *Composites Science and Technology*, 245, 110351. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2023.110351>
24. Lee, D., Cho, J., Son, J. G., & Yeom, B. (2022). Highly aligned aramid nanofibrillar nanocomposites for enhanced dynamic mechanical properties. *Composites Part B: Engineering*, 229, 109467. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109467>
25. Li, Y.-F., Wang, H.-F., Syu, J.-Y., Ramanathan, G. K., Tsai, Y.-K., & Lok, M. H. (2021). Mechanical Properties of Aramid/Carbon Hybrid Fiber-Reinforced Concrete. *Materials*, 14(19), 5881. <https://doi.org/10.3390/ma14195881>
26. Xu, Y., Zhang, H., & Huang, G. (2025). Ballistic performance of UHMWPE laminate/modified aramid fabric composite structure based on support vector machine (SVM) method. *Composites Part B: Engineering*, 307, 112855. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2025.112855>
27. Huang, M., Zhang, C., Hou, F., Sun, Y., & Zhan, Y. (2025). Optimizing surface adsorption dynamics of aramid fibers using a surfactant adsorption-diffusion kinetic model. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13(1), 115056. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.115056>
28. Zheng, X., Wu, H., Li, X., Hu, Q., Yan, K., Qi, S., & Yuan, M. (2024). Experimental and numerical study on ballistic response of stitched aramid woven fabrics under normal and oblique dynamic impact. *Thin-Walled Structures*, 205, 112424. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.112424>
29. Ji, H., Wang, X., Tang, N., Li, B., Li, Z., Geng, X., ... Lu, T. J. (2024). Ballistic perforation of aramid laminates: Projectile nose shape sensitivity. *Composite Structures*, 330, 117807. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117807>
30. Ahmadijokani, F., Shojaei, A., Dordanihaghighi, S., Jafarpour, E., Mohammadi, S., & Arjmand, M. (2020). Effects of hybrid carbon-aramid fiber on performance of non-asbestos organic brake friction composites. *Wear*, 452–453, 203280. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203280>
31. Menapace, C., Leonardi, M., Secchi, M., Bonfanti, A., Gialanella, S., & Straffelini, G. (2019). Thermal behavior of a phenolic resin for brake pad manufacturing. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 137(3), 759–766. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08004-2>
32. Singh, T., & Patnaik, A. (2015). Performance assessment of lapinus-aramid based brake pad hybrid phenolic composites in friction braking. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 15(1), 151–161. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2014.01.009>
33. Kalel, N., Bhatt, B., Darpe, A., & Bijwe, J. (2022). Suppression of Brake Noise and Vibration Using Aramid and Zylon Fibers: Experimental and Numerical Study. *ACS Omega*, 7(25), 21946–21960. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c02313>
34. Arvinte, C., Sandu, A. V., Burduhos-Nergis, D. D., Bernevig Sava, M. A., & Bejinariu, C. (2019). Technical requirements and materials used in firefighters gloves manufacturing. *IOP*

- Conference Series: Materials Science and Engineering*, 572(1), 012070. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/572/1/012070>
35. Chen, J., Zhu, Y., Ni, Q., Fu, Y., & Fu, X. (2014). Surface modification and characterization of aramid fibers with hybrid coating. *Applied Surface Science*, 321, 103–108. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.09.196>
 36. Xu, T., Qi, Z., Yin, Q., Jiao, Y., An, L., & Tan, Y. (2022). Effects of Air Plasma Modification on Aramid Fiber Surface and Its Composite Interface and Mechanical Properties. *Polymers*, 14(22), 4892. <https://doi.org/10.3390/polym14224892>
 37. Song, J., Lv, F., Ruan, H., Wang, S., Li, Z., Zhu, M., & Xie, Q. (2023). Effect and Mechanism Analysis of Plasma Treatment on Electrical and Mechanical Properties of Aramid Fiber–Epoxy Resin Interface. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 51(12), 3655–3666. <https://doi.org/10.1109/TPS.2023.3335136>
 38. Xu, G., Jin, Y., & Song, J. (2022). Improvement of the Mechanical Properties by Surface Modification of ZnCl₂ and Polydopamine in Aramid Fiber Composites. *Applied Sciences*, 12(6), 3119. <https://doi.org/10.3390/app12063119>
 39. Jia, C., Zhang, R., Yuan, C., Ma, Z., Du, Y., Liu, L., & Huang, Y. (2020). Surface modification of aramid fibers by amino functionalized silane grafting to improve interfacial property of aramid fibers reinforced composite. *Polymer Composites*, 41(5), 2046–2053. <https://doi.org/10.1002/pc.25519>
 40. Zhang, B., Shao, X., Liang, T., Wang, W., Tian, M., Ning, N., & Zhang, L. (2021). Enhanced interfacial adhesion of aramid fiber reinforced rubber composites through bio-inspired surface modification and aramid nanofiber coating. *Journal of Applied Polymer Science*, 138(39), 51011. <https://doi.org/10.1002/app.51011>
 41. Rodríguez-Uicab, O., Avilés, F., Gonzalez-Chi, P. I., Canché-Escamilla, G., Duarte-Aranda, S., Yazdani-Pedram, M., ... Rubio, J. (2016). Deposition of carbon nanotubes onto aramid fibers using as-received and chemically modified fibers. *Applied Surface Science*, 385, 379–390. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.05.037>
 42. Zeng, L., Liu, X., Chen, X., & Soutis, C. (2018). Surface Modification of Aramid Fibres with Graphene Oxide for Interface Improvement in Composites. *Applied Composite Materials*, 25(4), 843–852. <https://doi.org/10.1007/s10443-018-9718-9>
 43. Kartik Shubham, S., Pandey, A., & Purohit, R. (2025). Development and Characterization of Biodegradable Hybrid Fiber-Reinforced Sandwich Composites Using Hand Lay-up and Compression Molding Technique. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 34(18), 20436–20447. <https://doi.org/10.1007/s11665-025-10742-4>
 44. Vial, E. D., da Silva, R. J., dos Santos, J. C., da Silva, L. J., del Pino, G. G., Christoforo, A. L., ... Scarpa, F. (2023). Glass and Aramid Fibre-reinforced Bio-based Polymer Composites Manufactured By Vacuum Infusion: A Statistical Approach to Their Physical and Mechanical Properties. *Applied Composite Materials*, 30(5), 1627–1644. <https://doi.org/10.1007/s10443-023-10142-8>
 45. Cruz, J. A. da, Kerche, E. F., Bianchi, O., Manes, A., & Amico, S. C. (2022). Castor Oil-Based Polyurethane/S2 Glass/Aramid Hybrid Composites Manufactured by Vacuum Infusion. *Polymers*, 14(23), 5150. <https://doi.org/10.3390/polym14235150>
 46. Ma, Y., Sugahara, T., Yang, Y., & Hamada, H. (2015). A study on the energy absorption properties of carbon/aramid fiber filament winding composite tube. *Composite Structures*, 123, 301–311. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.12.067>
 47. Quanjing, M., Rejab, M. R. M., Idris, M. S., Zhang, B., Merzuki, M. N. M., & Kumar, N. M. (2019). Wireless technology applied in 3-axis filament winding machine control system using MIT app inventor. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 469(1), 012030. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/469/1/012030>
 48. Schmachtenberg, E., Schulte zur Heide, J., & Töpker, J. (2005). Application of ultrasonics for the process control of Resin Transfer Moulding (RTM). *Polymer Testing*, 24(3), 330–338. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2004.11.002>
 49. Liu, X., Song, S., Shi, J., & Wang, A. (2025). Influence of fiber volume ratio on hybrid effects of pultruded aramid/carbon hybrid fiber reinforced polymer composite bars: Static mechanical properties. *Polymer Composites*, 46(12), 11403–11415. <https://doi.org/10.1002/pc.29693>

50. Singh, M., Yadav, R., Dodla, S., & Gautam, R. K. (2025). Analysis of the Frictional Properties of Carbon Nanotube-Coated Aramid Fiber-Reinforced Epoxy Composites Using Machine Learning Techniques. *Journal of Tribology*, 147(061403). <https://doi.org/10.1115/1.4067808>
51. Wang, Y., & Sun, W. (2024). Machine learning-based real-time velocity prediction of projectile penetration to carbon/aramid hybrid fiber laminates. *Thin-Walled Structures*, 197, 111600. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.111600>
52. Golkarnarenji, G., Naebe, M., Badii, K., Milani, A. S., Jazar, R. N., & Khayyam, H. (2019). A machine learning case study with limited data for prediction of carbon fiber mechanical properties. *Computers in Industry*, 105, 123–132. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.11.004>
53. Gao, J., Yang, X., & Huang, L. (2018). Numerical prediction of mechanical properties of rubber composites reinforced by aramid fiber under large deformation. *Composite Structures*, 201, 29–37. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.05.132>
54. Lei, X. D., Wu, X. Q., Zhang, Z., Xiao, K. L., Wang, Y. W., & Huang, C. G. (2021). A machine learning model for predicting the ballistic impact resistance of unidirectional fiber-reinforced composite plate. *Scientific Reports*, 11(1), 6503. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-85963-3>
55. Zhu, Z., Kong, X., Zhou, H., Zheng, C., & Wu, W. (2025). A hybrid data-driven machine learning framework for predicting the impact resistance of composite armor. *International Journal of Impact Engineering*, 195, 105125. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2024.105125>
56. Zhang, G., Luo, L., Lin, T., Zhang, B., Wang, H., Qu, Y., & Meng, B. (2021). Multi-Objective Optimisation of Curing Cycle of Thick Aramid Fibre/Epoxy Composite Laminates. *Polymers*, 13(23), 4070. <https://doi.org/10.3390/polym13234070>
57. Mitra, K. (2008). Genetic algorithms in polymeric material production, design, processing and other applications: a review. *International Materials Reviews*, 53(5), 275–297. <https://doi.org/10.1179/174328008X348174>

BÖLÜM 11

YENİ KURULACAK BİR MOBİLYA FABRİKASININ MÜHENDİSLİK EKONOMİSİ AÇISINDAN ANALİZİ

Hakan MUMCU¹, Murat ÖZALP²

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, ORCID: 0009-0005-2306-5522

² Prof. Dr., Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, ORCID: 0000-0003-1651-3487

1. GİRİŞ

Mobilya en geniş anlamı ile insanların oturma, yatma, çalışma ve depolama gibi temel fiziksel gereksinimlerini sosyal ve kültürel boyutları ile ele alarak, güvenli ve konforlu bir şekilde gidermelerini amaçlayan elemanlar veya sistemler olarak tanımlanabilir.

Mobilya endüstrisi buluşa ve tasarım gücüne dayalı bir endüstri olması nedeni ile bir moda sektörü de olarak tanımlanabilir. Ağırlıklı olarak orta ve küçük ölçekli firmalara dayanan Türk mobilya endüstrisi sağladığı istihdam olanakları ile ülkemizin önemli endüstrilerinden birini oluşturmaktadır. İşte bu özellikleri dikkate alarak, bu güçlü endüstrinin nasıl büyüyüp geliştiğini bir mobilya fabrikası üzerinde ekonomik analizle incelenecektir. Buradaki amaç, bir fabrikanın hangi şartlarda kurulup, hangi şartlarda üretimini gerçekleştireceğinin ekonomik yönden ortaya koymaktır.

Ekonomi; bir toplulukta meydana gelen üretim, sermaye, dağıtım ve tüketim faaliyetlerinin tamamına denir. Ekonomik ise iktisadi ve hesaplı anlamlarına gelir (Baykan vd., 1997).

