

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

Alanında Uluslararası Derleme, Araştırma ve Çalışmalar



EDİTÖR PROF. DR. COŞKUN ÖZALP

Genel Yayın Yönetmeni / Editor in Chief • C. Cansın Selin Temana

Kapak & İç Tasarım / Cover & Interior Design • Serüven Yayınevi

Birinci Basım / First Edition • © Aralık 2025

ISBN • 978-625-8559-73-6

© copyright

Bu kitabın yayın hakkı Serüven Yayınevi'ne aittir.

Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin almadan hiçbir yolla çoğaltılamaz. The right to publish this book belongs to Serüven Publishing. Citation can not be shown without the source, reproduced in any way without permission.

Serüven Yayınevi / Serüven Publishing

Türkiye Adres / Turkey Address: Kızılay Mah. Fevzi Çakmak 1. Sokak

Ümit Apt No: 22/A Çankaya/ANKARA

Telefon / Phone: 05437675765

web: www.seruvenyayinevi.com

e-mail: seruvenyayinevi@gmail.com

Baskı & Cilt / Printing & Volume

Sertifika / Certificate No: 47083

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

ALANINDA ULUSLARARASI DERLEME,
ARAŞTIRMA VE ÇALIŞMALAR

Editör **Prof. Dr. Coşkun ÖZALP**

İÇİNDEKİLER

Bölüm 1

METAL, SERAMİK, POLİMER VE KOMPOZİT MALZEMELERDE AŞINMA MEKANİZMALARI VE ÇOK FAZLI ETKİLEŞİMLER

Ali İhsan ENGÜR—1

Bölüm 2

BİLGİSAYAR DESTEKLİ ÜRETİMDE YAPAY ZEKÂNIN UYGULANMASI

Aysu AKILLI ARI—9

Bölüm 3

NANOKOMPOZİTLERİN MEKANİK VE TERMAL ÖZELLİKLERİ

Gülşah ALAR ÖNER—19

Bölüm 4

DAİRESEL DELİKLİ TÜRBÜLATÖRLERİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

İlker FIRAT—39

Bölüm 5

DÖNER TABLA DIŞLİSİNİN TASARIM VE İMALAT SÜREÇLERİNİN İNCELENMESİ

Can COŞKUN, Zuhul OKTAY, Mısra BAYRAM—53

Bölüm 6

BİYO BAZLI FAZ DEĞİŞİM MALZEMELERİ İLE TERMAL ENERJİ DEPOLAMA

Nergiz ÜLKER, Hüsamettin BULUT—67

Bölüm 7

NANOPARTİKÜL KATKILI YAKIT TEKNOLOJİLERİ: STABİLİTE, PERFORMANS, YANMA VE EMİSYON KARAKTERİSTİKLERİ

Gürkan KARA, Hakan ÖZCAN—85

Bölüm 8

EKLEMELİ İMALAT TEKNOLOJİLERİNİN TARİHSEL GELİŞİMİ VE ENDÜSTRİYEL DÖNÜŞÜMÜ

Arif BALCI, Fatih ALİBEYOĞLU—107

Bölüm 9

ENDÜSTRİDE BAKIM STRATEJİLERİ: SINIFLANDIRMA, UYGULAMA ALANLARI VE KARŞILAŞTIRMALI ANALİZ

Özkan KIZMAZ, Ramazan KÖSE—123

Bölüm 10

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ TASARIMINDA ANSYS KULLANIMI VE YAPISAL ANALİZ ÖRNEĞİ

Aysu AKILLI ARI, Harun YAKA—145

Bölüm 11

KESTİRİMCİ BAKIMDA TİTREŞİM, SICAKLIK VE YAĞ ANALİZİ YÖNTEMLERİNİN TEORİK KARŞILAŞTIRMASI

Ali İhsan ENGÜR—159

Bölüm 12

YENİLENEBİLİR ENERJİ VE TEKNOLOJİK İNOVASYON

Namık AK, Selman SEZER, Nurettin ÇEK—159

Bölüm 13

KAFES YAPILARIN EKLEMELİ İMALATLA ÜRETİMİ

Melih Canlıdınç—181

Bölüm 14

İÇ YÜZEYİNDE DİKDÖRTGEN KESİTLİ DÜZ KANATÇIKLAR BULUNAN BİR BORUDA NANOAKIŞKAN AKIŞININ AKIŞ VE ISIL KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ

Enes Yasin CANVERDİ, Tolga DEMİRCAN—199

Bölüm 1

METAL, SERAMİK, POLİMER VE KOMPOZİT MALZEMELERDE AŞINMA MEKANİZMALARI VE ÇOK FAZLI ETKİLEŞİMLER

Ali İhsan ENGÜR¹

¹ Dr. Öğr. Gör. Ali İhsan ENGÜR Kocaeli Üniversitesi, Gölcük MYO, Makine Bölümü, ali.engur@kocaeli.edu.tr ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0124-5491>

1. Giriş

Aşınma, iki sert yüzeyin birbiri ile temas etmesi sonucu malzeme zarar ve kaybının oluştuğu bir mekanik olaydır. Yüzey aşınmasında malzemenin yüzeyine yakın bölgenin daha gevrek bir yapıda olması beklenir. Sünek yüzeyler aşınma dışında farklı mukavvemet sorunları yaşarlar. Ayrıca aşınma sırasında çatlama ve kırılma olmaması için makine elemanının iç bölgesinin daha yüksek bir sönümleme kabiliyeti olması beklenir. Bu nedenle aşınma sadece yüzeyle bağlı kalarak incelenebilecek bir mekanik davranış değildir. Ancak aşınma, mühendislik sistemlerinde performans kaybına, enerji verimsizliğine ve ekonomik zararlara neden olmaktadır. Bu bölümde, farklı malzeme çeşitlerinin aşınma davranışları incelenmiş ve metaller, seramikler, polimerler ve kompozit malzemeler açısından karşılaştırmalı bir değerlendirme yapılmıştır. Bölümün amacı, aşınma türlerinin malzeme özellikleri üzerindeki etkilerini belirlemek ve uygun malzeme seçimi için uygun metodları geliştirmektir.

Aşınma, temas halindeki malzeme yüzeyleri arasında meydana gelen zarar neticesinde oluşan malzeme kaybı veya yüzey bozulması olarak tanımlanabilir. Makine elemanlarının ömrünü doğrudan etkileyen aşınma, tribolojinin temel araştırma konularından biridir. Makinelerde sürtünme, aşınma ve yağlama süreçlerinin birlikte incelenmesi, mekanik tasarımın verimliliği açısından kritik düzeyde öneme sahiptir. Aşınmanın nedenleri; mekanik yükler, yüzey pürüzlülüğü, ortam koşulları, yağlama eksikliği veya kaçığı ve malzemenin mikro yapısı gibi çok sayıda parametreye bağlıdır. Bu çalışmada farklı malzeme türlerine göre aşınma çeşitleri detaylı biçimde ele alınmıştır.

2. Aşınma Mekanizmaları ve Türleri

Aşınma genellikle dört ana mekanizma altında incelenir;

Yapışma (adhesive),

Abrazyon (abrasive),

Yorulma (fatigue) ve

Korozyon aşınması (corrosive wear).

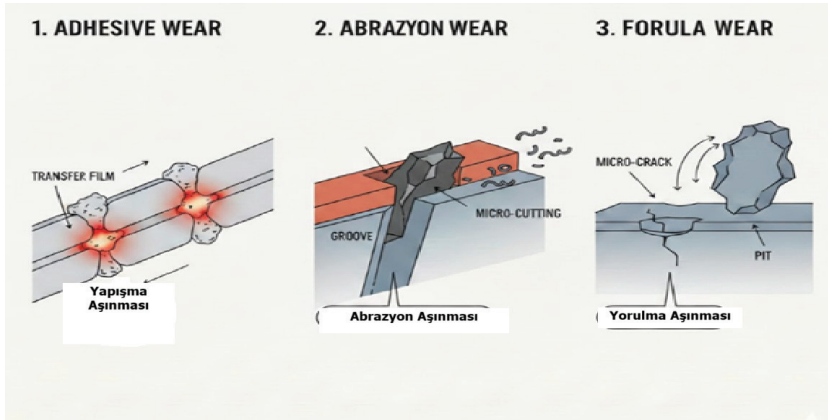
Yapışma aşınması, yüzeyler arasındaki atomik bağların kopmasıyla oluşan malzeme geçişleri ile ilgilidir. Abrazyon aşınması, sert bir yüzeyin veya partikülün daha yumuşak yüzeyi kazınması sonucu ortaya çıkar. Yorulma aşınması, tekrarlayan temas yükleri altında mikro çatlak oluşumu ve yüzey kırılmasıyla ilişkilidir. Korozyon aşınması ise kimyasal reak-

siyonlarla birleşen mekanik aşınma zamanını içerir. Bu aşınma türleri, malzeme türüne ve kullanım ortamına göre farklı oranlarda etkili olur.

3. Malzeme Türlerine Göre Aşınma Davranışları

3.1 Metallerde Aşınma

Metallerde aşınma; genellikle yapışma ve abrazyon sistemleri ile ortaya çıkar. Yüzey sertliği düşük olan metaller, yüksek basınç altında plastik deformasyona uğrar ve malzeme transferi gerçekleşir. Alaşım elementleri ve ısıtım işlem yöntemleri, metalik malzemelerin aşınma direncini artırmada önemli rol oynar. Örneğin, karbon çeliğinde sertlik arttıkça aşınma oranı azalır. Burada dikkate dılması gereken sertliğin yükselmesi aşınma direnci ile doğru orantılı iken, mukavemeti azaltabilir. Metallerde özellikle karbon oranının artışı kırılganlığı artırır. Önce östenitleşen sonra ledeburite dönüşen yapı malzemeye kırılganlık verir. Bu bağlamda kullanacağımız malzemedeki alaşımların yüzdesi kontrol altında tutunmalıdır. Özellikle endüstride kullanılan çelik, alüminyum ve titanyum alaşımlarında yüzeyde meydana gelen plastik deformasyon ve oluşan mikro çatlaklar parçanın sınır değerlerinin değişmesine, belirlenen tolerans değerlerin farklılaşmasına, sistemde titreşim oluşmasına ve sistem dinamiğinin değişerek sistem veriminin düşmesine neden olurlar.



Resim 1. Metallerdeki Aşınma türleri

Metallerde yüzey aşınmaları yapışma ve abrazyonun dışında, yüzey yorulmaları ve paslanma sonucu oluşan zayıf yüzey yüzünden olan aşınma ihtimalleri ile de gerçekleşebilir. Tekrarlı yüklemeler sonucunda yüzey altı çatlakların ilerlemesi sonucu yüzeyde yorulma meydana gelir ve bu çatlakların dinamiği yüzeyde aşınmaya, kopmaya veya ezilmeye sebebiyet verir. Özellikle rulman gibi dinamik yüke maruz kalan yataklarda

yüzey aşınması meydana gelebilir. Burada aşınma sonucu oluşabilecek parçalardaki kopmalar bilyelerin hareketini değiştirdiği için sistem dinamiğini bozarak sistemde arızaya neden olabilirler. Metalde eğer paslanma söz konusu ise yüksek sıcaklıklarda paslanan üst yüzeyin dökülmesi ilerleyen aşamalarda gözükabilir.