Analiz; bir bütünü, kendini oluşturan parçalara ayırma, tahlil etme, çözümleme anlamlarına gelir.

Bu çalışmada yukarıda anlatılanlar çerçevesinde bir mobilya fabrikasının ekonomik yönden analizi yapılmıştır.

2. GENEL EKONOMİK TANIMLAR

İşletme: İnsan ihtiyaçlarını karşılamak üzere faydalı mal veya hizmet üreten ekonomik ünitelerdir.

Plan: Gelecekte ulaşılmak istenen amaca ne zaman, hangi araçlarla, kimlerin yardımı ile nasıl ve hangi maliyetlerle ulaşılabileceğini belirten bir kararlar dizisidir.

Planlama: En önemli aşamadır. İşletmenin geleceğe bakması, kendini gelecek için hazırlamasıdır.

Organize olma: Planlanan hedeflere ulaşabilmek için hangi faaliyetlere girişilmesinin zorunlu olduğu ve bunları kimlerin yapacağını belirlenmesidir.

Yönetme: İşletmenin amacına ulaşabilmesi için faaliyetlerinin başlatılması aşamasıdır.

Kontrol: Faaliyetlerin plana uygun olup olmadığının zaman zaman incelenmesidir.

Girdi: Bir üretimi gerçekleştirmek için kullanılan her şeye aynı anlamı vermek üzere üretim faktörleri, girdi (input) veya kaynaklar adı verilir ve genellikle çoğul bir ifade taşır. Bir ürünün elde edilmesi için birden fazla üretim faktörünün kullanılması gerekir.

Çıktı: Üretim faktörleri üretim süreci adı verilen bir değişim işleminden geçirildikten sonra ürün haline dönüştürülürler (Işık, 1998).

Kar: Genellikle işletmenin muhasebe kayıtlarında yer alan belirli bir döneme ait gelirlerle giderler arasındaki olumlu fark olarak tanımlanır. Tüm üretim sistemlerinin ana amacı yapılacak üretimden kar elde edilmesidir (Işık, 1998).

Sermaye: Üretim faktörlerinin en önemlilerinden birisidir. Tek başına bir anlam taşımadığı halde diğer üretim faktörleri olan işgücü, makine, malzeme ve yöntem ile bir araya geldiğinde üretimin gerçekleşmesi söz konusudur. Sermaye; öz sermaye ve yabancı sermaye olmak üzere ikiye ayrılır (Işık, 1998). Öz sermaye işletmenin var olan kendi sermayesidir. Yabancı sermaye ise özellikle sermayesi yüksek olan işletmelerde, işletmenin satın alma gücü sermaye mallarını satın almaya yetmediğinde işletme dışından alınan sermayedir.

Mühendislik ekonomisi: Genel olarak, mühendislik tasarım alternatiflerinin karşılaştırılmasında ekonomik analiz tekniklerinin uygulanması olarak tanımlanır. Diğer bir ifade ile mühendislik ekonomisi, ekonomik karşılaştırmaları kolaylaştıran matematiksel teknikler olarak da tanımlanabilir. Mühendislik ekonomisi ilkelerini iyi bilen bir yönetim mühendisi, bir işletmeye ait zaman, sermaye, işgücü vb. kısıtlı kaynakların kullanımını kontrol altında tutar.

2.1. Giderler

Genel olarak işletmenin kurulabilmesi ve faaliyetlerini yürütebilmesi için yapılan harcamalardır. Ancak giderlerin işletmelerde kullanım amaçlarına bağlı olarak farklı gider tipleri vardır. Bunlar;

- Çevirim giderleri,
- Geçmiş ve üretim öncesi giderler,
- Gelecek ve fırsat değerleri,
- Dolaylı-dolaysız genel giderler,
- Sabit ve değişken giderler.

2.2. Çevrim giderleri

Herhangi bir parça, ürün, proje veya sisteme ilişkin çevrim giderleri parçanın oluşumundan sonuna kadar yapılan tüm harcamaların toplamından oluşur. Bu giderler genellikle mühendislik tasarımı ve geliştirme giderleri, fabrikasyon veya test giderleri, çalıştırma ve koruma giderleri ve elden çıkarma giderlerini içerir.

2.3. Üretim öncesi giderler

Üretim öncesi giderler geri kazanılamaz türdeki geçmiş giderlerdir. Bu giderler ölü giderler olarak ta adlandırılmaktadır.

2.3.1. Gelecek ve fırsat giderleri

Şimdiki zaman $t=0$ olarak referans alınır, bundan sonra oluşacak olan tüm giderler gelecek giderler olarak ifade edilir. Gelecek giderleri iş gücü ve materyale dayalı çalıştırma giderleri, koruma giderleri, genel giderler ve elden çıkarma giderleri olabilir.

Fırsat gideri; Eldeki sermayenin başka amaçlar için kullanılmayarak, bir yatırım fonunda gelir veya faiz kazanmak amacı ile kullanılması sonucu var olan başka bir fırsattan vazgeçmenin gideri veya maliyeti olarak ifade edilir (Işık, 1998).

2.3.2. Dolaylı-dolaysız genel giderler

Dolaylı-dolaysız ve genel giderlerin tanımlanması için bir imalat çevresinin dikkate alınması daha yararlı olur.

2.3.2.1. Dolaysız hammadde ve işgücü giderleri

Belirli bir işlem üretim veya proje için kullanılmaya hazır ve kolaylıkla ölçülebilen işgücü ve malzeme giderleridir.

2.3.2.2. Dolaylı hammadde ve işgücü giderleri

Belirli bir işlem, üretim veya proje için oluşan idari harcamalar, emekli maaşları ve profesyonel hizmetler gibi doğrudan belirlenmesi çok zor veya imkansız olan giderlerdir. Bu giderler bazen de genel giderler olarak adlandırılmaktadır.

2.3.3. Sabit ve değişken giderler

Sabit giderler: çıktı miktarı veya faaliyet düzeyi ile orantılı olarak değişmeyen giderlerdir. Genel yönetici maaşları, sigorta ve vergiler, kira, bina yıpranması ve kullanımları, genellikle üretim hacmi ile değişmeyen gider bileşenleri örnekleridir.

Değişken giderler: Çıktı miktarı ile orantılı olarak değişen giderlerdir. Bu giderler, genellikle malzeme ve işgücü giderlerinden oluşurlar. Sigorta, çeşitli vergiler, amortisman, belirli korumalar ve temel sabit giderlerdir.

3. KURULUŞ MALİYETİ

Bir işletmeyi kurmak için bazı aşamalardan geçilir. Bunlar;

- a) Uygun bir arsanın seçilmesi,
- b) Bu arsaya işletme binasının yapılması,
- c) Ne kadar açık, ne kadar kapalı alana ihtiyaç duyulduğunun tespit edilmesi,
- d) Bu inşaatın yapılması için gerekli olan masrafların tespit edilmesi,
- e) İşletme binasının inşaatı bittikten sonra içine gerekli makinaların alınması,
- f) Hangi türde üretim yapılacaksa ona göre hammadde ve malzeme alınması.

3.1. Arsa Maliyeti

Alınacak arsanın toplam alanı 6.000 m² olarak düşünülmektedir. Bunun 3.000 m²'si açık alan, 3.000 m²'si de kapalı alan olarak düşünülmektedir. Bu arsanın alınacağı yer bir organize sanayi bölgesidir. Arsanın m²'si 147 \$'dır. İşletme 6.000 m² olacağına göre arsa maliyeti 6.000 x 147 = 882.000 \$'dır (Konya Ticaret Odası, 2025).

3.2. İnşaat Maliyeti

Yapılacak inşaat 3.000 m² alana oturacaktır. İnşaat maliyetini hesaplamak için, aşağıdaki unsurlar dikkate alınacaktır.

- a) İnşaat için gerekli olan ana malzemelerin maliyetinin hesaplanması,
- b) İnşaat işçilerinin ücretlerinin hesaplanması,
- c) İnşaat için gerekli olan tamamlayıcı unsurların maliyetinin hesaplanması,
- d) İnşaat için gerekli olan alt yapı maliyetinin hesaplanması,
- e) Müteahhitlik ücretinin hesaplanması.
- f) Bu aşamalardan sonra inşaat maliyeti hesaplanabilir.

3.2.1. İnşaat için gerekli olan ana malzemelerin maliyeti

Bir inşaatı yapabilmek için gerekli olan malzemeler, çimento, kum, kireç, tuğla, demir, taş, kereste vb. malzemelerdir. Bunlar kalitelerine göre fiyat değişikliği arz ederler. İnşaat için genelde en kaliteli malzemeler kullanılacaktır. Çünkü sağlam ve sağlıklı bir işletme binası

ileride rahat çalışılmasına, uzun ömürlü bir işletme oluşturulmasına, işçilerinde daha verimli çalışmasına ve daha fazla üretim yapılmasına olanak tanıyacaktır.

İnşaatin temeli 2.5 m kazılarak yapılacaktır. Toprakta yüksekliği ise 6 m olarak kabul edilmiştir. Bu inşaat için tüm ana malzemelerin maliyeti yaklaşık olarak 109.590 \$ olacağı ön görülmüştür (İnşaat Malzemeleri Yetkili Satıcısı, 2025).

3.2.2. İnşaat işçilerinin ücretleri

Başlatılan inşaat yaklaşık 5 ay sürecektir. Müteahhitle yapılan anlaşmaya göre, müteahhide inşaat maliyetinin %20'si verilecektir. İşçiler sadece Pazar günü ve aradaki resmi tatil günlerinde çalışmayacaklardır. 10 inşaat ustası ve 20 işçi çalıştırılacaktır. Tatiller hariç işçiler 132 gün çalışacaklardır. İşçilere verilecek toplam ücret aşağıda verilmiştir.

Tablo 3.1 İşçilik giderleri

Bir inşaat ustasına verilen günlük ücret		20 \$
Bir inşaat işçisine verilen günlük ücret		11 \$
Bir inşaat ustasının 132 günlük ücreti	20x132 =	2.640 \$
Bir inşaat işçisinin 132 günlük ücreti	11x132 =	1.452 \$
10 inşaat ustasının 132 günlük ücreti	10x2.640 =	26.400 \$
20 inşaat işçisinin 132 günlük ücreti	20x1.452 =	29.040 \$

Toplam 20 inşaat işçisinin ve 10 inşaat ustasının ücreti = 55.444 \$'dır (Müteahhitlik Bürosu, 2023).

3.2.3. İnşaat için gerekli olan tamamlayıcı unsurların maliyeti

İnşaatin kaba işçiliği tamamlanıp, bir bina olarak görünmesini sağlayan ve insanların ihtiyaçlarını karşılamak üzere yapılan kapı, pencere, tuvalet, banyo, lavabo, aydınlatma gibi unsurların maliyeti Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2 İnşaat için gerekli olan tamamlayıcı unsurların maliyeti (İmalatçı Firmalar, 2025).

Cinsi	Adet	Adet fiyatı (\$)	Toplam (\$)
Metal kapı (Büyük)	3	109	327
Ahşap kapı	5	38	190
PVC kapı	17	30	510
Pencere + cam	30	26	780
Tuvalet	10	40	400
Lavabo musluğu	12	7	84
Banyo musluğu + duş	10	12	120
Lavabo	10	16	160
Lamba	50	10	500
Toplam			3.071

3.2.4. Alt yapı maliyeti

Altyapı hizmetleri; telefon, elektrik, kanalizasyon, su gibi hizmetlerdir. Altyapı hizmetlerini işletmeye getirmek için yapılan harcamalar Tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.3 İnşaat için gerekli olan altyapı maliyeti (Konya Büyükşehir Belediyesi, 2025).