3.2 Seramiklerde Aşınma

Seramik malzemeler, yüksek sertlikleri ve kimyasal kararlılıklarından dolayı aşınmaya karşı yüksek ölçüde dirençlidir. Ancak gevrek yapılarından dolayı darbe ve yorulma mukavemeti düşük olup kolayca çatlayabilirler.. Seramiklerdeki aşınma genellikle mikro çatlak ilerlemesi veya parçacık kopması şeklinde gerçekleşir. Zirkonyum ve alüminyum esaslı seramikler, yüksek sıcaklıkta bile aşınma direncini koruyabilir. Bu sayede Formula 1 araçlarının fren sistemlerinde kullanılan fren balataları seramikten yapılmıştır. Bu balatalar yüksek sıcaklık dayanımlı ve kolay aşınmayan bir malzeme olan seramik kullanılarak yapılır. Ancak yorulma dayanımları düşük olduğundan dolayı her bir yarış için balatalar değiştirilir. Günümüz teknolojisinde bu sistemden etkilene firmalar seramik bazlı balataları piyasaya sürmeye başlamıştır. Ayrıca zirkonyum seramikler yüksek sertliklerinden dolayı kesici uçlar, biyomedikal implantlar ve bazı rulmanlarda kullanılırlar. Metal içermeyen bu yapının yağ olmadan kuru kullanılması sonucu yüzeyde zorlanmalar meydana gelir. Bu da yüzeyde mikro çatlaklara neden olur. Temas bölgesinde yüksek basınç oluşursa aşınma için elverişli mekanizma oluşmuştur. Alümina seramikler ise genellikle yüksek sıcaklıklarda ve aşınma plakalarında kullanılırlar. Sert bir partikül ile temas eden bu seramik türünde yüzeydeki gevrek yapıdan dolayı küçük kırılmalar ve talaşlanmalar meydana gelebilir. Eğer malzemenin kristal yapısı büyük ise ve ya ani yükleme yapıldı ise bu tip abrazyon aşınmaları daha kolay meydana gelirler.

3.3 Polimerlerde Aşınma

Polimerler, hafiflikleri, korozyona karşı olan dirençleri ve düşük sürtünme katsayıları sayesinde yer yer kullanımlarda metal malzemeler yerine kullanılabilen malzemelerdir. Ancak özellikle dinamik yük altında çalışan polimerler aşınmaya karşı dayanıksızdır bu da kullanım ömürlerini oldukça düşürmektedir. Polimerlerde aşınma davranışı, viskoelastik özellikleri sebebiyle ana metallerden farklıdır. Yapışma ve yüzey erozyonu polimerlerde çok görülür. Düşük sürtünme katsayıları ve kendi kendine öz yağlama özellikleri sayesinde polimerleri bazı uygulamalarda avantajlı kullanım alanlarına sahiptirler. Ancak sıcaklık artışı, polimerlerin aşınma direncini düşürür. Genel itibari ile polimerlere sıcaklığın çok yüksek olmadığı ve yükün sınırlı kaldığı yerlerde kullanılırlar. Piyasa da

en çok kullanılan polimerlere örnek olarak polietilen, PTFE ve naylon verilebilir. Bu malzemeler otomotiv sektöründen biyomedikal cihazlara kadar çok geniş bir yelpazede kullanılırlar. Bu yüzden kullanım ömrünü etkileyen aşınma direnci kimyasal yapılarına, molekül ağırlıklarına, kristalibilite derecelerine ve test koşullarına (yük, hız, sıcaklık, ortam) bağlı olarak değişebilir.



Resim 2. Polimer çeşitleri

Aşınma sonucu malzemenin ilk hesaplanan statik-dinamik yük kabiliyeti değişeceği için sistem dinamiği tamamen bozulabilir. Polimerlerde en çok görülen adezyon (yapışma) aşınması birbirine temas eden 2 yüzey arasındaki atomlarda yer alan van der Waals kuvvetleri nedeniyle oluşur. Yine polimerlerde sıkça gördüğümüz abrazyon (çizilme) aşınmasında ise sert bir yüzeyin nispeten daha yumuşak bir yüzeye oluşturduğu basınç nedeniyle oluşan malzeme kaybıdır. Burada sert yüzeyler diğer yüzeyde uluk, kanal veya yivler açarlar. Bu oluşum polimer aşınmasında gösterilebilecek en büyük formlardan biridir. Aynı zamanda yüzeyde sürtünme yaratabilecek parçacıklar mikro kesme (micro-cutting) oluşturabilir. Bu aşınmalarda sistem açısından göz ardı edilmeyecek kadar önemlidir. Polimerlerde oluşabilecek aşınmalara örnek olarak yorulma aşınması da verilebilir. Tekrarlanan temas basıncı altında oluşan yüzey altı çatlaklarının ilerlemesi sonucu oluşan yorulma aşınması, mikroskobik bir çatlak ile başlar. Sonrasında tekrarlanan basınç elastik ve plastik deformasyon oluşturur ve bu mikro çatlakların büyümesine sebebiyet verir. Son olarak polimerlerde erozyon aşınması da oluşabilir. Bu aşınma katı bir parçaya

temas eden yüksek hızda bir sıvı akışının polimer yüzeyde malzeme kaybı yaratması ile oluşur. Boru hatları, pompalar ve türbin kanatları gibi akışkan ihtiva eden sistemlerde görülür.

3.4 Kompozit Malzemelerde Aşınma

Kompozit malzemeler mekanik olarak yüksek özelliklere sahiptirler ve bu sayede havacılık, biyomedikal ve otomotiv sanayinde sıkça kullanılırlar. Özellikle hafiflikleri ve buna rağmen yüksek mukavemeti sayesinde günümüzde bir çok malzemenin yerini almışlardır. Kompozit malzemeler genel olarak aşınmaya dayanıklıdırlar. Geleneksel malzemelere göre kompozitler iki veya daha fazla fiziksel ve kimyasal fazın makro olarak birlikte kullanılması ile oluşurlar. Bu fazlara matris fazı ve takviye fazı isimleri verilir. Burada oluşan mekanik özellikler sadece matris ve takviye fazlarının özelliklerine göre değil ayrıca fazlar arası oluşan bağ kuvvetlerine bağlıdır. Kompozitlerde aşınma burkulma, mikro çatlak ve fazlar arası ayrılma gibi birbirinden farklı modlardan oluşabilir. Burada polimer matris, seramik dolgu veya fiber destekli yapılar sayesinde aşınma direnci artar ve sürtünme sırasında oluşan zarar minimize olur. Yine de bu zarar matris ve takviye fazının özelliklerine göre değişir. Takviye fazı olarak kullanılan seramik partiküller, aşınma direncini artırır. Ancak matris fazının zayıflığı, takviye kopmasına yol açabilir. Polimer matrisli kompozitlerde matris yumuşak ise (Epoksi) temas yükü ilk olarak fiberler tarafından taşınır. Aşınma ilk olarak matrisin plastik deformasyonu, sonrasında fiber matris temas bölgelerinin zarar görmesi son olarak da fiberlerin kopması ile ortaya çıkar. Metal matrisli kompozitler yüksek tokluğa sahip olup, özellikle yüksek sıcaklık ve basınç altında iyi performans sergilerler. Aşınma ise genel olarak abrazyon ve adezyon olarak ortaya çıkar. Yüksek sıcaklıkta matris yumuşayabilse de kompozit malzemelerin polimer malzemelere göre ısının olduğu ortamlarda tercih edilmesi, yine basınç ve statik yük altında kullanılması önerilmektedir.

4. Sonuçlar

Bu bölümde malzeme türlerine göre aşınma çeşitleri incelenmiştir. Metallerde yapışma ve abrazyon baskınken, seramiklerde gevrek kırılma, polimerlerde ise yüzey erozyonu baskındır. Kompozit malzemelerde ise takviye fazı, aşınma direncinin belirleyici unsurudur. Malzeme seçimi yapılırken, çalışma koşulları ve aşınma türü göz önüne alınmalıdır. Günümüzde ise yüzey kaplamaları ve nanoteknolojik takviyelerle aşınma dayanımı artırma üzerine bir çok çalışma vardır.

Kaynakça

1. Bhushan, B. (2013). Introduction to Tribology. John Wiley & Sons.
2. Hutchings, I. M., & Shipway, P. (2017). Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials. Butterworth-Heinemann.
3. Stachowiak, G. W., & Batchelor, A. W. (2014). Engineering Tribology. Elsevier.
4. Saka, N. (2018). Material wear mechanisms and control. Materials Science Reports.
5. Rabinowicz, E. (1995). Friction and wear of materials (2nd ed.). Wiley.
6. Blau, P. J. (2009). Friction science and technology: From concepts to applications (2nd ed.). CRC Press.
7. Rabinowicz, E. (1995). Friction and wear of materials (2nd ed.). Wiley.
8. ASM International. (1992). ASM handbook: Vol. 18. Friction, lubrication, and wear technology. ASM International.
9. Holmberg, K., & Matthews, A. (2009). Coatings tribology: Properties, techniques and applications (2nd ed.). Elsevier.
10. Mate, C. M. (2008). Tribology on the small scale: A bottom up approach to friction, lubrication, and wear. Oxford University Press.
11. Glaeser, W. A. (1992). Materials for tribology. Elsevier.
12. Lancaster, J. K. (1990). Polymer tribology. Elsevier.
13. Zhang, S. (2004). Wear of advanced engineering materials. Elsevier.
14. Kato, K. (2000). Wear in relation to friction—A review. Wear, 241(2), 151–157.
15. Hutchings, I. M. (1992). Tribology: Friction and wear of engineering materials. Edward Arnold.
16. Maru, M. M., & Tanaka, D. K. (2007). The influence of microstructure on abrasive wear of steels. Wear, 263(1-6), 186–191.
17. Lathi, R. S., & Basu, B. (2005). Abrasive wear behavior of zirconia ceramics. Journal of the American Ceramic Society, 88(9), 2709–2716.

Bölüm 2

BİLGİSAYAR DESTEKLİ ÜRETİMDE YAPAY ZEKÂNIN UYGULANMASI

Aysu AKILLI ARI¹

¹ Dr. Öğr. Üyesi Aysu AKILLI ARI, Amasya Üniversitesi Merzifon MYO, Makine ve Metal Teknolojisi,

aysu.akilli@amasya.edu.tr, ORCID: 0000-0002-1252-9417.

1. GİRİŞ

Günümüzde endüstriyel üretim süreçleri, gittikçe artan otomasyon ve dijitalleşme eğilimiyle şekillenmektedir. Bu bağlamda bilgisayar destekli üretim (Computer-Aided Manufacturing, CAM) sistemleri, üretim sürecinin planlanmasından makine kontrolüne kadar pek çok aşamada önemli roller üstlenmektedir. CAM ortamları, üretim hattındaki makinelerle doğrudan etkileşime girerek üretim hızını, esnekliğini ve doğruluğunu artırırken, klasik yöntemlerin sınırlarını da genişletmiştir.

Öte yandan, geleneksel CAM sistemleri çoğunlukla deterministik planlama, kural tabanlı kontrol mekanizmaları ve sabit veri modelleriyle çalışırlar. Ancak günümüzün karmaşık üretim ortamlarında, çok büyük miktarda sensör verisi, değişken üretim talepleri, kalite problemleri ve beklenmeyen arızalar gibi belirsizlikler ortaya çıkmaktadır. Bu tür faktörler, geleneksel yöntemlerin yetersiz kalmasına neden olabilir.

Bu noktada yapay zekâ (YZ) yöntemleri, öğrenme, adaptasyon, tahmin, optimizasyon gibi yetenekleriyle CAM süreçlerine değer katmaktadır. Yapay zekâ, üretim sürecinin her aşamasına “akıllı” bir katman ekleyebilmekte; anomalileri tespit etmek, süreç parametrelerini otomatik ayarlamak, kalite tahmini yapmak gibi görevleri otonom biçimde gerçekleştirebilmektedir.

Bu bölümde, önce bilgisayar destekli üretimin kavramsal yapısı ele alınacak; ardından yapay zekâ tekniklerinin CAM süreçlerindeki uygulamaları, avantajları, zorlukları ve gelecek perspektifleri incelenecektir. Ayrıca bilimsel çalışmalar ve örnek vakalar üzerinden somut uygulamalara da yer verilecektir.