Altyapı hizmetleri	Birim fiyatı (\$)
Telefon, internet, faks hattı bağlama	2.740
Elektrik bağlama	959
Kanalizasyon bağlama	548
Su bağlama	411
Yol	384
Toplam	5.042

3.2.5. Müteahhit ücreti

Müteahhit ücreti inşaatın maliyetinin % 20'i kadar idi. Toplam inşaat maliyeti, 173.143 \$ olduğuna göre bunun % 20 'si 34. 629 \$'dır.

3.2.6. Toplam inşaat maliyeti

Toplam inşaat maliyeti Tablo 3.4'te verilmiştir.

Tablo 3.4 Toplam inşaat maliyeti.

Toplam inşaat giderleri	Birim fiyatı (\$)
Ana malzemelerin maliyeti	109.590
İnşaat işçilerinin maliyeti	55.440
Tamamlayıcı unsurların maliyeti	3.071
Alt yapı maliyeti	5.042
Müteahhit ücreti	34.629
Toplam	207.772

3.3. Makinaların Maliyeti

İnşaat bittikten sonra en önemli unsur, içinde üretim yapmak için alınacak makinalardır. Hangi makinaların alınacağına karar vermek için şu şartlar gerekmektedir.

- Ne tür mobilya üretileceği,
- Seri halde mi yoksa siparişe dayalı olarak mı üretim yapılacağı,
- Makinaların en üstün kalitede mi, yoksa daha düşük kalitede mi olacağı.

Yukarıdaki şartlara göre işletme şu kararları almıştır.

- Yemek odası ve yatak odası takımı üretilecektir. Bu durumda hem tablalı hem de masif mobilya üretimi yapılacaktır.
- Seri üretim yapılacaktır. Ortalama olarak ayda 10-15 mobilya takımı üretimi yapılacaktır.
- Makinaların daha uzun ömürlü olması, daha hızlı işlem yapması ve en iyi kalitede olması istenmektedir.

Bu kararlara göre Tablo 3.5'te belirtilen makinalar alınacaktır.

Tablo 3.5 Makinaların maliyeti (Makine İmalatçıları, 2024).

Alınan makinalar	Tutarı (\$)
Şerit testere makinası	850
Kalınlık makinası	900
Daire testere makinası	880
Bant zımpara makinası	800
Otomatik arabalı daire testere makinası	1.100
Zımpara taşı	220
Planya makinası	950
Yatay delik makinası	500
Yatay freze makinası	860
Masifleme makinası	1.400
Bilgisayarlı çoklu işleme makinası	3.200
Pres	2.900
Tutkal sürme makinası	700
Kaplama alıştırma makinası	800
Kaplama dikme makinası	600
El makinaları (5'er adet matkap, titreşimli zımpara, vb.)	3.000
El aletleri (20'er adet rende, çekiç, tornavida vb.)	2.800
Boya cila al etleri (5'er adet fırça, tabanca, vb.)	2.740
Kompresör	685
Toplam	26.385

3.4. Üretimde Kullanılacak Malzemelerin Maliyeti

Üretim için gerekli olan malzemeler şunlardır:

1. Hammadde (kereste),
2. Yarı mamul malzeme (yonga levha, lif levha, tutkal vb.),
3. Yardımcı malzemeler (menteşe, kulp, vida, vb.) .

3.4.1. Hammadde maliyeti

Bu işletmenin hammadde maliyetini öğrenmek için ne ürettiğini bilmek gerekir. İşletmede yemek odası mobilyası ve yatak odası mobilyası üretilmesi planlanmaktadır.

Tablo 3.6 Kereste maliyetleri (Kereste Fabrikaları, 2025).

Kereste	Kalite	m ² fiyatı (\$)	m ² miktarı	Toplam (\$)
Çam kereste	1. sınıf	465	300	139.500
Çam kereste	2. sınıf	329	300	98.700
Çam kereste	3.sınıf	274	300	82.200
Kayın kereste	Ekstra	657	300	197.100
Kayın kereste	1. sınıf	520	300	156.000
Kayın kereste	2. sınıf	410	300	123.000
Kayın kereste	3.sınıf	28 7	300	86.100
Gökmar kereste	1. sınıf	383	300	114.900
Gökmar kereste	2. sınıf	300	300	90.000
Meşe kereste	1. sınıf	740	300	222.000
Meşe kereste	2. sınıf	659	300	197.700
Toplam				1.507.200

3.4.2. Yarı mamul malzeme maliyeti

İhtiyaç duyulan yarı mamul malzemeler yonga levhalar, kontrplaklar, suntalam levhalar, lif levhalar, kaplamalar, tutkallar ve üst yüzey malzemeleri. Bu malzemeler 1. Sınıf malzemelerden olacaktır.

3.4.2.1. Yonga levha malzemelerin maliyeti

Yonga levha malzemelerin maliyeti Tablo 3.7’de verilmiştir.

Tablo 3.7 Yonga levha malzemelerin maliyeti (Ahşap Malzeme Üreticileri, 2024).

Cinsi	Kalınlık (mm)	Ebat (cm)	Adet fiyatı (\$)	Adet	Toplam (\$)
Yonga levha	6	280x210	10	50	500
Yonga levha	8	366x183	13	50	650
Yonga levha	10	366x183	18	50	900
Yonga levha	16	366x183	19	50	950
Yonga levha	18	366x183	20	100	2.000
Yonga levha	22	366x183	26	100	2.600
Yonga levha	25	366x183	30	50	1.500
Toplam					9.100

3.4.2.2. Kontrplak maliyeti

Kontrplak maliyeti Tablo 3.8’de verilmiştir.

Tablo 3.8 Kontrplak maliyeti (Ahşap Malzeme Üreticileri, 2024).

Cinsi	Kalınlık (mm)	Ebat (cm)	Adet fiyatı (\$)	Adedi	Toplam (\$)
Kontrplak	4	220x170	12	50	600
Kontrplak	6	220x 1 70	19	3 0	570
Kontrplak	10	220x170	25	20	500
Kontrplak	18	220x170	40	20	800
Toplam					2.470

3.4.2.3. Suntalam maliyeti

Suntalam maliyeti Tablo 3.9’da verilmiştir.

Tablo 3.9 Suntalam maliyeti (Ahşap Malzeme Üreticileri, 2024).

Cinsi	Kalınlık (mm)	Ebat (cm)	Adet fiyatı (\$)	Adet	Toplam (\$)
Suntalam	6	280x210	21	30	630
Suntalam	8	366x183	27	30	810
Suntalam	16	366x183	33	30	990
Suntalam	18	366x183	35	30	1.050
Toplam					3.480

Suntalamlar 1. sınıf kalite olup çeşitli renk ve desenlerdedir. En çok kullanılan çeşitleri ise beyaz, açık meşe, koyu meşe, kiraz, gül ve krem renkleridir.

3.4.2.4. Lif levhalar (MDF)

Lif levhalar diğer levhalara oranla daha kullanışlı bir yarı mamuldür. Özellikle kaliteli ve pahalı işlerde kullanılır. Bu levhaların kalınlıkları, ebatları, adet ve adet fiyatlarının toplamaları Tablo 3.10’da verilmiştir.

Tablo 3.10 MDF maliyeti (Ahşap Malzeme Üreticileri, 2024).

Cinsi	Kalınlık (mm)	Ebat (cm)	Adet fiyatı (\$)	Adet	Toplam (\$)
MDF	4	210x280	8	30	240
MDF	8	210x280	16	30	480
MDF	10	210x280	20	30	600
MDF	18	210x280	34	50	1.700
MDF	22	210x280	40	50	2.000
MDF	25	210x280	46	30	1.380
MDF	30	210x280	50	30	1.500
Toplam					7. 900

3.4.2.5. Kaplamaların maliyeti

Kaplama maliyetleri Tablo 3.11’de verilmiştir.

Tablo 3.11 Kaplama maliyeti (Ahşap Malzeme Üreticileri, 2024).

Cinsi	Boy	m ² Fiyat(\$)	Miktarı(m ²)	Toplam (\$)
Ozigo	Kısa	0,30	1000	300
Ozigo	Uzun	0,35	1000	350
Kayın	Kısa-dar	0,32	1000	320
Kayın	Uzun-geniş	0,45	1000	450
Çam	Kısa	0,95	1000	950
Çam	Uzun	1,09	1000	1.090
Ceviz	150 cm’ye kadar	1,10	1000	1.100
Ceviz	150 cm’den yukarı	1,23	1000	1.230
Dişbudak	150 cm’ye kadar	0,95	1000	950
Dişbudak	150 cm’den yukarı	1,15	1000	1.150
Gül	150 cm’ye kadar	0,90	1000	900
Gül	150 cm’den yukarı	1,09	1000	1.090
Meşe	150 cm’ye kadar	1,08	1000	1.080
Meşe	150 cm’den yukarı	1,35	1000	1.350
Maun	150 cm’ye kadar	0,94	1000	940
Maun	150 cm’den yukarı	1,10	1000	1.100
Toplam				14.350

3.4.2.6. Tutkallar ve yapıştırıcıların maliyeti

Üretim de en önemli unsurlardan biri de kullanılan tutkallardır. İşin sağlamlığı tutkalın kaliteli olmasına bağlıdır. Tutkal ve yapıştırıcı maliyetleri Tablo 3.12’de verilmiştir.

Tablo 3.12 Tutkallar ve yapıştırıcıların maliyeti (Boya ve Kimya Sanayii, 2022).

Cinsi	Miktar	Fiyat (\$)	Adet	Toplam (\$)
Plastik tutkal	Bidon (25 kg)	41	20	820
Plastik tutkal	Bidon (25 kg)	265	20	5.300
Tut kal	Bidon (25 kg)	33	20	660
Tutkal	Bidon (25 kg)	211	20	4.220
Süper masif tutkal	Bidon (25 kg)	39	20	780
Süper masif tutkal	Bidon (25 kg)	241	20	4.820
Tutkal (masif)	Bidon (25 kg)	34	20	680
Tutkal (masif)	Bidon (25 kg)	210	20	4.200
Natura beyaz tutkal	Bidon (25 kg)	21	10	210
Polimarin tutkal	Tüp (0,750 lt.)	12	100	1.200
Toplam				22.890

3.4.2.7. Üst yüzey malzemelerinin maliyeti

Üst yüzey malzemelerinin maliyeti Tablo 3.13’te verilmiştir.

Tablo 3.13 Üst yüzey malzemeler maliyeti (Boya ve Kimya Sanayii, 2022).

Cinsi	Miktar	Fiyat (\$)	Adet	Toplam (\$)
Lake boya beyaz	Bidon (25kg)	108	10	1.080
Lake boya siyah	Bidon (25kg)	88	10	880
Lake astar (takım)	Bidon (25kg)	70	10	700
Dolgu verniği	Bidon (25kg)	55	20	1.100
Parlak vernik	Bidon (25kg)	82	20	1.640
İpek mat vernik	Bidon (25 kg)	60	10	600
Mat vernik	Bidon (25 kg)	68	20	1.360
Özel mat vernik	Bidon (25kg)	76	10	760
Poliüretan tiner	Bidon (25kg)	36	10	360
Sentetik tiner	Teneke (12 lt.)	19	10	190
Ahşap koruyucu	Teneke (15 lt.)	53	10	530
Ah şap koruyucu	Teneke (15 lt.)	43	10	430
Toplam				9.630

3.4.2.8. Tüm yarı mamul malzeme maliyeti

Tüm yarı mamul malzeme maliyeti Tablo 3.14'te verilmiştir.