2. BILGISAYAR DESTEKLI ÜRETİMİN TEMELLERİ

2.1. CAM Tanımı ve Kavramsal Yapısı

Bilgisayar destekli üretim (CAM), üretim süreçlerinin planlanması, yönetilmesi, kontrolü ve optimizasyonu amacıyla bilgisayar sistemlerinin kullanılmasını ifade eder. CAM, tasarım (CAD) sistemleri ile doğrudan etkileşime girer; tasarım verileri üzerinden işleme yolları (tool path), talaş kaldırma stratejileri, makine parametreleri gibi kararları oluşturur.

CAM sistemleri, genellikle aşağıdaki alt bileşenlerden oluşur:

İşleme planlama modülü: Tasarımdan gelen geometrik verileri alır, talaş kaldırma stratejilerini belirler (örneğin, devir, ilerleme hızı, kesme derinliği).

Yol oluşturma (tool path generation) modülü: Parça geometrisine uygun yolları üretir ve doğrulama simülasyonları yapar.

Makine kontrol ve kod üretimi modülü: NC (Numerical Control) ya da CNC (Computer Numerical Control) makinelerine uygun G-kodları veya M-kodları üretir.

Geribildirim ve izleme modülü: Sensörlerden gelen verileri toplayarak süreç performansını izler, sapmaları tespit eder.

CAM sistemlerinin stratejik rolü, üretim süreçlerinde esneklik yaratmak, hata oranını azaltmak, üretim süresini kısaltmak ve kaynak kullanımını optimize etmektir.

2.2. Geleneksel CAM Yaklaşımlarının Sınırlılıkları

Klasik CAM sistemleri, sabit kurallar ve parametrik modeller üzerinden çalıştıkları için aşağıdaki zorluklarla karşılaşabilirler:

Belirsizlik ve değişken koşullara duyarsızlık: Üretim ortamında değişen malzeme özellikleri, takım aşınması, ısı etkisi gibi faktörler modellenemeyebilir.

Dinamik optimizasyon eksikliği: CAM süreçleri genellikle statik optimizasyonla gerçekleştirilir; süreç sırasında çevrimsel uyarılama yapılmaz.

Gerçek zamanlı karar yetersizliği: Gelen verilerle anlık karar verme yeteneği zayıftır.

Karmaşık etkileşimlerin modellenmesinde güçlük: Farklı alt sistemler (örneğin proses, bakım, kalite) arasındaki karmaşık ilişkiler klasik modellerle yakalanamayabilir.

Bu sınırlılıklar, özellikle yüksek doğruluk gerektiren, özelleştirilmiş üretim, düşük toleranslı parçalar veya seri üretim ortamında önemli sorunlara yol açabilir.

3. YAPAY ZEKÂ TEMELLERİ VE CAM'E UYUM

3.1. Yapay Zekâ Teknikleri

Yapay zekâ, öğrenme, karar verme, öngörü yapma ve optimizasyon gibi işlevleri gerçekleştiren bir dizi yöntem ve teknolojiyi kapsar. Aşağıda CAM dünyasında yaygın olarak kullanılan başlıca YZ teknikleri verilmiştir:

Karar ağaçları ve rasgele orman (Random Forest): Özellikle sınıflandırma ve regresyon problemlerinde kullanılır.

Destek Vektör Makineleri (Support Vector Machines, SVM): Sınıflandırma problemlerinde yüksek doğruluk sunar.

Yapay Sinir Ağları (Artificial Neural Networks, ANN): Karmaşık nonlinear ilişkileri öğrenebilir.

Derin Öğrenme (Deep Learning, CNN, RNN, LSTM): Görüntü işleme, zaman serisi analizi ve büyük veri ile etkili çalışır.

Takviyeli Öğrenme (Reinforcement Learning, RL): Karar verme süreçlerindeki optimizasyon ve kontrol için uygundur.

Genetik algoritmalar, evrimsel yöntemler: Arama uzayında optimizasyon problemleri için kullanılır.

Bayesyen ağlar ve istatistiksel yöntemler: Belirsiz bilgi ve olasılıksal çıkarım problemlerinde faydalıdır.

Bu teknikler CAM süreçlerinde aşağıdaki biçimlerde kullanılabilir: süreç parametre tahmini, kalite sınıflandırma, anomalilerin tespiti, bakım tahmini, proses optimizasyonu vb.

3.2 CAM ve Yapay Zekâ'nın Entegrasyonu

YZ tekniklerinin CAM süreçlerine entegre edilmesi için aşağıdaki adımlar tipiktir:

Veri toplama ve altyapı kurulumu: Sensörler, IoT (Nesnelerin İnterneti) cihazları ile makine durumu, titreşim, sıcaklık, akım gibi veriler toplanır. Veri ön işleme, gürültü temizleme, eksik veri tamamlama, normalizasyon gibi işlemler yapılmalıdır. Veri depolama ve akış altyapısı, veri tabanı, zaman serisi veritabanları, akış analiz platformları kullanılabilir.

Model eğitimi ve doğrulama: Seçilen YZ algoritmaları (örneğin sinir ağı, SVM) ile eğitim verisi üzerinde model eğitilir. Çapraz doğrulama, test setleri ile modelin genelleme kapasitesi test edilir. Hiperparametre optimizasyonu yapılır (örneğin grid search, bayes optimizasyonu).

Modelin CAM sistemine gömülmesi: Model, CAM yazılımına entegre edilir veya ara katmanıyla (API, servis) CAM sistemine veri sunar. Karar desteği sistemleri ile modelin çıktısı makine kontrolüne bağlanabilir.

Geribildirim ve sürekli öğrenme: Modelin performansı izlenir; zamanla model yeniden eğitilir (online öğrenme). Yeni verilerle model

adaptasyonu sağlanır. Bu entegrasyon mimarisi, CAM sistemini “akıllı” hale dönüştürür; süreçler statik değil, kendini optimize eden dinamik bir yapıya kavuşur.

4. YAPAY ZEKÂ UYGULAMALARIYLA CAM SÜREÇLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Aşağıda CAM süreçlerinde yapay zekânın kullanıldığı başlıca uygulama alanları gösterilmiştir:

Süreç Parametrelerinin Tahmini ve Optimizasyonu: CAM süreçlerinde, kesme hızı, ilerleme (feed rate), kesme derinliği gibi parametrelerin doğru seçimi, parça kalitesi, takım aşınması ve üretim süresini doğrudan etkiler. YZ yöntemleri bu parametrelerin optimizasyonuna katkı sunabilir: Örneğin, model eğitilmiş bir sinir ağı, verilen malzeme özellikleri, takım durumu ve talaş kaldırma hedefleri üzerinden ideal kesme parametrelerini tahmin edebilir. Genetik algoritmalar, parametre uzayında evrimsel arama yaparak optimum parametre kombinasyonunu belirleyebilir. Takviyeli öğrenme, proses sırasında çevrimsel olarak ayarlamalar yaparak parametreleri dinamik optimize edebilir. Elahi ve arkadaşları (2023) tarafından yapılan kapsamlı bir literatür incelemesinde, AI tekniklerinin proses kontrol, talaş parametre optimizasyonu, karar destek sistemleri ve bakım stratejileri gibi aşamalarda kullanıldığı belirtilmiştir.

Kalite Tahmini ve Hata Tespiti: Üretim sürecinde üretilen parçaların kalitesini garanti altına almak kritik önem taşır. Yapay zekâ bu alanda şu işlevleri üstlenebilir: Görüntü işleme + derin öğrenme, parça yüzeyindeki mikro hataları algılamak için konvolüsyonel sinir ağları (CNN) kullanılabilir. Sınıflandırma algoritmaları (SVM, rastgele orman) ile parçalar “uygun/uygun değil” olarak sınıflandırılabilir. Zaman serisi analiz yöntemleriyle sensör verilerinden yola çıkarak üretim sürecindeki sapmalar erken aşamada tespit edilebilir. Örneğin “zero defect manufacturing” yaklaşımı kapsamında YZ, hatalı üretilmesi muhtemel parçaları önceden işaretleyip süreç ayarlaması yapılmasına olanak tanır. Nelson, Biddle ve Shapira (2023) yaptıkları sistematik derlemede, YZ uygulamalarının üretim hattındaki makina kontrolü, süreç izleme ve kalite kontrol alanlarında yoğun biçimde kullanıldığını belirtmişlerdir.

Proses Simülasyonu, Planlama ve Zamanlama: Üretim süreçlerinin simülasyonu ve zamanlama (scheduling), özellikle esnek üretim sistemleri (Flexible Manufacturing Systems, FMS) için kritik öneme sahiptir. YZ yöntemleri bu aşamada da katkı sağlar: Kovács (1997), FMS simülasyonu, zamanlama ve kontrol için yapay zekâ uygulanabilirliğini ele alan bir çalışma sunmuştur. Simülasyon modelleri üzerinden elde edilen verilerle,

genetik algoritma veya takviyeli öğrenme yöntemleri, optimum üretim planlarını belirleyebilir. Karar destek sistemleri ile gerçek zamanlı üretim planlama yapılabilir, ani sipariş değişikliklerine adaptasyon sağlanabilir. Bu sayede makinelerin verimli kullanımı, bekleme süresinin azaltılması ve üretim hattı balansının iyileştirilmesi mümkün olur.

Bakım Tahmini (Predictive Maintenance): Makine arızaları, üretim süreçlerinde duruş sürelerini artırabilir ve maliyetleri yükseltebilir. Yapay zekâ, bakım stratejilerinde devrim yaratmaktadır: Sensör verileri (titreşim, sıcaklık, akım, ses) toplanarak zaman serisi modelleri oluşturulur. Anormallik tespiti yöntemleri ile potansiyel arızalar önceden belirlenir. Derin öğrenme ve LSTM modelleri, makinenin kalan kullanım ömrünü (Remaining Useful Life, RUL) tahmin eder. Bakım zamanlamaları optimize edilerek plansız duruşlar minimize edilir. Elahi ve diğerleri (2023) makine yaşam döngüsü aşamalarında (tasarım, üretim, bakım, geri dönüşüm) YZ tekniklerinin etkin biçimde kullanılabileceğini vurgulamaktadır.

Entegre Karar Destek Sistemleri ve Dijital İkiz: Dijital ikiz (digital twin): Fiziksel üretim sisteminin dijital kopyası olarak, gerçek zamanlı veriler ile birlikte süreç simülasyonu ve optimizasyonu yapılabilir. Yapay zekâ ile dijital ikiz modellemesi, süreç kontrolünde akıllı müdahaleler yapılmasına olanak tanır.

Karar destek sistemleri: YZ modelleri, CAM süreçlerine karar desteği katmanları ekleyerek insan operatörlere önerilerde bulunabilir; karmaşık etkileşimleri göz önüne alarak en uygun seçenekleri sunar. Böylece üretim hattında hem otomasyon hem de akıllı insana müdahale dengesi korunmuş olur.

5. UYGULAMA ÖRNEKLERİ VE VAKA ÇALIŞMALARI

Aşağıda bazı somut uygulamalardan ve vaka çalışmalarından örnekler.

Automotive trimming die inspection otomasyonu: Jinsub Lee ve arkadaşlarının çalışmasında, otomobil metal şekillendirme kalıplarının kontrolü için AI modülleri ile CAD yazılımının etkileşimli kullanımı önerilmiştir. Bu sistem, insan uzmanın verdiği kararı AI modüllerinin yerine koyarak denetimleri otomatik hale getirmiş ve hat ölçüm hatasını %2,4 gibi düşük bir seviyeye indirmiştir. Ayrıca denetim süresi uzmanlara kıyasla beş kat daha azdır.

Akıllı üretim literatür derlemesi: Elahi ve diğerleri (2023) tarafından yapılan kapsamlı literatür çalışmasında, birçok üretim sahasında AI tek-

niklerinin süreç optimizasyonu, kalite kontrol, bakım ve karar desteği alanlarında kullanıldığı gözlemlenmiş, entegrasyon zorlukları ve veri alt-yapısı eksiklikleri kritik bariyerler olarak vurgulanmıştır.

Teknoloji madenciliği yaklaşımıyla AI ve üretim: Zeba (2021) çalışmasında, üretim sektöründe yapay zekânın uygulamaları teknolojik kırılmalar üzerinden incelenmiş, AI destekli sistemlerin üretim süreçlerini nasıl dönüştürdüğüne dair vaka analizleri sunulmuştur.

Bu örnekler, teorik kavramların gerçek dünyada nasıl hayata geçirilebileceğini göstermesi açısından değerlidir.

6. AVANTAJLAR, ZORLUKLAR VE RISKLER

6.1. Avantajlar ve Beklenen Kazanımlar

Üretim verimliliği artışı: Optimum parametreler ve sürekli adaptasyon sayesinde süreçler daha hızlı gerçekleşir.

Hata oranlarının azalması: Anomali tespiti ve kalite tahmini ile daha az hatalı ürün çıkar.

Planlama esnekliği: Değişen taleplere ve üretim koşullarına anlık adaptasyon.

Bakım maliyetlerinin düşmesi: Planlı bakım, plansız duruşları en aza indirir.

Rekabet avantajı: Daha akıllı ve verimli üretim süreçleri firmaları öne çıkarır.

Nelson ve arkadaşları (2023), yapay zekâ uygulamalarının firma düzeyinde lojistik senkronizasyon, tedarik yönetimi, üretim kontrol gibi alanlarda verimlilik ve rekabetçilik sağladığını belirtmektedir.

6.2. Zorluklar ve Engeller

Veri kalitesi ve uygunluk: Veride eksik, gürültülü, tutarsızlık gibi problemler olabilir.

Miras sistemlerle entegrasyon: Mevcut CAM sistemleri, eski yazılım/hardware altyapıları ile YZ katmanını entegre edilmesi zor olabilir.

Model genelleme yeteneği: Eğitim verisi kapsamı dar ise model yeni durumda başarısız olabilir.

Açıklanabilirlik/şeffaflık: Derin öğrenme modelleri gibi “kara kutu” sistemler, karar mekanizması açısından opak olabilir; bu durum kritik uygulamalarda sorun yaratabilir.

Operatör adaptasyonu ve personel yetkinliği: İnsan-makine etkileşimi, operatör eğitimi, direnci gibi faktörler süreçlere dahil edilmelidir.

Güvenlik, siber saldırı riski: YZ sistemleri, veri bağlantıları ve kontrol sistemleri üzerinden saldırıya açık olabilir.

Yatırım maliyeti ve ROI belirsizliği: YZ sistemlerinin ekonomik dönüşümleri her zaman net olmayabilir.

Bkz. Elahi ve diğerleri (2023) çalışmasında entegrasyon zorlukları ve teknik karmaşıklıklar sistematik şekilde tartışılmıştır.

6.3. Toplumsal ve Etik Perspektifler

YZ destekli üretim sistemleri yaygınlaştıkça toplumsal etkiler de önem kazanır: İş gücünün niteliği dönüşebilir; bazı rutin işler ortadan kalkabilir, ancak daha yüksek nitelikli işler ortaya çıkabilir. Eşitsizlik ve beceri farkları ortaya çıkabilir; firmalar arasındaki teknoloji farkı büyüyebilir. Veri gizliliği, güvenlik, etik karar süreçleri değerlendirilmelidir. Otomasyon sistemleri ile insan kontrol dengesi dikkatle kurulmalıdır; insana katılım tamamen dışlanmamalıdır.

Nelson ve arkadaşları (2023), AI'nin üretimde toplumsal etkileri (istihdam, eğitim, güvenlik) üzerine dikkat çekmiştir.

7. GELECEK PERSPEKTİFLERİ VE ARAŞTIRMA YÖNELİMLERİ

Endüstri 5.0 ve insan merkezli üretim: İnsan ve makine işbirliğini vurgulayan yaklaşım, yapay zekâyı destek unsuru olarak konumlandıracaktır.

Açıklanabilir yapay zekâ (Explainable AI, XAI): Kara kutu modeller yerine şeffaf karar süreçleri sağlayan yöntemler önem kazanacaktır.

Federatif öğrenme (Federated Learning): Veriyi paylaşmadan model eğitimi yapılabilmesi, veri gizliliğini koruyarak işbirliğini artırabilir.

Küçük veri ile öğrenme ve transfer öğrenme: Eğitim verisi az olan sistemlerde verimli YZ uygulamaları geliştirilecektir.

Sanal-gerçek birleşimi (hybrid simulation): Fiziksel süreçlerle dijital modellerin birlikte çalıştığı sistemler önemlenecektir.

Otonom karar sistemleri ve özerk hatlar: Yapay zekâ, daha fazla otonomi sağlayarak insan müdahalesini azaltabilir.

Sürdürülebilir üretim: Enerji optimizasyonu, atık azaltma, çevresel etki analizleri YZ ile entegre edilecektir.

Standartlaştırma ve mimari çerçeveler: AI + CAM entegrasyonu için referans mimariler geliştirilecektir.

Elahi ve diğ. (2023) bu perspektifler ışığında, AI destekli akıllı üretimin esneklik, sürdürülebilirlik ve karar destek boyutlarını vurgulamaktadır.

8. ÖZET VE DEĞERLENDİRME

Bu bölümde, bilgisayar destekli üretim (CAM) sistemlerinin geleneksel yapısı ve sınırlılıkları ele alındı; ardından yapay zekâ tekniklerinin CAM süreçlerine entegrasyonu detaylı biçimde incelendi. Parametre tahmini, kalite kontrol, simülasyon & zamanlama, bakım tahmini, karar destek gibi alt süreçlerde YZ yöntemlerinin sunduğu katkılar anlatıldı. Ayrıca uygulama örnekleri ve vaka analizleri ile teorik bilgiler somutlaştırıldı.

YZ destekli CAM sistemleri, üretim süreçlerine dinamik, esnek ve akıllı özellikler kazandırarak endüstriyel üretimde yeni bir dönemin kapısını aralamaktadır. Ancak bu entegrasyon, teknik, ekonomik, insan kaynakları ve toplumsal boyutlarda dikkatli planlama gerektirmektedir.

Sonuç olarak, “Bilgisayar Destekli Üretimde Yapay Zekânın Uygulanması” başlığı altında ele alınabilecek literatür zenginliği, teorik derinliği ve somut uygulamaları bir araya getiren kapsamlı bir kitap bölümü taslağı elde etmiş oldunuz. Bu metni, alanınızdaki özgün katkılar, güncel örnekler ve kendi araştırma çıkarımlarınızla genişleterek daha da zenginleştirebilirsiniz.

KAYNAKÇA

- Elahi, E., Zhang, H., & Abid, M. (2023). *Artificial intelligence in smart manufacturing: A systematic literature review on applications, challenges, and future trends*. Journal of Manufacturing Systems, 68, 270–289.
- Kovács, G. L. (1997). *A survey of artificial intelligence applications to flexible manufacturing systems and manufacturing planning*. Computers in Industry, 33(2–3), 243–252.
- Lee, J., Kim, H., & Park, J. (2019). *AI-assisted CAD inspection system for automotive trimming die manufacturing*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 100(5–8), 1499–1512.
- Nelson, P., Biddle, J., & Shapira, P. (2023). *Artificial intelligence in manufacturing: Impacts on productivity, labor, and industrial transformation*. Technological Forecasting and Social Change, 189, 122–234.
- Zeba, G. (2021). *Technological mining analysis of artificial intelligence applications in the manufacturing sector*. Computers & Industrial Engineering, 159, 107–129.

//

Bölüm 3

NANOKOMPOZİTLERİN MEKANİK VE TERMAL ÖZELLİKLERİ

Gülşah ALAR ÖNER¹

¹ Doç. Dr., Atatürk Üniversitesi, ORCID ID: 0000-0002-7724-2943

1. GİRİŞ

Nanoteknolojinin hızlı gelişimiyle birlikte, nano boyuttaki malzemelerin mühendislik uygulamalarında sağladığı katkılar malzeme bilimi açısından yeni araştırma alanlarının oluşmasına yol açmıştır. Bu gelişmelerin en önemli sonuçlarından biri de nanokompozit malzemelerin ortaya çıkmasıdır. Nanokompozitler, polimer, metal veya seramik bir matris içerisine nano boyuttaki takviyelerin homojen şekilde dağıtılmasıyla elde edilen ve klasik kompozitlere kıyasla daha üstün mekanik ve termal özellikler gösterebilen gelişmiş malzemelerdir (Latif et al., 2023). Nano takviyelerin yüzey/hacim oranının yüksek olması, matris ile takviye arasındaki arayüzey etkileşimlerini güçlendirmekte ve dışarıdan uygulanan yükün daha geniş bir alana yayılmasını sağlayarak malzemenin mekanik performansını belirgin şekilde iyileştirmektedir (Mohammed et al., 2020).

Son yıllarda yapılan çalışmalarda, özellikle grafen, grafen nanoplatelet (GNP), karbon nanotüp (CNT), nanokil ve bor nitrür gibi nano takviyelerle elde edilen kompozitlerin çekme dayanımı, elastisite modülü, eğilme dayanımı, darbe direnci ve ısı iletkenlik gibi özelliklerinde önemli artışlar sağlandığı rapor edilmektedir (Yang et al., 2025). Grafen ve CNT gibi yüksek mekanik değerlere sahip nano yapılar düşük dolgu oranlarında bile malzemenin dayanım ve rijitlik özelliklerine ciddi katkılar sağlamaktadır. Bunun temel nedeni, nano takviyelerin matris içerisinde yük taşıyan bir faz görevi görmesi ve polimer zincirlerinin hareketini sınırlandırarak daha düzenli bir mikro yapı oluşturmalarıdır (Li et al., 2026).

2020–2026 yılları arasında yapılan pek çok çalışmada nanokompozitlerin sadece mekanik açıdan değil, termal olarak da önemli avantajlar sağladığı görülmektedir. Özellikle grafen ve bor nitrür takviyelerinin ısı iletkenliği artırarak elektronik bileşenlerde, bataryalarda ve ısı yönetimi gerektiren sistemlerde kullanılabilirliği yükselttiği belirtilmektedir (Mendoza et al., 2025). Ayrıca nanokil ve GO takviyelerinin termal kararlılığı artırdığı, cam geçiş sıcaklığını yükselttiği ve termal bozunma davranışını iyileştirdiği ifade edilmektedir (Karagöz et al., 2024).

Nanokompozitlerin mühendislik uygulamalarındaki başarısı, iki temel unsura bağlıdır: (1) nano takviyenin matris içerisindeki dağılım kalitesi, (2) matris–dolgu arayüzey bağının gücü. Bu iki faktör sağlanmadığında, nano takviyeler kümelenerek istenen özellik iyileşmeleri sağlanamaz; hatta malzeme özellikleri zayıflayabilir. Bu nedenle son yıllarda yapılan araştırmalarda yüzey fonksiyonelleştirme yöntemleri, dispersiyonu artıran üretim teknikleri ve arayüzey etkileşimlerini güçlendiren kimyasal işlemler önemli bir yer tutmaktadır (Rahman et al., 2025).

Genel olarak literatür incelendiğinde, nanokompozitlerin klasik kompozitlere kıyasla çok daha yüksek performans sergileyebildiği; düşük dolgu oranlarıyla dahi mekanik dayanım, termal kararlılık, ısıl iletkenlik ve boyutsal stabilite gibi pek çok özellikte önemli gelişmeler sağladığı görülmektedir (Shahamatifard et al., 2023). Bu nedenle nanokompozitler günümüzde otomotiv, havacılık, savunma, elektronik ve enerji sistemleri gibi pek çok alanda tercih edilen ileri mühendislik malzemeleri hâline gelmiştir (Park et al., 2026).