Tablo 3.14 Tüm yarı mamul malzeme maliyeti.

Tüm yan mamul malzeme maliyetleri	Birim fiyatı (\$)
Yonga levha	9.100
Kontrplak	2.470
Suntalam levha	3.480
Lif levha	7.900
Kaplama	14.350
Tutkallı yapıştırıcı	22.890
Üst yüzey malzemeleri	9.630
Toplam	69.820

3.4.3. Yardımcı malzeme maliyetleri

Yardımcı malzeme maliyetleri Tablo 3.15'te verilmiştir.

Tablo 3.15 Yardımcı malzeme maliyetleri (Ticarethane ve Hırdavatçılar, 2024).

Cinsi	Fiyatı (\$)	Adet	Toplam (\$)
Düz tas menteşe	0,27	5000	1.350
Deve boyun menteşe	0,3 0	5000	1.500
40 cm Çekmece rayı (takım)	1,25	1000 (takım)	1.250
45 cm Çekmece rayı (takım)	1,28	1000 (takım)	1.280
50 cm Çekmece rayı (takım)	1,31	1 000 (takım)	1.310
80 mm baza ayağı	0,10	1000	100
100 mm baza ayağı	0,11	1000	110
150 mm baza ayağı	0,12	1000	120
3, 5x16 sunta vidası	5	250 (kutu)	1.250
4x40 sunta vidası	12	250 (kutu)	3.000
4x45 sunta vidası	16	250 (kutu)	4.000
4x50 sunta vidası	18	250 (kutu)	4.500
Baza ayağı klipsi	0,03	2000	60
Baza ayağı tespit vidası	0,02	2000	40
64 mm metal kulp boyalı	0,16	5000	822
64 mm metal kulp kaplamalı	0,20	5000	1.000
96 mm metal kulp boyalı	0,20	5000	1.000
96 mm metal kulp kaplamalı	0,23	5000	1.150
50'lik işkence	6	50	300
100 'lük işkence	12	50	600
150'lik işkence	18	75	1.350
200 'lük işkence	23	50	1.150
Toplam			27. 242

3.4.4. Üretim için alınan malzemelerin maliyeti

Üretim için alınan malzemelerin maliyet hesapları Tablo 3. 16’da verilmiştir.

Tablo 3.16 Üretim için alınan malzemelerin maliyeti.

Toplam malzeme maliyeti	Birim fiyatı (\$)
Hammadde	1.507.200
Yan mamul	69.820
Yardımcı malzeme	27.242
Toplam	1.604.262

3.5. Teknolojik Donanım Maliyeti

Teknolojik donanım maliyeti Tablo 3.17’de verilmiştir.

Tablo 3.17 Teknolojik donanım maliyeti (Bilgisayar ve İletişim Sanayii, 2025).

Cinsi	Fiyatı (\$)	Adet	Toplam (\$)
Bilgisayar	1000	3	3.000
Fax	450	1	450
Telefon santrali	195	1	195
Telefon	68	5	340
Toplam			3.985

3.6. Toplam Kuruluş Maliyetinin Hesaplanması

Toplam kuruluş maliyeti hesaplanırken normalde üretim için alınan malzemelerin maliyeti hesaba katılmaz. Ama işletme bir yıllık malzeme stoku yapmıştır. Üretilcek iş üzerine kuruluş maliyeti katılmaz. Üretim için alınan malzemelerin maliyeti katılır. Tablo 3.18’de bir yıl yetecek malzeme ile toplam kuruluş maliyetinin hesabı verilmiştir.

Tablo 3.18 Toplam kuruluş maliyeti.

Kuruluş maliyeti	Toplam (\$)
Arsa toplam maliyeti	882.000
İnşaat toplam maliyeti	207.772
Makine toplam maliyeti	26.385
Üretim için alınan malzemelerin toplam maliyeti	1.589.912
Teknolojik donanım toplam maliyeti	3.985
Toplam	2.710.054

4. AMORTİSMAN

Her hangi bir sermaye malının ilk değerinde, fiziksel yıpranma ve teknolojik eskime nedeni ile zamanla bir azalma oluşur. Yani kullanımla ve zamanın geçmesi ile malın değeri düşer. Bir malın değerindeki bu dereceli kayıp amortisman olarak isimlendirilir.

Amortisman hesaplamalarında kullanılacak en önemli verilerden birisi, amortisman hesabı yapılacak yatırım mallarının ekonomik ömürleridir. Bir yatırım projesi veya malın ekonomik ömrü, söz konusu yatırımın ekonomik anlamda kazanç sağladığı zamanın yıl olarak karşılığıdır. Makine ve ekipmanların ekonomik ömrü 10 yıldır (Işık, 1998).

Ticari bir firmanın sermaye malının amortismanını hesaplamak için kullanabileceği amortisman yöntemi yürürlükteki vergi kanunlarının izin verdiği seçeneklere veya sınır değerlerine bağlıdır. Geleneksel amortisman yöntemleri doğru hat, azalan bakiye, yıl rakamlarının toplamı veya bunların bir değişiminden oluşan yöntemlerdir. Bu projede doğru hat amortisman yöntemi ile kullanılmıştır.

Doğru hat amortisman yöntemi, bir sermaye malının amortisman giderinin hesaplanmasında kullanılan en basit yöntemdir ve malın ekonomik ömrü boyunca her yıl eşit miktarda amortisman değeri elde edilmesini sağlar. Bu yöntemde yıllık amortisman Denklem (1) ile hesaplanmıştır (Işık, 1998).

$$D_t = \frac{P - S}{n} \quad (1)$$

Burada;

D_t = t yılı sonundaki izin verilen amortisman değeri (\$/yıl)

P = Malın ilk bedeli veya şimdiki satın alma bedeli (\$)

n = Söz konusu malın ekonomik ömrü (yıl)

S = Söz konusu malın hurda değeri (\$)

İşetmenin amortisman bedeli:

P = 26.385 \$

n = 10 yıl

S = Satın alma bedelinin %10'u kadar = 2.639 \$

$$D_t = \frac{26.385 - 2.639}{10} = \frac{23.746}{10} = 2.374,6 = 2.375 \$$$

5. PERSONEL MAAŞLARININ HESAPLANMASI

Fabrikada 1 müdür, 2 müdür yardımcısı, 1 muhasebeci, 2 aşçı, 2 şoför, 1 gece bekçisi, 1 hizmetli, 10 ustabaşı ve 30 mobilya işçisi olmak üzere 50 kişi çalışmaktadır. Bu kişilere ait aylık ücretleri Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1 Fabrika kadrosunun aylık ücretleri (Mobilya Fabrikaları, 2024).

Görevi	Kişi	Maaş (\$)	Toplam (\$)
Müdür	1	2.900	2.900
Müdür yardımcısı	2	2.000	4.000
Muhasebeci	1	1.500	1.500
Aşçı	2	730	1.460
Şoför	2	730	1.460
Bekçi	1	730	730
Hizmetli	1	730	730
Ustabaşı	10	1.750	17.500
Mobilya işçisi	30	730	21.900
Toplam	50		52.180

Tablo 5.1’de görüldüğü gibi çalışanlara vergiler dahil her ay 52.180 \$ verilmektedir. Maaşları her ayın 1’inde verilip sadece haftanın pazar günü tatildir. Aylık 26 işgünü olmaktadır. Yalnız buradaki işçilikten kasıt ustabaşı ve mobilya işçisinin verdiği emek üzerine günlük ücretlerinin hesap edilmesidir.

6. İŞLETME YILLIK NAKİT AKIŞININ HESAPLANMASI

Bir işletmenin kuruluş amacının temel iki unsuru kar ve hizmettir. İşletmenin uzun ömürlü olması, karının yüksek olmasına ve sürekli olmasına bağlıdır. Kar kısaca gelirler ile giderler arasındaki fark olarak tanımlanabilir.

İşletme giderleri, genel giderler olarakta tanımlanabilir. Gereç tutarları ve işçilikten sonra bir iş üzerine yapılan genel gider ilavesi o işletmenin kira, elektrik, ısıtma, temizlik ücretleri, makine amortismanı, reklam, kırtasiye ve vergiler genel giderleri oluşturur. Ayrıca büyük işletmeler için memur, müstahdem, tasarımcı aylığı ve ücretleri de genel giderlere katılır. Genel giderler büyük işletmelerde yıllık toplamaları belli bir oran dahilinde işlerin üzerine eklenir. Bir işin yapılıp satılmasında yalnız o işe giderler karşılığı alınırsa o işyerinin gelişmesi yenilenmesi imkansızdır. Bunun için ayrıca bir oran dahilinde kazanç olarak kar ilavesi gerekir. Kar ilavesi ile o işin satış bedelini bulunur (Işık, 1998).

6.1. Giderler

Aylık giderlerin hesaplanması Tablo 6.1’de verilmiştir.

Tablo 6.1 Aylık giderlerin hesaplanması.

Aylık giderler	Birim fiyatı (\$)
Gereç tutarı (yüz takım yemek odası için)	15.000
Personel giderleri	52.180
Elektrik, su, telefon	500
Isıtma giderleri	100
Ulaşım nakliyat giderleri	200
Toplam	67.980

6.2. Gelirler

Bir takım yemek odası için $67.980/100 = 679$ \$
 Satış fiyatı : % 100 kar eklendiğinde $679+679 = 1.358$ \$
 Toplam Gelir = $1.358 \times 100 = 135.800$ \$
 Aylık kar = Gelirler — Giderler
 $= 135.800 - 67.980 = 67.820$ \$
 Yıllık kar = $67.820 \times 12 = 813.840$ \$

6.3. Nakit akışı

Şirketin yıllık nakit akışı Tablo 6.2’ de verilmiştir.

Tablo 6.2 Yıllık nakit akışı

Yıllık	Miktar (\$)
Gelirler	1.629.600
Giderler	815.760
Kazançlar	813.840
Amortisman	2.375
Vergi öncesi kazanç	811.465
Vergi	317.205
Vergi sonrası kazanç	494.260
Nakit akışı	496.635

7. SONUÇ

Mobilya sektörü tüm dünyada olduğu gibi Türkiye’de de gelişmektedir. Türkiye’deki hammadde ve yarı mamul bolluğu olması mobilya üretimine uygun bir ortam oluşmasını sağlamaktadır.

Ülkemizde şu anda birçok kaliteli üretim yapan mobilya fabrikaları vardır. Bu fabrikaların, hem Türk halkına hem de ekonomiye büyük katkıları vardır. Fabrikaların nasıl kurulduğunu, kurulurken hangi ihtiyaçlara gereksinim duyulduğu bu çalışmada gösterilmiştir.

Günümüz teknolojisine uygun bir mobilya fabrikası kurulmak isteniyorsa en azından bu çalışmada değinilen hususlara ve takip edilen plana ve programa uymak gerekir. Görüldüğü gibi bu çalışmada bir fabrikanın kuruluş maliyeti 2.710.054 \$ tutmaktadır. Eğer fabrikaya bir yıl yetecek kadar malzeme stok edersek o zaman toplam maliyet 1.604.262 \$ gerekmektedir.

Fabrikanın ekonomik yönden analizi yapılmış ve kurulacak işletmenin yıllık nakit akışı 496.635 \$ olarak gerçekleşmesi beklenmektedir.