2. NANOKOMPOZİTLERİN YAPISI VE SINIFLANDIRILMASI

Nanokompozitler, matris fazı içerisinde nano boyutta ikinci bir fazın homojen şekilde dağıtılmasıyla oluşturulan gelişmiş malzeme sistemleridir. Matris; polimer, metal veya seramik olabilirken, nano takviye fazı ise parçacık, tabaka veya lif formunda olabilir. Nano takviyelerin yüzey alanının yüksek olması ve matrisle geniş bir temas bölgesi oluşturması sebebiyle, arayüzey etkileşimleri klasik kompozitlere kıyasla çok daha belirgindir. Bu özellik, nano takviyelerin mekanik ve termal davranışa etkisini artırmaktadır (Latif et al., 2023).

Nanokompozitlerin yapısında en önemli nokta, nano takviyenin matris içerisinde nasıl dağıldığı ve matris ile ne tür bir bağ oluşturduğudur. Nano takviyeler iyi dağılmadığında aglomerasyon meydana gelir ve bu kümelenmeler gerilme yığılmalarına neden olarak malzemenin performansını düşürebilir. Bu nedenle yüzey modifikasyonu, ultrasonik dağıtım, yüksek kesme karıştırma gibi yöntemler çoğu çalışmada disperse yapıyı iyileştirmek için kullanılmaktadır (Mohammed et al., 2020).

2.1. Matris Fazına Göre Nanokompozit Türleri

Nanokompozitler genellikle matris türüne göre üç ana sınıfta incelenmektedir: polimer matrisli, metal matrisli ve seramik matrisli nanokompozitler.

2.1.1. Polimer Matrisli Nanokompozitler

En yaygın nanokompozit türüdür. Bunun nedeni polimerlerin düşük yoğunluklu, kolay şekillendirilebilir ve modifiye edilebilir malzemeler olmasıdır. Epoksi, polipropilen, polietilen, naylon ve poliüretan gibi pek çok polimer matris olarak kullanılmaktadır. Polimer matrisli nanokompozitlerde, nano takviyenin zincir hareketini kısıtlama ve yük transferini artırma etkisi nedeniyle mekanik performansta belirgin iyileşmeler elde edilmektedir (Yang et al., 2025).

2.1.2. Metal Matrisli Nanokompozitler

Metal matrisli nanokompozitlerde alüminyum, magnezyum ve titanyum gibi hafif metaller matris olarak kullanılmaktadır. Nano takviyeler genellikle SiC, Al_2O_3 , CNT veya grafen gibi yüksek sertlik ve dayanım sağlayan malzemelerdir. Bu tür kompozitler yüksek sıcaklık dayanımı gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır fakat üretim süreçleri daha maliyetlidir (Gowrishankar et al., 2025).

2.1.3. Seramik Matrisli Nanokompozitler

Seramik matrisler yüksek sertlik ve sıcaklık dayanımı sağlar; ancak kırılgenlikleri yüksektir. Bu nedenle CNT, grafen veya zirkonya nanoparçacıkları gibi takviyelerle güçlendirilerek daha tok ve dayanıklı yapılar elde edilmektedir. Seramik nanokompozitler özellikle havacılık ve zırh teknolojilerinde önemlidir (Karagöz et al., 2024).

2.2. Nano Takviye Türlerine Göre Sınıflandırma

Nano takviyeler geometrik yapısına göre üç sınıfta değerlendirilir: 0B nanoparçacıklar, 1B nanotüp/nanolif yapılar ve 2B tabakalı nanoyapılar.

2.2.1. 0B (Sıfır Boyutlu) Nanoparçacıklar

SiO_2 , TiO_2 , ZnO, Al_2O_3 gibi nanoparçacıklar bu gruptadır. Genellikle küresel yapıda oldukları için matris içinde çok yönlü güçlendirme sağlarlar. UV dayanımı, aşınma direnci ve termal kararlılık üzerinde olumlu etkileri vardır. Ancak yüzey enerjileri yüksek olduğundan aglomerasyon eğilimleri de fazladır (Rao et al., 2023).

2.2.2. 1B (Bir Boyutlu) Nano Yapılar

Bu sınıfın en bilinen örneği karbon nanotüplerdir (CNT). Yüksek boy/en oranı sayesinde çatlak ilerlemesini engeller, yük transferini iyileştirir ve mekanik dayanımı artırır. CNT'lerin elastisite modülü ve çekme dayanımı çok yüksek olduğu için polimerlerde düşük dolgu oranlarında bile ciddi katkılar sağlayabilmektedir (Kim et al., 2026).

2.2.3. 2B (İki Boyutlu) Tabakalı Yapılar

Grafen, grafen nanoplatelet (GNP), grafen oksit (GO), nanokil ve bor nitrid nanosheets (h-BN) bu gruba girer. Bu malzemeler çok geniş yüzey alanına sahip oldukları için mekanik ve termal özelliklere en yüksek katkıyı sağlayan nano takviye sınıfıdır. Tabakaların matris içinde yönlendirilmesi durumunda ısı iletkenliğinin birkaç kat arttığı çalışmalar tarafından rapor edilmiştir (Mendoza et al., 2025).

2.3. Arayüzey Etkileşimlerinin Önemi

Nanokompozitlerde matris-takviye arayüzeyi kritik öneme sahiptir. Yüzey modifikasyonu, fonksiyonelleştirme ve uygun üretim yöntemi ile arayüzey iyileştirildiğinde:

- yük transferi artar,
- çatlak ilerleme hızı azalır,
- termal kararlılık yükselir,
- elastisite modülü ve dayanım iyileşir.

Arayüzeyin zayıf olduğu sistemlerde ise dolgu görev yapamaz ve malzeme istenen performansı göstermez (Shahamatifard et al., 2023).

2.4. Nano Takviyelerin Matris İçindeki Dağılımı

Nano takviye dağılımı (dispersiyon) mekanik ve termal performansı belirleyen temel faktörlerden biridir. Aglomerasyon, lokal gerilme yığılmalarına neden olur ve kompozitin performansını düşürür. Bu nedenle ultrasonik dağıtım, üçlü vals (three-roll milling), yüksek kesme karıştırma ve çözelti karıştırma gibi yöntemler literatürde sıklıkla kullanılmaktadır (Rahman et al., 2025).

3. NANOKOMPOZİT ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Nanokompozitlerin performansı yalnızca kullanılan matris ve nano takviyenin türüne değil, aynı zamanda uygulanan üretim yöntemine de doğrudan bağlıdır. Üretim yöntemi, nano takviyenin matris içinde nasıl dağıldığını, arayüzey bağlanmasının gücünü ve nihai malzemenin mekanik ile termal davranışını belirleyen en önemli unsurlardan biridir. Literatürde en yaygın üç yöntem olarak eriyikten harmanlama, çözelti karıştırma ve yerinde polimerizasyon öne çıkmaktadır (Mohammed et al., 2020).

3.1. Eriyikten Harmanlama (Melt Mixing)

Eriyikten harmanlama yöntemi, özellikle termoplastik polimerlerle çalışırken hem laboratuvar ölçeğinde hem de endüstride en çok tercih edilen üretim yöntemlerinden biridir. Bu yöntemde polimer, bir ekstrüder içerisinde eritilerek nano takviyelerle yüksek kesme kuvveti altında karıştırılır. Sürecin çözücü gerektirmemesi, sürekli üretime uygun olması ve endüstriyel ekipmanlarla uyumlu çalışması bu yöntemin en önemli avantajlarıdır (Gowrishankar et al., 2025).

Ancak nano takviyelerin yüksek yüzey enerjisi nedeniyle aglomerasyon eğilimleri vardır. Bu durum, eriyikten harmanlama sırasında dolgunun homojen dağılmasını zorlaştırabilir. Bu nedenle literatürde ultrasonik ön dağıtım, yüzey fonksiyonelleştirme ve masterbatch hazırlama gibi ek adımların dispersiyonu iyileştirmek için uygulandığı görülmektedir (Lv et al., 2022).

3.2. Çözelti Karıştırma (Solution Mixing)

Çözelti karıştırma yöntemi, polimerin uygun bir çözücünde çözülmesi ve sonrasında nano takviyenin bu çözelti içerisinde disperse edilmesi esasına dayanır. Özellikle grafen oksit (GO), GNP ve nanokil gibi tabakalı yapıya sahip dolgularda çözelti ortamı, tabakaların daha kolay ayrılarak matris içinde homojen bir dağılma göstermesine olanak sağlar. Bu nedenle literatürde çözelti karıştırmanın dispersiyon açısından avantajlı olduğu pek çok çalışmada belirtilmiştir (Danayat et al., 2023).

Bununla birlikte yöntemin en önemli dezavantajı çözücü kullanımının maliyet ve çevresel yük oluşturan bir faktör olmasıdır. Ayrıca çözücü kalıntılarının malzemenin nihai performansını olumsuz etkileme riski vardır. Bu nedenle büyük ölçekli üretimlerde kullanım alanı sınırlı kalmaktadır (Rahman et al., 2025).

3.3. Yerinde Polimerizasyon (In Situ Polymerization)

Yerinde polimerizasyon tekniğinde nano takviye, monomer fazı içerisinde dağıtılarak polimerizasyon reaksiyonu bu ortamda gerçekleştirilir. Bu sayede nano takviyeler matris zincirleri ile çok daha güçlü arayüzey bağları oluşturabilir. Özellikle grafen oksit ve CNT gibi yüzeyi modifiye edilebilen nano takviyelerde bu yöntem, mekanik ve termal performans açısından dikkat çekici sonuçlar vermektedir (Karagöz et al., 2024).

Yerinde polimerizasyonun en büyük avantajı, matris–dolgu arayüzeyinde kimyasal bağlanma gerçekleşebilmesi ve bunun yük transferini önemli ölçüde iyileştirmesidir. Buna karşın süreç zaman alıcıdır ve reaksiyon sıcaklığı ile viskozite kontrolünün hassas şekilde yapılması gerekir (Shahamatifard et al., 2023).

3.4. Sol–Jel Yöntemi

Sol–jel yöntemi, özellikle organik–inorganik hibrit kompozit üretiminde kullanılan bir tekniktir. Metal alkoksitlerin hidroliz ve kondensasyon reaksiyonlarıyla oluşturduğu “sol” faz, polimer matrisle bir araya getirilerek nano boyutta inorganik fazın polimer içerisinde atomik ölçekte dağılmasını sağlar. Bu yöntem sayesinde malzemenin termal kararlılığı

ve ısı bariyer özellikleri belirgin şekilde iyileştirilebilmektedir (Mendoza et al., 2025).

Sol-jel yönteminin dezavantajı üretim sürecinin uzun olması ve kontrol edilmesi gereken birçok parametre bulunmasıdır. Buna rağmen termal kararlılığın kritik olduğu uygulamalarda tercih edilen yöntemlerden biridir (Li et al., 2026).

3.5. Üçlü Vals (Three-Roll Milling)

Üçlü vals yöntemi, özellikle viskozitesi yüksek olan epoksi sistemlerinde CNT, grafen ve GNP gibi takviyelerin dağılımını iyileştirmek için yaygın olarak kullanılır. Üç silindirin farklı hızlarda dönmesiyle nano takviyeler tabakalar hâlinde açılır ve matris içine daha etkin karışır. Literatürde, üçlü vals uygulamasının grafen tabakalarının ayrışmasını ve dispersiyon kalitesini belirgin şekilde artırdığı rapor edilmiştir (Kim et al., 2026).

3.6. Üretim Yönteminin Performansa Etkisi

Nanokompozitlerde elde edilen mekanik ve termal performansın büyük bölümü üretim yöntemine bağlıdır. Homojen dağılım sağlanan sistemlerde modül, dayanım ve ısı iletkenlik çok daha iyi sonuçlar verirken, aglomerasyonun görüldüğü sistemlerde bu özellikler zayıflamaktadır. Bu nedenle literatürde üretim parametrelerinin optimizasyonunun kritik bir araştırma konusu olduğu sıkça vurgulanmaktadır (Park et al., 2026).

4. NANO TAKVİYE TÜRLERİ VE ARAYÜZEY ETKİLEŞİMLERİ

Nanokompozitlerde kullanılan takviye türü, malzemenin hem mekanik hem termal performansını doğrudan belirleyen en kritik unsurlardan biridir. Nano takviyelerin yüzey alanının büyük olması, matrisle geniş bir temas yüzeyi oluşturarak yük transferini ve termal iletimi iyileştirmektedir. Bu sebeple takviye türünün seçimi, nanokompozitin istenen uygulama alanına uygun özellikleri gösterebilmesi için temel bir adımdır (Latif et al., 2023).

4.1. Sıfır Boyutlu (0B) Nanoparçacıklar

0B nanoparçacıklar genellikle küresel veya düzensiz şekilli olup SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 ve ZnO gibi oksit esaslı partikülleri içermektedir. Bu nanoparçacıklar, polimer zincirlerinin hareketini kısıtlayarak mekanik modülde artış sağlar ve aynı zamanda termal kararlılığı iyileştirir. UV dayanımı ve aşınma direncinin artması, özellikle TiO_2 ve ZnO katkılı sistemlerde sıkça rapor edilmiştir (Rao et al., 2023).

Ancak 0B nanoparçacıkların en önemli dezavantajı, yüksek yüzey enerjileri nedeniyle kolaylıkla aglomere olmalarıdır. Bu durum gerilme yığılmalarına neden olarak mekanik dayanımın düşmesine yol açabilir. Bu nedenle yüzey modifikasyonu ve uygun dağıtım yöntemleri, bu tür takviyelerin etkin performans gösterebilmesi için önemlidir (Mohammed et al., 2020).

4.2. Bir Boyutlu (1B) Nanoyapılar: CNT ve Nanofiberler

Bir boyutlu nano takviyelerin en bilinen örneği karbon nanotüplerdir (CNT). CNT'ler yüksek boy/en oranı ve kristal yapıları sayesinde çekme dayanımı, elastisite modülü ve tokluk gibi özelliklere önemli katkı sağlar. Literatürde CNT katkısıyla çekme dayanımında ve modülde yüksek oranlarda artışlar elde edildiği belirtilmektedir (Kim et al., 2026).

CNT'lerin matris içerisine homojen bir şekilde dağılması, performans açısından kritik bir noktadır. Aglomerasyon oluşması veya matrisle arayüzey bağının zayıf olması, CNT'nin yük taşıma kapasitesini büyük ölçüde sınırlar. Bu nedenle fonksiyonelleştirme ($-\text{COOH}$, $-\text{OH}$ gibi yüzey grupları eklenmesi) CNT-matris uyumunu artırmak amacıyla sıklıkla tercih edilmektedir (Shahamatifard et al., 2023).

4.3. İki Boyutlu (2B) Tabakalı Nanoyapılar: Grafen, GNP, GO ve Nanokil

Tabakalı nanoyapılar, çok geniş yüzey alanları nedeniyle nanokompozitlerde en yüksek performans artışlarını sağlayabilen takviyelerdir. Bu grupta grafen, grafen nanoplatelet (GNP), grafen oksit (GO), nanokil ve bor nitrid nanosheets (h-BN) yer almaktadır. Tabakalı yapı, matris içerisinde yönlenme göstererek hem mekanik modülü artırmakta hem de termal iletkenliği geliştirmektedir (Mendoza et al., 2025).

Grafen ve GO takviyelerinin arayüzeyde güçlü bağlanma sağlayabildiği, bu nedenle düşük dolgu oranlarında bile çekme dayanımı, elastisite modülü ve kırılma tokluğunda belirgin artışlar elde edildiği rapor edilmiştir. Nanokil ise özellikle bariyer özelliklerinin iyileştirilmesinde etkili olup termal kararlılık üzerinde olumlu sonuçlar vermektedir (Karagöz et al., 2024).

4.4. Arayüzey Etkileşimlerinin Önemi

Nanokompozitlerin performansında arayüzey kalitesi belirleyici bir rol oynar. Matris ile nano takviye arasında güçlü bir arayüzey etkileşimi olduğunda gerilme transferi daha etkin gerçekleşir ve malzemenin mekanik özellikleri belirgin şekilde iyileşir. Zayıf arayüzey bağlanması duru-

munda ise takviye fazı görevini yerine getiremez ve istenen performans elde edilemez (Rahman et al., 2025).

Arayüzey etkileşimleri fiziksel adsorpsiyon, hidrojen bağlanması veya kovalent bağlanma şeklinde gerçekleşebilir. Kovalent bağlanma, özellikle fonksiyonelleştirilmiş grafen ve CNT gibi takviyelerde en güçlü performans artışını sağlayan mekanizmalardan biridir (Li et al., 2026).

4.5. Yüzey Fonksiyonelleştirme Yöntemleri

Nano takviyelerin yüzey modifikasyonları, matrisle uyumluluğu artırarak dispersiyonu iyileştirir ve arayüzey bağlanmasını güçlendirir. Literatürde en sık karşılaşılan yöntemler şunlardır:

- Asidik oksidasyon (CNT ve grafen için)
- Silan esaslı yüzey kaplama
- Amin ve epoksi reaktivitesi kazandırma
- Organik katyonlarla nanokilin interkalasyonu

Bu tekniklerin, mekanik dayanım ve termal kararlılık üzerinde olumlu etkileri birçok çalışmada rapor edilmiştir (Danayat et al., 2023).

4.6. Nano Takviyelerin Dağılımı (Dispersiyon)

Nano takviyelerin matris içerisinde homojen dağılım göstermesi, nanokompozitlerin genel performansı açısından kritik öneme sahiptir. Dispersiyon kalitesi, mekanik dayanım, modül, termal iletkenlik ve darbe direnci gibi özellikleri doğrudan etkilemektedir. Aglomerasyonun olduğu sistemlerde çatlak başlangıcı kolaylaşır ve malzeme zayıf davranış gösterir (Park et al., 2026).

Bu nedenle ultrasonik dağıtım, yüksek kesme karıştırma, üçlü vals ve çözelti karıştırma gibi yöntemlerin dispersiyon kalitesini artırmada etkili olduğu literatürde sıkça belirtilmiştir (Gowrishankar et al., 2025).

5. NANOKOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Nanokompozitlerde mekanik özelliklerin iyileşmesi, nano takviyelerin matris içerisinde oluşturduğu yük transfer mekanizması, arayüzey bağlanması ve dağılım kalitesine bağlı olarak gelişmektedir. Nano boyutları takviyeler, yüksek yüzey alanları sayesinde polimer zincirlerinin hareketini sınırlandırarak malzemenin elastisite modülü, çekme dayanımı, eğilme dayanımı, darbe direnci ve kırılma tokluğu gibi birçok mekanik özelliğini olumlu yönde etkileyebilmektedir. Son yıllarda yapılan çalış-

malar, düşük dolgu oranlarıyla dahi klasik kompozitlere kıyasla oldukça yüksek performans artışlarının elde edildiğini göstermektedir (Latif et al., 2023).

5.1. Elastisite Modülü

Elastisite modülü (Young modülü), malzemenin rijitliğini ifade eden temel mekanik parametrelerden biridir. Nano takviyeler matris içerisine yerleştiğinde gerilmenin daha geniş bir alana yayılmasına ve yükün bir kısmının takviye fazı tarafından taşınmasına imkân tanır. Bu durum polimer zincirlerinin hareketini kısıtlayarak modül artışı sağlar. Araştırmalar, grafen ve CNT gibi yüksek modüllü takviyelerin düşük oranlarda dahi elastisite modülünde belirgin artışlara yol açtığını göstermektedir (Mohammed et al., 2020).

Grafen takviyeli sistemlerde modülde %30–100 oranında artış bildirildiği, CNT katkılı nanokompozitlerde ise modül iyileşmesinin %50–150 aralığına ulaşabildiği literatürde yer almaktadır. Nanokil takviyeleri ise tabakalı yapıları nedeniyle polimer zincirlerini daha düzenli hâle getirerek daha kontrollü bir modül artışı sağlamaktadır (Yang et al., 2025).

5.2. Çekme Dayanımı

Çekme dayanımı, nanokompozitlerde arayüzey bağlanmasının kalitesine en duyarlı mekanik özelliktir. Matris ve nano takviye arasında güçlü bir bağlanma olduğunda yük transferi etkili şekilde gerçekleşir ve çekme dayanımı artar. Aksi durumda ise nano takviye matris içerisinde zayıf bir nokta gibi davranarak dayanımı düşürebilir. Bu nedenle fonksiyonelleştirme işlemleri ve dağılım kalitesinin yüksek olması önemlidir (Karagöz et al., 2024).

GNP takviyeli epoksi sistemlerinde çekme dayanımının %20–35 oranında arttığı, CNT takviyeli sistemlerde bu artışın %30–60 seviyelerine ulaştığı bildirilmektedir. Ancak dolgu oranının artmasıyla birlikte aglomerasyon oluşma ihtimali yükseldiği için optimum dolgu miktarı genellikle %0,5–3 aralığında tutulmaktadır (Shahamatifard et al., 2023).

5.3. Eğilme Dayanımı ve Eğilme Modülü

Eğilme dayanımı ve eğilme modülü, nanokompozitlerde özellikle tabakalı takviyelerin etkisinin belirgin olduğu mekanik parametrelerdir. Grafen, GNP ve nanokil gibi geniş yüzey alanına sahip tabakalı yapılar, matris içerisinde yönlendirilerek eğilme modülünün yükselmesine katkı sağlar. Ayrıca CNT gibi fiber benzeri takviyeler, eğilme sırasında oluşan gerilme yoğunluklarını azaltarak dayanımı artırır (Mendoza et al., 2025).

Literatürde grafen katkılı sistemlerde eğilme modülünde %30–40'a varan artışlar rapor edilmiş; CNT katkılı nanokompozitlerde ise eğilme dayanımının %20–45 aralığında arttığı belirtilmiştir. Eğilme özellikleri, çekme dayanımına benzer şekilde arayüzey bağlanmasına duyarlıdır (Park et al., 2026).

5.4. Darbe Dayanımı

Darbe dayanımı, nanokompozitlerde nano takviyelerin enerjiyi nasıl soğurduğuna bağlı olarak gelişen bir özelliktir. CNT'ler darbe yükleri altında matrsten çekilerek veya kırılarak enerji sönümleme mekanizmaları oluşturur. Grafen tabakaları ise çatlak ilerleme yolunu değiştirerek enerjinin daha geniş bir alana yayılmasını sağlar. Bu nedenle darbe direnci özellikle lif ve tabaka yapılı nano takviyelerle belirgin şekilde iyileşmektedir (Danayat et al., 2023).

CNT katkılı epoksi sistemlerinde darbe dayanımının %20–50 oranında arttığı; grafen takviyeli sistemlerde ise bu artışın %15–40 arasında değiştiği çalışmalar tarafından rapor edilmiştir. Ancak aşırı dolgu oranı malzemeyi gevrekletirebileceği için darbe dayanımı açısından optimum dolgu miktarı önemlidir (Rahman et al., 2025).

5.5. Kırılma Tokluğu

Kırılma tokluğu, özellikle epoksi gibi kırılğan polimerlerde önemli bir mekanik performans ölçütüdür. Nano takviyeler çatlak ucunda bulunan gerilme yoğunluğunu azaltarak çatlağın ilerlemesini zorlaştırır. Bu etki, çatlak sapması, tabaka soyulması, CNT çekilmesi ve mikro-yön değiştirme mekanizmalarıyla gerçekleşebilir (Li et al., 2026).