KAYNAKÇA

- Ahşap Malzeme Üreticileri. (2024). *Türkiye genelindeki çeşitli fabrikaların fiyat listeleri*.
- Baykan, İ., Burdurlu, E., Er, H., & Şenay, A. (1997). *I. Ulusal Mobilya Kongresi bildiri kitabı*. Hacettepe Üniversitesi Mesleki Teknoloji Yüksek Okulu, Ağaç İşleri Endüstri Mühendisliği.
- Bilgisayar ve İletişim Sanayii. (2025). *Teknolojik veriler ve sektör raporları*. İstanbul.
- Boya ve Kimya Sanayii. (2022). *Sektörel fiyat ve teknik veriler*. İstanbul.
- Işık, A. (1998). *Mühendislik ekonomisi*. Dumlupınar Üniversitesi Simav Teknik Eğitim Fakültesi.
- İmalatçı Firmalar. (2025). *Ürün katalog ve fiyat listesi*. Konya.
- İnşaat Malzemeleri Yetkili Satıcısı. (2025). *Güncel malzeme fiyat listeleri*. Konya.
- Kereste Fabrikaları. (2025). *Türkiye genelindeki çeşitli fabrikaların fiyat listeleri*.
- Konya Büyükşehir Belediyesi. (2025). *İlgili birim verileri ve yönetmelikler*. Konya.
- Konya Ticaret Odası. (2024). *Kurumsal veriler ve kayıtlar*. Konya.
- Makine İmalatçıları. (2024). *Ürün katalog ve fiyat listesi*. Bursa.
- Mobilya Fabrikaları. (2024). *Fabrika verileri ve üretim kapasite raporları*. Konya.
- Müteahhitlik Bürosu. (2023). *Birim maliyet ve uygulama kayıtları*. Konya.
- Ticarethane ve Hırdavatçılar. (2024). *Güncel stok ve fiyat listeleri*. Konya.

BÖLÜM 12

ÜNİVERSİTELERDE SÜRDÜRÜLEBİLİR EĞİTİMİN ENTEGRASYONU: MÜHENDİSLİK VE TEKNOLOJİ FAKÜLTELERİNDE EĞİTİM-ÖĞRETİM MODELİ

Cebeli ÖZEK¹

¹ Prof. Dr., Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü ORCID: 0000-0001-7603-415X

1. Giriş

Mühendislik eğitimindeki sürdürülebilirlik eğitimi ve araştırma kapasitesinin mevcut durumunu değerlendirmeyi ve sürdürülebilirlik bilgisi, öğretimi ve araştırma faaliyetleri hakkında yeni ve çok ihtiyaç duyulan bilgiler sağlamayı amaçlamaktadır.

Bazı kurumlar, diğerlerine göre öğretim derslerinde ve araştırma faaliyetlerinde daha fazla sürdürülebilirlik konusuna yer vermektedir. Öğretim kadrosu ve bölüm başına düşen ders sayısı ve sürdürülebilirlik içerikleri, seçilen üniversiteler arasında farklılık göstermektedir. Öğretim faaliyetleri, özellikle üretim-imalat, enerji, ısı ve su verimliliği olmak üzere çevresel sürdürülebilirliğe odaklanmaktadır.

Yürütülen öğretim ve araştırmalar ile Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri arasındaki boşluklar ve politika yapıcılar için ise çalışma, yükseköğretimde, özellikle mühendislik okullarında sürdürülebilirliğin durumunun, örneğin yayınlanmış makale sayısını, sürdürülebilirliği ele alan ders ve yüksek lisans programlarının sayısını artırmak ve üniversitelerin ve hükümetin desteğine büyük ihtiyaç duyduğunu göstermektedir.

Mühendislik okullarında sürdürülebilirlik eğitimi ve araştırmaların entegrasyonuna ilişkin mevcut durum analizi önemlidir. Sürdürülebilirlik eğitimin çıktısı, yükseköğretim kurumlarının sürdürülebilir kalkınma üzerindeki etkilerini analiz etmek için gelecekteki araştırmalar için yararlı olmaktadır.

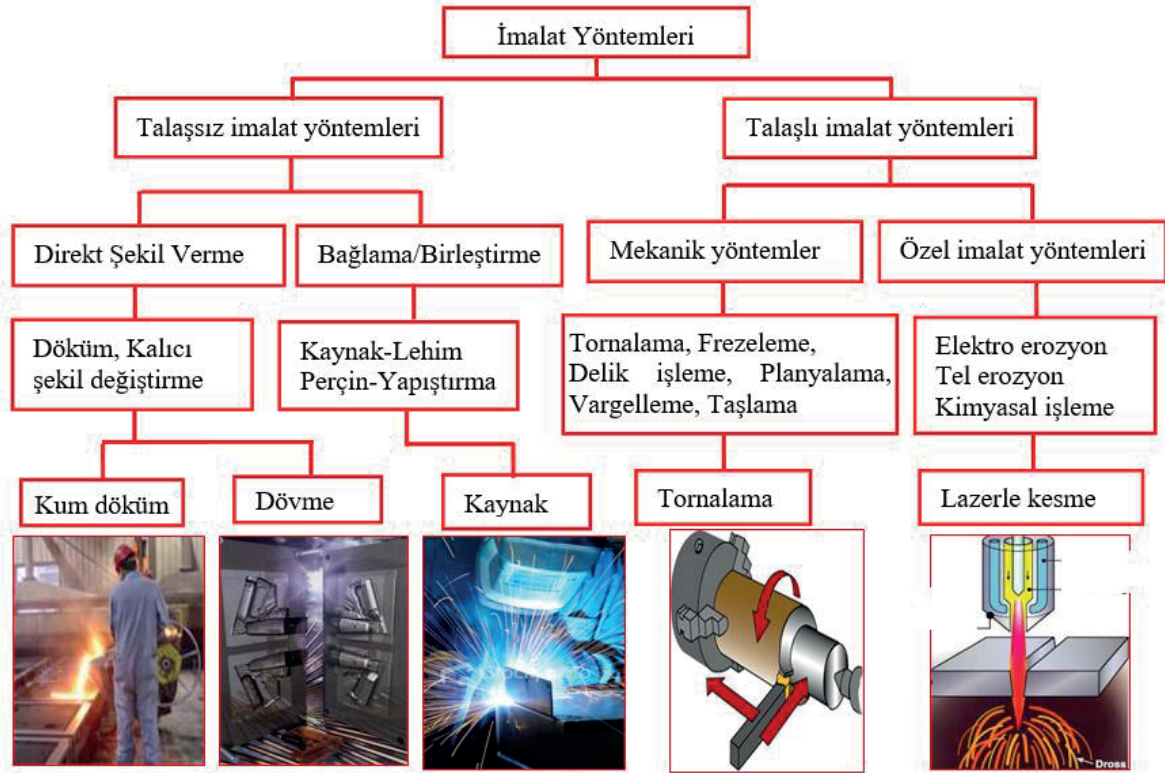
Son yıllarda, sürdürülebilir kalkınma ve sürdürülebilir kalkınma eğitimi konularına yönelik araştırmalara olan ilgi giderek artmaktadır. Bu bakımdan, yeryüzündeki yaşamımızda karşılaştığımız çevresel, ekonomik ve sosyal sorunlara yanıt vermek önemlidir. Sürdürülebilir kalkınma, geleceğin ihtiyaçlarını ve arzularını karşılama yeteneğinden ödün vermeden bugünün ihtiyaçlarını ve arzularını karşılamayı hedeflemek olarak tanımlanmıştır. Şu anda, iklim değişikliği, küresel ısınma, doğal kaynakların tükenmesi, çölleşme, gıda kıtlığı ve yüksek karbon emisyonları gibi çevreye yönelik artan zorluklar nedeniyle daha sürdürülebilir toplumlar ve ekonomiler için yüksek bir talep bulunmaktadır (1, 2, 3). Bunun için Birleşmiş Milletler birçok hedef içeren belirli bir dönem sürdürülebilir Kalkınma Gündem'ini belirlemiştir. Bu hedefler çevresel, sosyal ve ekonomik kalkınmayla ilgili çok çeşitli yönleri kapsamakta ve bunlar arasında sağlık ve eğitim güvencesi, doğal kaynakların yönetimi, kırsal ve kentsel kalkınma ve iklim değişikliği de yer almaktadır. Sürdürülebilir kalkınmanın en önemli parametrelerinden biri eğitimidir (4; 5). Sürdürülebilir kalkınma için eğitim terimi ilk kez 1992'de Rio de Janeiro'daki Dünya Zirvesi'nde kabul edilmiş ve burada eğitim, daha sürdürülebilir geleceğe giden önemli bir yol olarak ele alınmıştır (6). Sürdürülebilir kalkınma için eğitim temaları; sürdürülebilir fiziksel operasyonlar, çevre okuryazarlığı, sürdürülebilir akademik araştırma, etik ve ahlaki sorumluluk, disiplinler arası müfredat geliştirme, üniversiteler ve ülkeler arasında işbirliği, hükümet ve sivil toplum kuruluşları ve endüstri ile ortaklıklar ile ekolojik açıdan sağlıklı bir toplum, yükseköğretim kurumlarından güçlü bir desteğe ihtiyaç duymaktadır. Yükseköğretim kurumları (YÖK), sürdürülebilir kalkınmayı teşvik etmede ana itici güç olarak kabul edilir. Çünkü bugünün öğrencileri yarının profesyonelleri, karar vericileri ve tüketicilerdir (7; 8, 9). Üniversite eğitimi ve özellikle de mühendislik eğitimi, sürdürülebilir kalkınmaya yönelik sosyal dönüşümde önemli bir rol oynar (10, 11).

Sürdürülebilirliğin mühendislik eğitimine ve araştırmasına entegre edilmesi çok önemlidir. Çünkü mühendislik eğitimi, sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmada ve sınırlı kaynakları verimli kullanmada önde gelen sektörlerden biridir (12; 13; 14, 15).

Üniversitelerde mühendislik eğitiminde sürdürülebilirliğin entegrasyonundaki yavaş ilerleme, mühendislik pazarında ve ekonomik düzeyde sürdürülebilir kalkınmaya doğru dönüşümün önünde bir engel olabilir (16,17). Yükseköğretim düzeyinde sürdürülebilir kalkınmayı genel olarak ve mühendislik okullarında sürdürülebilir kalkınma hedeflerini ele alan ve disiplinler arası derslerin ve araştırma çalışmalarının sayısı, sürdürülebilirliğin önemiyle birlikte artmaktadır (17; 18; 19, 20). Üniversitelerde sürdürülebilirlik konularını entegre etmek ve uygulamak için yaklaşım, araştırma programları ve eğitim müfredatları için kaynakları ve personel için araştırma ve öğretim kapasitesi geliştirme çalışmalarını içermelidir. Sürdürülebilir kalkınmayı sağlamak için sürdürülebilirlik ilkelerini üniversitelerin araştırma ve öğretim faaliyetlerine entegre etmeye yönelik bütüncü yaklaşım yalnızca gerekli değil, aynı zamanda sürdürülebilir uygulamaların hayata geçirilmesinde de etkili ve bir zorunluluk olarak değerlendirilmelidir (21, 21, 22). Ulusal kaynaklar ve politikalar, üniversite politikaları, liderlik ve üniversite personelinin katılımı, çevresel sürdürülebilirliğin entegrasyonu için en önemli etkenlerdir (23). Yükseköğretim müfredatında sürdürülebilirlik üzerine yapılan araştırmalar ve öneriler, sürdürülebilirliği yükseköğretime entegre etmek için genel bir seçenek geliştirmeyi ve sunmayı; sürdürülebilirliği mevcut derslere veya programlara entegre ederek, sürdürülebilirlik dersleri veya programları için yeni disiplinler oluşturarak, temel ders ihtiyaçlarına dahil ederek ve sürdürülebilirlik için yeni disiplinler arası dersler veya programlar oluşturarak başarmıştır.

2. Mühendislik Fakültelerinde Eğitim ve Öğretim Modeli

Mühendislik eğitiminde, mekanik talaşlı üretim yöntemleri: tornalama, frezeleme, planyalama-vargelleme, delik işleme, broşlama, taşlama, honlama, lepleme gibi işlemleri içerir. Bu gruba vida açma, diş açma gibi işlemler de dahil edilir. Fiziksel-kimyasal işleme yöntemleri denilen özel imalat yöntemleri, elektro erozyon, tel erozyon, kimyasal frezeleme, lazer ve elektron çubuğu işleme gibi işlemleri içerir (31). Talaşsız üretim (Plastik şekil verme) yöntemleri için genel imalat yöntemleri Dövme, Haddeme, Extrüzyon, Çubuk çekme, Tel çekme, Kesme, Eğme, gererek çekme ve derin çekme olarak verilmişlerdir. Örnek olarak makine mühendisliği bölünü verebiliriz. Makine mühendisliği eğitimi matematik, fizik, malzeme, tasarım ve üretim alanlarında sağlam bir temel sağlar. Programlar teorik dersler, laboratuvar uygulamaları, CAD/CAE çalışmaları ve proje tabanlı öğrenmeyi birleştirir; birçok üniversite ayrıntılı dönemlik müfredatlarını yayımlar ve program yapıları benzerlik gösterir. Makine mühendisliğinde temel amaç, mezunları endüstride ve AR-GE'de çalışabilecek, analitik düşünebilen ve tasarım yapabilen matematiksel modelleme, deney tasarımı, malzeme seçimi, üretim süreçleri bilgisi, takım çalışması ve etik sorumluluk alabilen mühendisler olarak yetiştirmektir. Aşağıda Şekil 1'de imalat yöntemlerinin özet olarak sınıflandırması verilmiştir.



Şekil 1. Mühendislik eğitiminde, mekanik talaşlı üretim yöntemleri

Mühendislik Fakülteleri, genellikle mühendislik biliminin teorik temellerini, matematiksel modellemeyi ve araştırma odaklı çalışmaları ön planda tutar. Mühendislik Fakültelerinde ise Uygulamalı Mühendislik Eğitimi ile Öğrencilere endüstri standartlarında uygulama becerileri, güvenlik kültürü ve proje yönetimi deneyimi kazandırılmaktadır. Teknoloji Fakülteleri ise mevcut teknik bilgilerin uygulamasına, endüstriyel problemlerin çözümüne ve pratiğe daha fazla ağırlık verir. Bu iki yapı, eğitim hedefleri ve mezun profilleri açısından farklılık gösterir. Mühendislik fakülteleri akademik ve AR-GE'ye yönelik, teknoloji fakülteleri ise uygulama ve mesleki yeterliliklere odaklı mezunlar yetiştirmeyi hedeflemektedir (Şekil 2).



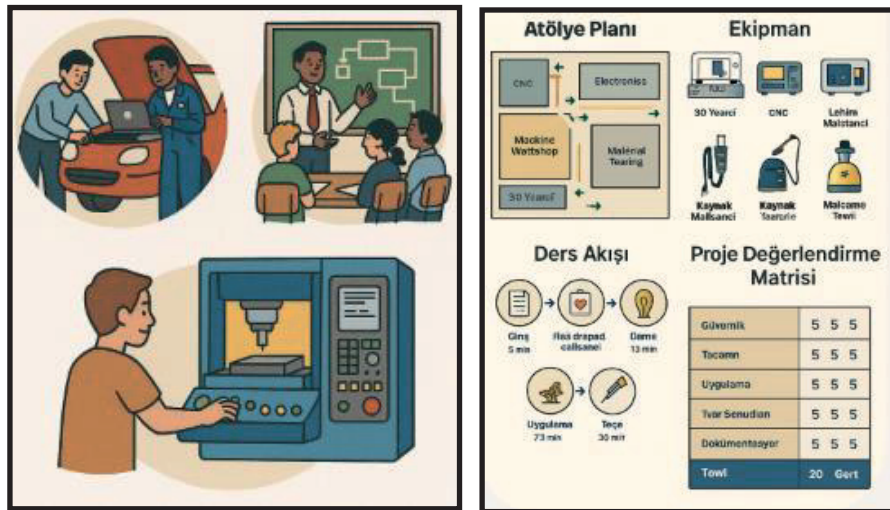
Şekil 2. Mühendislik Fakültelerinde, Eğitim-Öğretim ve laboratuvar ortamı

Küresel olarak, özellikle Batı Avrupa ve Kuzey Amerika'da yükseköğretimde sürdürülebilirlik durumu hakkında iyi kurulmuş araştırmalar mevcuttur (24, 25). Ayrıca, sürdürülebilirliğin mühendislik eğitime entegrasyonu ve bu entegrasyonun önemi farklı araştırmacıların çalışmaları ile ele alınmıştır (26; 27, 28). Birçok doğu Avrupa ülkesi ve Brezilya gibi gelişmekte olan ekonomilere sahip ülkelerde, sürdürülebilirliğin mühendislik eğitime entegrasyonu henüz tam olarak yerleşmiş değildir. Ancak, bu dönüşümün durumunu ele alan çeşitli çalışmalar bu ülkelerde de yapılmıştır (29, 30).

3. Teknoloji Fakültelerinde Eğitim ve Öğretim Modeli

Teknoloji fakültelerinde teorik derslerin yanında uygulamalı laboratuvar çalışmaları, atölye eğitimi ve işletme stajları müfredatta belirgin yer tutar. Bazı programlarda eğitim sürecinin bir dönemi doğrudan işletmede uygulama olarak planlanmıştır. Mühendislik fakültelerinde ise daha yoğun matematik, fizik ve temel mühendislik teorileri öğretilir. Araştırma yöntemleri ve ileri düzey teorik dersler daha fazla yer almaktadır. Teknoloji Fakülteleri daha çok uygulama ve endüstri bunun yanında teorik ve araştırma odaklı, Mühendislik Fakülteleri ise daha derin teorik altyapı ve araştırma odaklı eğitim verir; doğru tercih, öğrencinin kariyer hedefine ve öğrenme tarzına bağlı olarak değişir.

Teknoloji fakülteleri uygulama ağırlıklı pedagojiler kullanarak proje tabanlı öğrenme, endüstri iş birlikleri ve saha uygulamaları ile öne çıkar. Bu da öğrencilerin mezun olurken doğrudan üretim, bakım, uygulama ve teknik yönetim rollerine daha hızlı adapte olmalarını sağlar (Şekil 3). Teknoloji Fakültelerinde, Öğrencilere atölye ve laboratuvar ortamında güvenli, proje odaklı ve endüstri standartlarına uygun uygulama becerileri kazandırılarak; Teknik beceriler ve uygulamaları, Güvenlik ve prosedürleri, Risk değerlendirmesi, acil durum ve kişisel koruyucu donanım ve Proje yönetimi, Tasarım, prototipleme, test ve dokümantasyon becerileri kazandırılmaktadır. Mühendislik fakülteleri ise problem çözme, modelleme ve tasarım yetkinliklerini derinleştirir. Akademik araştırma ve ileri mühendislik rollerine hazırlık eğitimlerini sağlar.



Şekil 3. Teknoloji Fakültelerinde, Eğitim-Öğretim, atölye ve Uygulama ortamı

Her iki fakültenin mezunları da sanayi ve hizmet sektöründe iş bulabilmektedir; Pozisyon türünde ve başlangıç sorumluluklarında aynıdır. Teknoloji mezunları genellikle uygulama ağırlıklı mühendislik eğitimi ve saha rolleriyle; mühendislik mezunları ise tasarım, AR-GE, proje yönetimi ve akademik kariyerle daha sık ilişkilendirilebilmektedir. İşverenler,

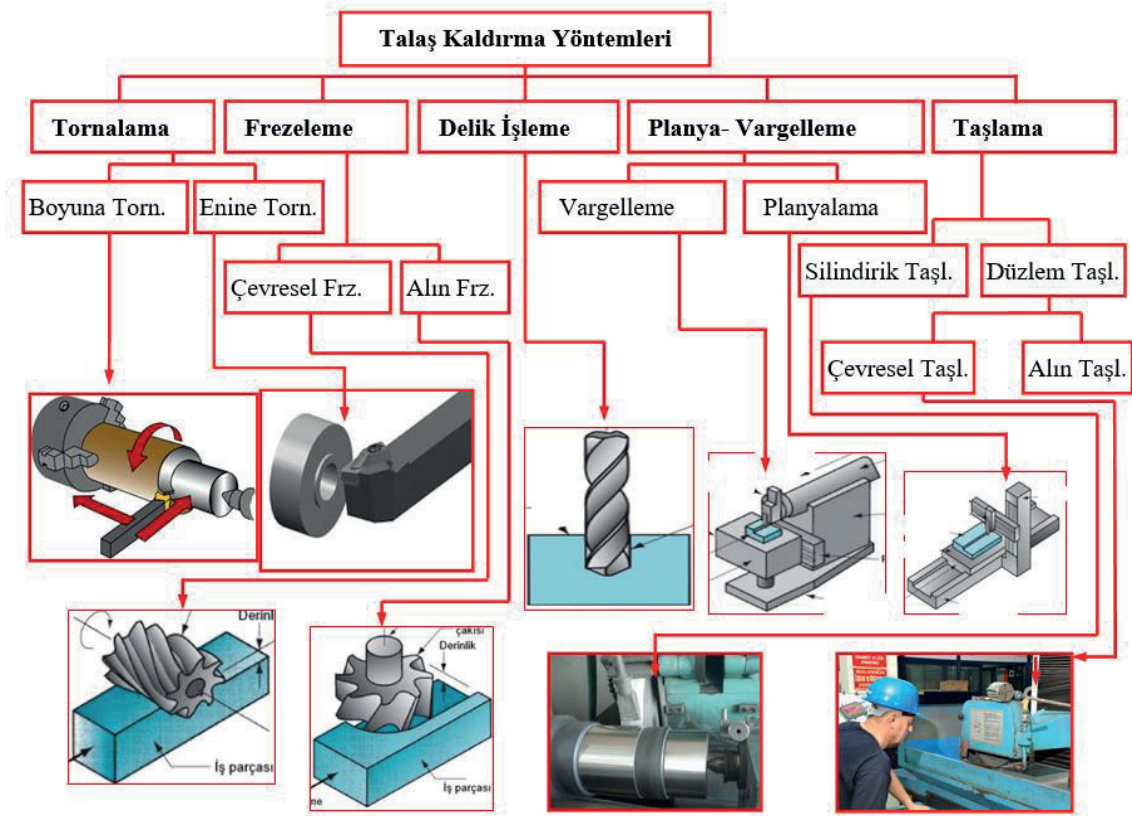
pozisyona göre teorik altyapısı daha iyi yoksa uygulama deneyimi daha iyi olan mühendisleri aradıklarını belirler.