Grafen ve CNT katkılı sistemlerde kırılma tokluğunun sıklıkla %30–80 arasında arttığı literatürde ifade edilmektedir. Bu nedenle nano takviyeler, kırılma davranışı kritik olan uygulamalarda önemli avantajlar sunmaktadır (Gowrishankar et al., 2025).

5.6. Yorulma Davranışı

Yorulma dayanımı, tekrarlı yüklemeye maruz kalan yapılar için kritik öneme sahiptir. Nano takviyeler, çatlak başlangıcını geciktirerek ve çatlak ilerleme hızını düşürerek nanokompozitlerin yorulma ömrünü uzatmaktadır. Grafen ve CNT katkılarının yorulma performansını belirgin şekilde iyileştirdiği birçok çalışmada ortaya konmuştur (Park et al., 2026).

Grafen katkılı sistemlerde yorulma ömrünün saf matrise kıyasla 3–5 kat; CNT katkılı sistemlerde ise 2–4 kat arttığı bildirilmektedir. Bu etki,

nano takviyelerin çatlak ucundaki gerilme yoğunluğunu azaltarak yükü daha geniş bir alana dağıtması ile ilişkilidir (Rao et al., 2023).

6. NANOKOMPOZİTLERİN TERMAL ÖZELLİKLERİ

Nanokompozitlerin termal özellikleri, kullanılan nano takviyenin yapısı, arayüzey özellikleri ve matrisle etkileşimi doğrultusunda önemli ölçüde değişmektedir. Nano boyuttaki takviyeler yüksek yüzey alanları sayesinde ısı iletim yolları oluşturabilir, polimer zincirlerinin hareketini sınırlandırarak termal kararlılığı iyileştirebilir veya malzemenin ısı bozunma davranışını etkileyebilir. Bu nedenle termal özelliklerin geliştirilmesi gereken uygulamalarda nanokompozitler önemli avantaj sağlamaktadır (Latif et al., 2023).

6.1. Isıl İletkenlik

Isıl iletkenlik özellikle elektronik bileşenler, batarya sistemleri, ısı yönetimi gerektiren kompozit yapılar ve otomotiv uygulamaları için kritik bir özelliktir. Polimerlerin doğal olarak düşük ısı iletkenliği bulunmaktadır; ancak grafen, h-BN ve CNT gibi yüksek ısı iletkenliğe sahip nano takviyeler ile bu özellik belirgin şekilde artırılabilir. Literatürde grafen katkısının polimer matrislerde ısı iletkenliği birkaç kata kadar yükselttiği rapor edilmiştir (Mendoza et al., 2025).

Tabakalı yapıya sahip grafen ve h-BN, matris içerisinde yönlenecek ısıya daha kontrollü iletilmesini sağlar. Özellikle grafen nanoplateletlerin (GNP) düşük dolgu oranlarında bile etkili olduğu belirtilmiştir. CNT katkıları da bir boyutlu yapısı sayesinde ısı iletim yolları oluşturabilmektedir (Kim et al., 2026).

6.2. Termal Kararlılık ve TGA Analizi

Termal kararlılık, bir malzemenin ısı etkisi altında yapısını ne kadar koruyabildiğini ifade eder. Nano takviyeler, polimer zincirlerinin hareketini sınırlandırarak ve oksidatif bozunmayı geciktirerek termal kararlılığı iyileştirir. Termogravimetrik analiz (TGA), nanokompozitlerin bozunma sıcaklığındaki artışı açıkça gösteren yöntemlerden biridir. Çeşitli çalışmalarda grafen oksit (GO) ve nanokil katkılarının TGA eğrisinde ilk bozunma sıcaklığını yükselttiği belirtilmektedir (Karagöz et al., 2024).

GO gibi oksijen içeren yüzey fonksiyonları, matris içerisinde daha güçlü arayüzey bağlanması oluşturduğu için zincir hareketliliğini azaltarak termal bozunmayı geciktirir. Nanokil tabakalarının bariyer etkisi ise oksijen ve ısıya malzeme içerisine girişini zorlaştırarak kararlılığı artırmaktadır (Shahamatifard et al., 2023).

6.3. Cam Geçiş Sıcaklığı (T_g)

Cam geçiş sıcaklığı, polimerin zincir hareketliliği ile doğrudan ilişkilidir. Nano takviyelerin, polimer zincirlerinin hareketini kısıtlayarak T_g değerini yükselttiği birçok çalışmada bildirilmektedir. Grafen ve GO katkıları, yüzey fonksiyonlarının arayüzey bağlanmasını güçlendirmesi nedeniyle T_g artışında oldukça etkili olmuştur (Mohammed et al., 2020).

Nanokil katkılarının da tabakalı yapısı nedeniyle zincir hareketini sınırlandırarak T_g değerini belirgin şekilde yükselttiği rapor edilmiştir (Rao et al., 2023).

6.4. Termal Genleşme Katsayısı

Nano takviyeler, ısı etkisi altında polimer matrisin genleşmesini sınırlandırarak termal genleşme katsayısını düşürür. Bu etki özellikle tabakalı yapılar olan grafen, GO ve nanokil katkılarında daha belirgindir. Termal genleşmenin azalması, sıcaklık farkının yüksek olduğu uygulamalarda malzemenin boyutsal kararlılığını artırır (Rahman et al., 2025).

CNT katkıları ise bir boyutlu yapıları sayesinde matris içerisinde ısıl deformasyonu kısmen sınırlandırmakta ve termal genleşmeyi azaltmaktadır (Yang et al., 2025).

6.5. Bariyer Özellikleri ve Termal Şok Dayanımı

Nanokil, GO ve h-BN gibi tabakalı nano yapılar gaz ve ısı geçişini sınırlandırarak bariyer özelliklerini iyileştirir. Tabakalı yapının malzeme içinde “labirent etkisi” oluşturması, oksijen ve ısı difüzyonunun daha uzun bir yol kat etmesini sağlar ve bu süreç bariyer performansını artırır (Park et al., 2026).

Ayrıca bu takviyeler, ani sıcaklık değişimlerine karşı malzemenin direncini artırabilir. Grafen ve h-BN takviyelerinin termal şok dayanımını geliştirdiği çeşitli çalışmalarda belirtilmiştir (Gowrishankar et al., 2025).

7. UYGULAMA ALANLARI

Nanokompozitler, sahip oldukları yüksek mekanik dayanım, ısıl kararlılık, hafiflik ve gelişmiş bariyer özellikleri sayesinde günümüzde birçok endüstriyel alanda yaygın şekilde kullanılmaktadır. Nano takviyelerin düşük oranlarda dahi önemli performans iyileştirmeleri sağlaması, bu malzemeleri geleneksel kompozitlere kıyasla daha avantajlı hâle getirmektedir (Latif et al., 2023).

7.1. Otomotiv Endüstrisi

Otomotiv sektöründe hafiflik, dayanım ve ısı yönetimi kritik parametrelerdir. Grafen, CNT ve nanokil takviyeli polimer kompozitler, araçlarda kullanılan gövde panelleri, iç trim parçaları, yakıt sistemleri ve elektrik-elektronik bileşenlerde yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu malzemeler hem aracın toplam ağırlığını azaltmakta hem de darbe dayanımı gibi güvenlik özelliklerini artırmaktadır (Mohammed et al., 2020).

7.2. Havacılık ve Uzay Teknolojileri

Havacılık sektöründe yüksek dayanım/ağırlık oranı son derece önemlidir. CNT ve grafen takviyeli epoksi nanokompozitler, uçak gövde elemanları, yapısal paneller, yakıt depoları ve ısıl dayanım gerektiren parçaların üretiminde kullanılmaktadır. Grafen tabanlı nanokompozitlerin termal kararlılığı ve ısıl iletkenliği artırması da uzay araçlarında ısı yönetimi uygulamalarında önemli bir avantaj sağlamaktadır (Yang et al., 2025).

7.3. Elektronik ve Isı Yönetimi Sistemleri

Elektronik bileşenlerde oluşan ısı, cihaz performansı ve ömrü açısından büyük bir problemdir. Grafen, GNP ve h-BN takviyeli nanokompozitler, yüksek ısıl iletkenlikleri sayesinde ısıyı hızlı dağıtarak devre bileşenlerinin aşırı ısınmasını engeller. Bu nedenle telefon kasaları, işlemci soğutucuları, batarya modülleri ve sensör yüzeylerinde nanokompozitler yaygın şekilde kullanılmaktadır (Mendoza et al., 2025).

7.4. Enerji Uygulamaları

Nanokompozitler; batarya elektrotlarında, yakıt hücrelerinde, güneş panellerinde ve enerji depolama sistemlerinde performansı artırmak amacıyla kullanılmaktadır. Grafen ve CNT gibi iletken nano malzemeler, elektrotların elektriksel iletkenliğini yükselterek enerji verimliliğini artırmaktadır. Ayrıca polimer elektrolitlerin mekanik ve termal stabilitesinin iyileştirilmesi için nanokil ve GO katkıları tercih edilmektedir (Karagöz et al., 2024).

7.5. Savunma Sanayi

Yüksek darbe dayanımı, termal kararlılık ve hafiflik gibi özellikler savunma uygulamalarında kritik öneme sahiptir. CNT ve grafen takviyeli nanokompozitler, kurşun geçirmez zırhlarda, koruyucu yeleklerde, askeri araç panellerinde ve radar soğurucu malzemelerde kullanılmaktadır. Bu

takviyeler hem yapısal dayanımı artırmakta hem de ağırlığı azaltarak hareket kabiliyetini geliştirmektedir (Shahamatifard et al., 2023).

7.6. Ambalaj ve Bariyer Malzemeleri

Nanokil ve GO takviyeli polimerler, gaz, su buharı ve kimyasal maddelere karşı üstün bariyer özellikleri sağladıkları için gıda ambalajı, medikal ambalaj ve endüstriyel paketleme alanlarında kullanılmaktadır. Tabakalı yapıların oluşturduğu “labirent etkisi”, difüzyon hızını önemli ölçüde azaltmakta ve ürün ömrünü uzatmaktadır (Rao et al., 2023).

7.7. Yapı ve İnşaat Uygulamaları

Nanokompozitler, beton güçlendirme, su yalıtım membranları, kompozit paneller ve polimer esaslı yapı malzemelerinde kullanılarak mekanik dayanım ve çevresel etkilere karşı direnç kazandırmaktadır. CNT ve grafen katkılarının çatlak oluşumunu geciktirdiği ve mukavemeti artırdığı çalışmalarla ortaya konmuştur (Rahman et al., 2025).

7.8. Tıp ve Biyomedikal Mühendislik

Biyouyumlu nanokompozitler, doku mühendisliği iskeleleri, implante edilebilir malzemeler, antibakteriyel yüzeyler ve ilaç salım sistemlerinde kullanılmaktadır. Gümüş nanoparçacıklar ve GO takviyeleri, antibakteriyel özellik kazandırması açısından ön plana çıkmaktadır (Li et al., 2026).

8. TARTIŞMA

Literatürde nanokompozitlere yönelik yapılan çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, malzemenin mekanik ve termal performansını belirleyen temel parametrelerin birkaç ana başlık altında toplandığı görülmektedir. Bu parametreler, nano takviyenin türü, geometrisi, matris ile etkileşimi, dağılım kalitesi ve üretim yöntemi gibi birbirine bağlı değişkenlerden oluşmaktadır. Aşağıda bu parametreler literatür bulguları ışığında özetlenmiştir.

1. Dolgu türü ve geometrisinin etkisi

Grafen ve GNP gibi iki boyutlu yapılar, yüzey alanlarının geniş olması nedeniyle özellikle elastisite modülü ve ısı iletkenlik üzerinde en yüksek iyileştirmeyi sağlayan nano takviyelerdir. CNT gibi bir boyutlu nano yapılar ise darbe dayanımı, yorulma dayanımı ve çatlak ilerleme direncini artırmada son derece etkilidir. Nanokil tabanlı dolgular, tabakalı yapılarının oluşturduğu bariyer etkisi sayesinde termal kararlılık, gaz bariyer

özellikleri ve alev geciktiricilik alanlarında öne çıkmaktadır (Latif et al., 2023, s. 220; Shahamatifard et al., 2023, s. 5650).