Teknoloji Fakültelerinin yakın ve orta vadeli geleceğini; eğitim modellerindeki dönüşümü; Dijital dönüşüm, otomasyon, yapay zekâ ve sürdürülebilirlik talepleri teknoloji eğitiminin içeriğini ve yöntemlerini yeniden şekillendiriyor. Bu etkenler, uygulamalı becerilere olan talebi artırırken, fakültelerin endüstriyle daha yakın çalışmasını zorunlu kılıyor. Teknoloji fakültelerinin tercih edilme nedenleri ve artan görünürlüğü, üniversite ve sektörel değerlendirmelerde daha çok vurgulanmaktadır.

Geleneksel ders yapıları yerini modüler, proje tabanlı ve yetkinlik odaklı programlara bırakacak, laboratuvar, atölye ve saha uygulamaları ile hızlı öğrenme yöntemleri ön plana çıkacak; mikro-sertifika ve yaşam boyu öğrenme seçenekleri yaygınlaşacak. Bu değişim, mezunların hızlı adaptasyon ve çapraz disiplin yetkinlikleri kazanmasını sağlayacaktır.

Teknoloji fakülteleri, sanayi ortaklıkları, ortak AR-GE projeleri ve kooperatif eğitim modelleri ile öğrenciyi doğrudan iş hayatına hazırlayacak. Üniversite-sanayi köprüleri, hem müfredatın güncel kalmasını hem de mezunların istihdam edilebilirliğini artırmaktadır. Bazı üniversitelerde bu eğilim mühendislik fakültelerinde de güçlenmektedir.

Teknoloji fakültelerinde öğrenci odaklı eğitimde üretim modeli için talaşlı imalat uygulaması örneği verilebilir. Talaşlı imalat metal, plastik ve ahşap gibi malzemelerin yüzeyinden veya iç bölgelerinden talaş olarak isimlendirilen bir malzeme tabakası kaldırılarak şekil veren işlemdir. Malzeme tabakası kaldırma işlemi kesici ağızı olan bir takım ile takım tezgâhı denilen makinelerde yapılır. İşlemden, talaş alma kesici ile malzemeye çeşitli hareketler verilerek gerçekleştirilir (Şekil 4).



Şekil 4. Teknoloji Fakültelerinde, Eğitim-Öğretim, atölye ve Uygulama Ortamı

Teknoloji fakülteleri, uygulamalı AR-GE ve prototipleme merkezleri aracılığıyla küçük ölçekli yenilikleri hızla ticarileştirebilen ekosistemler kurmakta, bu merkezler, öğrenci girişimciliğini destekleyerek yerel ekonomik kalkınmaya katkı sağlayacak ve disiplinler arası projeleri teşvik etmektedir.

Geleceğin teknoloji mezunları sistemsel düşünme, veri okuryazarlığı, dijital araç hâkimiyeti ve iletişim becerileri ile donanımlı olacaktır. Teorik altyapı ile uygulama deneyiminin dengelendiği programlar, mezunları hem saha hem de yönetim rollerini güçlendirmektedir.

Kaynak yetersizlikleri, öğretim elemanı yetiştirme, altyapı maliyetleri ve hızlı teknolojik değişim, fakültelerin önündeki başlıca risklerdir. Bu riskler, stratejik planlama ve kamu-özel sektör ortaklıklarıyla azaltılabilir.

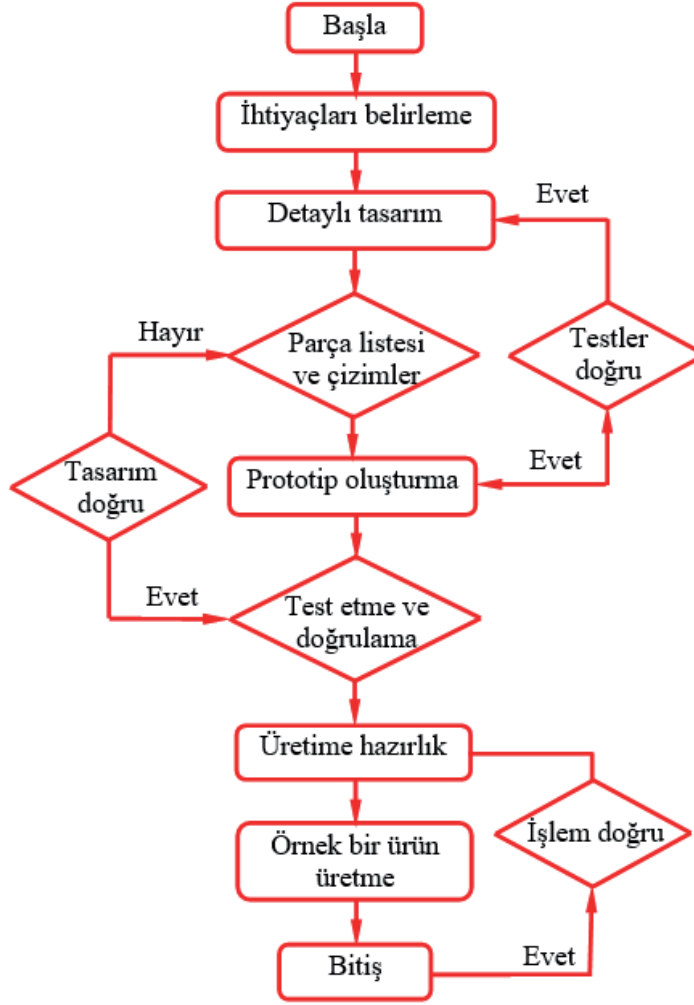
Üniversite personeli ve araştırmacıları arasında sürdürülebilirlik hakkındaki bilgi, çevre, ekonomi, sosyal, verimlilik ve performans, dayanıklılık, kaynaklar, yenilenebilir ve geri dönüştürülebilir malzemeler, enerji ve yeşil malzemeler dâhil olmak üzere sürdürülebilirliğin birçok yönü bulunmaktadır. Öğretim üyesi veya elemanı başına ve bölüm başına ders sayısı ve bu derslerin sürdürülebilirlik içeriği seçilen üniversiteler arasında önemli ölçüde farklılık göstermektedir. Öğretim faaliyetleri, özellikle enerji verimliliği, termal verimlilik, yeşil bina ve pasif sistemler gibi belirli çevresel sürdürülebilirlik konularına odaklanmaktadır. Diğer yeni konular, öğretim üyeleri, araştırmacılar ve yönetimden daha fazla ilgi gerektirmektedir.

Öğretim üyesi veya elemanı ve araştırmacılar arasında sürdürülebilirlik bilgisine ilişkin önemli sorumluluklar düşmektedir. Bu sorumluluk geniş bir yelpazeyi kapsamaktadır. Üniversiteler, iklim değişikliği ve hava kalitesi gibi daha az hedefli konuları içerecek şekilde bu bilgiyi genişletebilirler. Öğretim ve araştırma faaliyetlerine gelince, üniversitelerin kapsamı dâhilindeki konulardaki ve araştırma çıktısındaki eksiklikleri gidermeleri gerekmektedir. Açıkçası, üniversiteler belirli bölümlere daha fazla önem verebilir ve belirli araştırma konularına daha fazla yatırım ve fon ayırabilirler.

Sürdürülebilirlik eğitimi ile ilgili alanlarda öğretim, araştırma ve geliştirme ve yayınlanmış akademik çalışmalar, makaleler arasındaki karşılaştırmalı analize katkıda bulunmaktadır. Üniversiteler ve hükümetler, araştırma merkezlerine ve üniversitelere sağlanan gelecekteki destek için bu analizlerden yararlanabilirler. Politika yapıcılar üzerindeki etkisine gelince, özellikle mühendislik okullarında yükseköğretimde sürdürülebilirliğin durumunun, yayınlanmış makale sayısını artırmak, ancak bu bilimsel makale ve araştırmaların Üniversite-Sanayi işbirliğine katkısının sürdürülebilirliği doğrudan etkileyen derslerin ve lisansüstü programlarının sayısını artırmanın üniversitelerin ve hükümetin desteğine önemli ölçüde ihtiyaç duyduğunu göstermektedir.

4. Mühendislik Eğitiminde Ürün Geliştirme Süreci Ve Aşamaları

Mühendislik Eğitiminde ister Teknoloji fakültelerinde ister Mühendislik fakültelerinde olsun, herhangi bir ürün geliştirme, fikir oluşturma safhasından pazar aştırmasına kadar giden birçok disiplinle ortak bakılması gereken bir süreçtir. Bu sürecin başarılı olması; net hedefler, tekrarlı doğrulama, disiplinler arası iletişim ve üretilirlik odaklı bir tasarım gerektirir. Bu yüzden herhangi bir ürün geliştirme konstrüksiyon (tasarım) odaklı başlayıp imalat (üretim) aşamasına kadar detaylandırılması önemlidir. Aşağıda şekil 5’de ürün geliştirme süreci ve aşamalarını gösteren akış şeması verilmiştir.



Şekil 5. Mühendislik eğitiminde bir ürün geliştirme süreci ve akış şeması

Bu detaylar; Müşteri gereksinimleri, pazar analizi ve teknik gereksinimler olup ihtiyaç analizi ve ürün tanımı, bu en önemli adımdır. Çünkü bu adım sonraki tüm kararların dayanağıdır. Farklı konseptlerin üretimi, hızlı prototipler ve değerlendirme kriterleri ile fikir doğrulama, maliyet ve üretilebilirlik ön değerlendirmeler, yani kavramsal tasarım, Seçilen konseptin mekanik, elektrik ve yazılım bileşenleri detaylandırılır. Parça montaj sırası ve toleranslar bu aşamada tanımlanır ki detay konstrüksiyon, Fonksiyonel prototiplerin üretimi, performans, güvenlik ve uyumluluk testlerinin yapılması, test sonuçları tasarım döngüsüne geri beslenir ve gerekirse revizyonların yapılması prototipleme ve test, Üretim çizimleri, kalite planları, tedarikçi seçimi ve üretim proseslerinin belirlenmesi, pilot üretim ile süreç geçerliliği yapılır ve üretim kapasitesi doğrulanır buda üretim hazırlığı, Onaylanan işlem ve deneylerle seri üretime geçilir; sürekli iyileştirme, kalite kontrol ve tedarik zinciri yönetimi ile üretim sürdürülebilir hale getirilir ve seri imalat ve süreklilik ile detaylandırma ve ürün nihai üretimi gerçekleşmiş olur. Süreç stabil değilse proses iyileştirme ve tedarikçi optimizasyonu mutlaka yapılmalıdır.

Son olarak, Türk yükseköğretim kurumlarındaki mühendislik okullarında sürdürülebilirliğin entegrasyonuna ilişkin idari yapı, mali destek ve politikalar hakkındaki düşünce ve bilgilerimizi genişletmek için daha fazla çalışmanın gerekli olduğu bir gerçektir.

5. Sonuç

Mühendislik fakültelerinde teorik altyapı + tasarım ve araştırma odaklı uygulamalar, teknoloji fakültelerinde ise uygulama ve uygulamaya dönük üretim becerileri daha ön planda tutulmaktadır. Aşağıda Tablo 1’de Teknoloji fakültelerindeki eğitim ile Mühendislik Fakültelerindeki eğitim karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 1. Teknoloji Fakültelerindeki Eğitim ile Mühendislik Fakültelerindeki Eğitim Karşılaştırması

Özellik	Mühendislik Fakültesi	Teknoloji Fakültesi	Uygulama Odaklılık	Mezuniyet Yetkisi
Eğitim İçeriği	Teori, matematik, tasarım; araştırma projeleri	Uygulama, atölye, üretim süreçleri ve ileri imkânları	Mühendislik düşük, Teknoloji yüksek	Her iki fakülte mezunları eşdeğer kabul edilmektedir
Laboratuvar/ Staj	İleri laboratuvar ve AR-GE projeleri destekli	Atölye, endüstri stajları, uygulamalı laboratuvar ve teorik destekli bilgi	Teknoloji daha yoğun, Mühendislik daha düşük uygulama saatine sahip	YÖK/ÜAK kararlarıyla eşdeğerlik düzenlemeleri mevcuttur
Kariyer Yönü	Tasarım, AR-GE, akademik kariyer	Üretim, saha çalışmaları, mühendislik uygulamaları	Teknoloji mezunları sahada pratik rollere daha hızlı adapte olur	Resmi düzenlemeler kurumlara göre farklılık gösterebilir

Tabloda görüldüğü gibi, Mühendislik fakültelerinde uygulama genellikle tasarım projeleri, simülasyonlar, ileri laboratuvar deneyleri ve araştırma projeleri şeklinde ve uygulama saatleri teorik derslerle dengelenir.

Teknoloji fakültelerinde uygulama atölye çalışmaları, üretim süreçleri, saha uygulamaları ve endüstri odaklı projelerle daha yoğun ve öğrenciler pratik becerileri erken kazanmakta ve endüstri ile doğrudan bağlantı kurma imkânı bulmaktadır.

Staj ve iş birlikleri her iki fakülte için kritik olup, teknoloji fakülteleri genelde yerel sanayi ile daha sıkı bağlar kurarken mühendislik fakülteleri ise büyük ölçekli AR-GE projelerine erişimi daha kolay sağlayabilmektedir.

Sadece fakülte adıyla karar vermek yanıltıcı olabilir; aynı fakülte içinde bölümler ve üniversiteler arasında uygulama yoğunluğu büyük farklılık gösterir.

Teknoloji Fakültelerindeki Eğitim ile Mühendislik Fakültelerindeki Eğitimin karşılaştırılmasında karar için önemli noktalar:

1. Eğer pratik, atölye ve saha deneyimi sizi motive ediyorsa Teknoloji Fakültesi daha uygun olmaktadır.

2. Eğer matematiksel modelleme, araştırma ve ileri tasarım ilginiz ise Mühendislik Fakültesi mezunları tercih edilmelidir.

3. Staj ve endüstri ve sanayi uygulama bağlantıları, bölüm seçerken öncelikli değerlendirme kriterleri olmalıdır.

4. Akademik araştırma ve ileri tasarım hedefliyorsanız mühendislik; uygulama, üretim ve saha odaklı hızlı işe giriş hedefliyorsanız teknoloji fakülteleri daha uygun olacaktır.

5. Teknoloji ve Mühendislik fakülteleri birbirini tamamlayan, farklı gözükmesine rağmen eşdeğer eğitim sunmaktadırlar. Doğru seçim, öğrencinin öğrenme tarzına, kariyer hedeflerine ve tercih ettiği çalışma ortamına göre yapılmalıdır.

6. Teknoloji fakülteleri, uygulama odaklı eğitim, endüstri iş birlikleri ve hızla değişen teknoloji ekosistemine uyum sayesinde önümüzdeki yıllarda daha merkezi bir rol oynayacak; eğitim modelleri, müfredat ve mezun profilleri buna göre dönüşecek.

7. Kısa vadede teknoloji fakülteleri uygulama ve istihdam odaklı büyüyecek fakültelerdir. Orta vadede ise AR-GE ve girişimcilik merkezleriyle bölgesel inovasyon aktörlerine dönüşeceklerdir. Üniversiteler, müfredat esnekliği, sanayi ortaklıkları ve yaşam boyu öğrenme altyapısına yatırım yapmalıdır. Bu stratejiler, hem öğrencilerin hem de ülke ekonomisinin rekabet gücünü artıracaktır.

8. Mühendislik fakültelerinde sürdürülebilirliğin ele alınmasındaki eksiklikler göz önüne alındığında, üniversite yönetimleri sürdürülebilirliğin diğer yönlerine ve farklı seviyelerdeki öğrencilere dikkat etmelidir. Bu bulgular, üniversitelerde tüm mühendislik bölümlerinde sürdürülebilirliği eşit şekilde ele almak için planlar veya çerçeveler oluşturma fırsatı sunabilirler.

Kaynaklar

- [1] Alba-Hidalgo, D., Benayas del Álamo, J. and Gutiérrez-Perez, J. (2018), "Towards a definition of environmental sustainability evaluation in higher education", *Higher Education Policy*, Vol. 31, pp. 447-470, doi: 10.1057/s41307-018-0106-8.
- [2] Alexa, L., Maier, V., S. erban, A. and Craciunescu, R. (2020), "Engineers changing the world: education for sustainability in Romanian technical universities an empirical web-based content analysis", *Sustainability*, Vol. 12 No. 5, p. 1983.
- [3] Arefin, M.A., Nabi, M.N., Sadeque, S. and Gudimetla, P. (2021), "Incorporating sustainability in engineering curriculum: a study of the Australian universities", *International Journal of Sustainability in Higher Education*, Vol. 22 No. 3, pp. 576-598.
- [4] Argento, D., Einarson, D., Mårtensson, L., Persson, C., Wendin, K. and Westergren, A. (2020), "Integrating sustainability in higher education: a Swedish case", *International Journal of Sustainability in Higher Education*, Vol. 21 No. 6, pp. 1131-1150.
- [5] Blanco-Portela, N., Benayas, J., Pertierra, L. and Lozano, R. (2017), "Towards the integration of sustainability in higher education institutions: a review of drivers of and barriers to organisational change and comparison against those found of companies", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 166 No. 10, pp. 563-578, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.07.252.
- [6] Boeve-de Pauw, J., Gericke, N., Olsson, D. and Berglund, T. (2015), "The effectiveness of education for sustainable development", *Sustainability*, Vol. 7 No. 11, pp. 15693-15717.
- [7] Brandli, L.L., Leal Filho, W., Frandoloso, M.A.L., Korf, E.P. and Daris, D. (2015), *The Environmental Sustainability of Brazilian Universities: Barriers and Pre-Conditions*, Springer nature, Switzerland.
- [8] Caeiro, S., Sandoval Hamon, L.A., Martins, R. and Bayas Aldaz, C.E. (2020), "Sustainability assessment and benchmarking in higher education institutions a critical reflection", *Sustainability*, Vol. 12 No. 2, p. 543.
- [9] Cortese, A.D. (2003), "The critical role of higher education in creating a sustainable future", *Planning for Higher Education*, Vol. 31 No. 3, pp. 15-22.
- [10] Creswell, J.W. (2007), *Qualitative Inquiry and Research Design: Choosing among Five Approaches*, 2nd ed., Sage Publications, Thousand Oaks, CA.
- [11] Derek, S. and Ken, T. (2012), "Integrating sustainability into civil engineering education: curriculum development and implementation", 4th International Symposium for Engineering Education, July 2012, The University of Sheffield.
- [12] Desha, C.J., Hargroves, K. and Smith, M.H. (2009), "Addressing the time lag dilemma in curriculum renewal towards engineering education for sustainable development", *International Journal of Sustainability in Higher Education*, Vol. 10 No. 2, pp. 184-199.
- [13] Ellis, G. and Weekes, T. (2008), "Making sustainability 'real': using group-inquiry to promote education for sustainable development", *Environmental Education Research*, Vol. 14 No. 4, pp. 482-500.
- [14] Ferguson, T. and Roofe, C.G. (2020), "SDG 4 in higher education: challenges and opportunities", *International Journal of Sustainability in Higher Education*, Vol. 21 No. 5, pp. 959-975.
- [15] Findler, F., Schönherr, N., Lozano, R., Reider, D. and Martinuzzi, A. (2019), "The impacts of higher education institutions on sustainable development: a review and conceptualization", *International Journal of Sustainability in Higher Education*, Vol. 20 No. 1, pp. 23-38.

- [16] Finnveden, G., Friman, E., Mogren, A., Palmer, H., Sund, P., Carstedt, G., Lundberg, S., Robertsson, B., Rodhe, H. and Svärd, L. (2020), "Evaluation of integration of sustainable development in higher education in Sweden", *International Journal of Sustainability in Higher Education*, Vol. 21 No. 4, pp. 685-698.
- [17] Goni, F.A., As, S., Mukhtar, M. and Sahran, S. (2015), "Environmental sustainability: research growth and trends", *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, Vol. 21 No. 2, pp. 192-195.
- [18] Green, T.L. (2013), "Teaching (un)sustainability? University sustainability commitments and student experiences of introductory economics", *Ecological Economics*, Vol. 94, pp. 135-142.
- [19] Grosseck, G., Țîru, L.G. and Bran, R.A. (2019), "Education for sustainable development: Evolution and perspectives: a bibliometric review of research, 1992-2018", *Sustainability*, Vol. 11 No. 21, p. 6136.
- [20] Itard, L. and Van den Bogaard, M. (2010), "Teaching environmental sustainability to higher education students: some reflections", *Open House International*, Vol. 35 No. 2, pp. 6-14.
- [21] Johnson, S. (2011), "Higher education and sustainable development: paradox and possibility", *Environmental Education Research*, Vol. 17 No. 2, pp. 281-284.
- [22] Jurgis, K.S. and Egl_e, K. (2016), "Complex evaluation of sustainability in engineering education: case and analysis", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 120, pp. 13-20.
- [23] Leal Filho, W., Shiel, C. and Do Paço, A. (2015a), "Integrative approaches to environmental sustainability at universities: an overview of challenges and priorities", *Journal of Integrative Environmental Sciences*, Vol. 12 No. 1, pp. 1-14.
- [24] Leal Filho, W., Azeiteiro, U., Caeiro, S. and Alves, F. (Eds), (2015b), *Integrating Sustainability Thinking in Science and Engineering Curricula*, World Sustainability Series, Springer, Cham.
- [25] Leifler, O. and Dahlin, J.E. (2020), "Curriculum integration of sustainability in engineering education – a national study of programme director perspectives", *International Journal of Sustainability in Higher Education*, Vol. 21 No. 5, pp. 877-894.
- [26] Lemkowitz, S.M., Bibo, B.H., Lameris, G.H. and Bonnet, J.A.B.A.F. (1996), "From small scale, short term to large scale, long term: integrating 'sustainability' into engineering education", *European Journal of Engineering Education*, Vol. 21 No. 4, pp. 353-386.
- [27] Lourdel, N., Gondran, N., Laforest, V. and Brodhag, C. (2005), "Introduction of sustainable development in engineers' curricula: problematic and evaluation methods", *International Journal of Sustainability in Higher Education*, Vol. 6 No. 3, pp. 254-264.
- [28] Mintz, K. and Tal, T. (2013), "Sustainability in higher education courses: multiple learning outcomes", *Studies in Educational Evaluation*, Vol. 41, pp. 113-123, doi: 10.1016/j.stueduc.2013.11.003.
- [29] Newport, D., Chesnes, T. and Lindner, A. (2003), "The environmental sustainability problem: ensuring that sustainability stands on three legs", *International Journal of Sustainability in Higher Education*, Vol. 4 No. 4, pp. 357-363.
- [30] Aikens, K., McKenzie, M. and Vaughter, P. (2016), "Environmental and sustainability education policy research: a systematic review of methodological and thematic trends", *Environmental Education Research*, Vol. 22 No. 3, pp. 1-27.
- [31] E. Koç, "Makine Elemanları-I", Adana Nobel Kitabevi, 3. Baskı, Cilt 1, 2007.