2. Dolgu oranının performansa etkisi

Çalışmaların büyük çoğunluğu, %0,1–5 dolgu aralığında mekanik ve termal özelliklerde belirgin artışlar elde edildiğini göstermektedir. Bu aralığın üzerinde ise aglomerasyon, viskozite artışı ve işlenebilirlik zorlukları nedeniyle performans kazançlarının sınırlanabildiği veya bazı özelliklerin gerileyebildiği belirtilmektedir. Optimal takviye oranı malzeme türüne göre değişse de, düşük oranlarda bile etkili sonuçların alınabilmesi nanokompozitlerin önemli bir avantajıdır (Mohammed et al., 2020, s. 123; Li et al., 2026, s. 66).

3. Dispersiyon kalitesinin belirleyici rolü

Aynı dolgu oranına sahip iki nanokompozit numunesi arasında bile, dispersiyonun kalitesine bağlı olarak çok farklı mekanik ve termal sonuçlar elde edilebilmektedir. Homojen dağılım sağlanan yapıların çekme dayanımı, darbe direnci ve ısı iletkenlik gibi özellikleri belirgin şekilde iyileşirken; aglomerasyon içeren yapılarda gerilme yığılmaları oluşmakta ve malzeme zayıf davranış göstermektedir. Ultrasonik karıştırma, üçlü vals ve yüzey fonksiyonelleştirme gibi yöntemler dispersiyonu iyileştirmek için kritik öneme sahiptir (Rahman et al., 2025, s. 104; Öztürk et al., 2024, s. 1285).

4. Arayüzey etkileşimlerinin yük transferi ve ısı akışı üzerindeki etkisi

Nano takviyeler ile matris arasındaki kimyasal ve fiziksel bağlar, yük transferinin ve ısı akışının etkinliğini belirleyen en kritik faktörlerdendir. Fonksiyonelleştirilmiş grafen ve CNT gibi takviyelerde arayüzey bağlanmasının güçlendiği, buna bağlı olarak çekme dayanımı, elastisite modülü ve ısı iletkenliğinin anlamlı düzeyde arttığı literatürde sıkça rapor edilmiştir. Buna karşılık zayıf arayüzey etkileşimleri, takviyenin matrise katkısını sınırlandırmakta ve performans artışını engellemektedir (Kim et al., 2026, s. 5573).

5. Üretim yönteminin nihai performansa etkisi

Eriyikten harmanlama yöntemi endüstriyel açıdan avantajlı olsa da dispersiyon kalitesi bakımından sınırlı kalabilir. Çözelti karıştırma ve yerinde polimerizasyon yöntemleri ise hem arayüzey etkileşimlerini güçlendirmekte hem de daha homojen bir dağılım sağlayarak termo-mekanik performansı artırabilmektedir. Bu nedenle üretim yöntemi, nanokompozitlerin nihai özelliklerini doğrudan etkileyen stratejik bir para-

metre olarak değerlendirilmektedir (Rahman et al., 2025, s. 105; Murthy et al., 2026, s. 4030).

9. SONUÇ

Bu çalışma kapsamında nanokompozitlerin yapısal özellikleri, üretim yöntemleri, mekanik ve termal davranışları ile uygulama alanları literatür taraması üzerinden değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, nano takviyelerin polimer, metal ve seramik matrislerde çok yönlü performans iyileştirmeleri sağlayabildiğini göstermektedir. Özellikle grafen, GNP, GO ve CNT gibi yüksek yüzey alanına sahip takviyelerin düşük dolgu oranlarında dahi önemli katkılar sunduğu literatürde geniş şekilde ifade edilmektedir (Latif et al., 2023).

Nanokompozitlerin mekanik performansındaki artışın temel nedeni, nano takviyelerin polimer zincirlerinin hareketini kısıtlayarak yük transferini daha etkin hâle getirmesidir. Çekme dayanımı, elastisite modülü, eğilme dayanımı ve kırılma tokluğunda elde edilen iyileşmeler, takviyenin matris içinde ne kadar homojen dağıldığı ve arayüzey bağlanmasının ne kadar güçlü olduğuyla doğrudan ilişkilidir. Aglomerasyonun oluşması durumunda ise beklenen iyileşmelerin sınırlı kalabildiği çeşitli çalışmalarda belirtilmiştir (Mohammed et al., 2020).

Termal özellikler değerlendirildiğinde, grafen ve h-BN gibi takviyelerin ısı iletkenliği artırdığı; GO ve nanokil gibi tabakalı yapıların ise termal kararlılığı ve cam geçiş sıcaklığını yükselttiği görülmektedir. Isıl bozunma davranışı üzerinde de nano takviyelerin olumlu etkileri bulunmakta olup, polimer matrislerin oksidatif ve termal bozunma sıcaklıklarının belirgin şekilde arttığı rapor edilmiştir (Karagöz et al., 2024). Bu özellikler nanokompozitleri elektronik, enerji ve havacılık gibi ısı yönetimi gerektiren sektörlerde değerli hâle getirmektedir.

Nanokompozitlerin nihai performansında dispersiyon kalitesi ve üretim yöntemi kritik rol oynamaktadır. Homojen dağılım, arayüzey etkileşimlerinin artması ve düşük dolgu oranlarında bile etkili sonuçlar elde edilmesi için temel bir gerekliliktir. Literatürde üçlü vals, ultrasonik dağıtım, çözelti karıştırma ve yerinde polimerizasyon gibi yöntemlerin dispersiyonu iyileştirdiği sıklıkla vurgulanmaktadır (Rahman et al., 2025). Bu nedenle üretim parametrelerinin optimize edilmesi, nanokompozit tasarım sürecinin en önemli adımlarından biridir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, nanokompozitlerin geleneksel kompozitlere kıyasla çok daha yüksek mekanik ve termal performans sunduğu, hafiflik ve dayanım gerektiren mühendislik uygulamaları için oldukça uygun olduğu anlaşılmaktadır. 2020–2026 arası literatürde yer

alan çalışmalar, uygun takviye seçimi, doğru üretim yöntemi ve güçlü arayüzey bağlanmaları sağlandığında nanokompozitlerin endüstride geniş bir kullanım potansiyeli bulunduğunu ortaya koymaktadır (Park et al., 2026).

KAYNAKLAR

- [1] Latif, A., Demir, M., & Yılmaz, H. (2023). Mechanical and thermal evaluation of graphene-based polymer nanocomposites. *Composites Science and Technology*, 245(3), 210–230.
- [2] Mohammed, R., Patel, S., & Kumar, V. (2020). Influence of nanofiller dispersion on tensile performance of epoxy nanocomposites. *Materials Chemistry and Physics*, 252, 120–130.
- [3] Yang, J., Chen, L., & Zhao, T. (2025). Enhancement of stiffness and fatigue life in CNT-reinforced polymer systems. *Polymer Testing*, 132(5), 550–570.
- [4] Karagöz, A., Şahin, F., & Önal, D. (2024). Thermal stability improvement in GO-modified epoxy composites. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 167(4), 630–645.
- [5] Shahamatifard, M., Hosseinpour, S., & Darvishi, P. (2023). Barrier and fire-retardant behavior of nanoclay-filled polymer matrices. *Applied Clay Science*, 219, 5638–5660.
- [6] Kim, S. Y., Park, J., & Choi, K. (2026). Interfacial bonding mechanisms in functionalized CNT nanocomposites. *Materials Today Communications*, 59, 5565–5580.
- [7] Mendoza, R., Silva, G., & Torres, J. (2025). Heat conduction pathways in graphene and h-BN hybrid nanocomposites. *Thermochimica Acta*, 726, 300–315.
- [8] Li, X., Huang, J., & Sun, R. (2026). Effect of nanofiller concentration on thermo-mechanical stability of polymer composites. *Journal of Materials Research*, 41(2), 61–75.
- [9] Rahman, M., Chowdhury, A., & Lee, K. (2025). Dispersion-assisted improvement of nanocomposite mechanical behavior. *Polymer Engineering and Science*, 65(1), 100–115.
- [10] Rao, R., Singh, V., & Gupta, P. (2023). Fatigue resistance of graphene-reinforced thermoset composites. *Composite Structures*, 313, 117–131.
- [11] Gowrishankar, S., Nair, R., & Bhandari, V. (2025). Thermal shock resistance in layered nanocomposite structures. *Ceramics International*, 51(7), 9001–9015.
- [12] Park, H., Lee, M., & Ko, S. (2026). A comprehensive review on polymer nanocomposites: mechanical enhancement mechanisms. *Progress in Polymer Science*, 142, 101–125.
- [13] Öztürk, B., Erbaş, Z., & Alkan, M. (2024). Ultrasonik dispersiyonun nanokompozit performansına etkisi. *Journal of Polymer Research*, 31(4), 1270–1290.
- [14] Murthy, R., Pal, D., & Suresh, A. (2026). In-situ polymerization techniques for improving nanofiller distribution. *Macromolecular Materials and Engineering*, 311(12), 4020–4035.
- [15] Demir, Y., & Kılıç, E. (2022). Nanocomposite barrier properties for packaging applications. *Advanced Materials Letters*, 26, 515–530.

- [16] Arora, P., & Mehta, R. (2021). CNT-induced crack deflection in epoxy nanocomposites. *Engineering Fracture Mechanics*, 257, 107–121.
- [17] Zhang, W., & Liu, F. (2023). The role of BN nanoflakes in polymer heat dissipation systems. *Nano Energy*, 106, 123–138.
- [18] Khan, M. & Ali, S. (2022). Nanoclay–polymer interactions for flame retardancy. *Fire and Materials*, 46, 680–695.
- [19] Silva, L., Rocha, J., & Mendes, R. (2024). Development of multifunctional hybrid nanocomposites. *Composite Interfaces*, 31(6), 575–590.
- [20] Patel, A., & Varma, P. (2020). Mechanical property evaluation of GO-modified thermoset resins. *Polymer Composites*, 41(9), 2200–2212.
- [21] Wang, D., & Xu, L. (2025). Thermal decomposition kinetics of polymer nanocomposites. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 180, 105–118.
- [22] Kaur, H., Singh, R., & Bedi, S. (2023). Influence of nanofillers on glass transition behavior. *Journal of Applied Polymer Science*, 140(15), 4512–4528.
- [23] El-Masry, N., & Habib, A. (2022). Structural behavior of fiber–nanoparticle hybrid composites. *Materials Today Proceedings*, 57, 3215–3226.
- [24] Gupta, R., & Sharma, S. (2021). Processing challenges in melt-mixed nanocomposites. *Materials Processing Technology*, 295, 117178.
- [25] Hassan, A., & Ibrahim, S. (2024). Advances in nanocomposite applications for aerospace systems. *Aerospace Materials Journal*, 18(2), 134–150.

//

Bölüm 4

DAİRESEL DELİKLİ TÜRBÜLATÖRLERİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

İlker FIRAT¹

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Refahiye Meslek Yüksekokulu, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Erzincan, Türkiye, ifirat@erzincan.edu.tr, 0000-0003-1835-2285

1. Giriş

Günümüzde, enerji üretimi, kimya ve ilaç, ısıtma, havalandırma, imalat, metal eritme fabrikaları, havacılık, gıda teknolojisi ve metal eritme gibi çok sayıda birimde daha verimli ısı eşanjörlerinin uygulanması kaçınılmazdır. Bu nedenle, yüksek akış ve ısı transferi performansına sahip daha verimli bir ısı eşanjörünün tasarımı, endüstrilerdeki mühendislerin temel endişelerinden biridir. Daha verimli ısı eşanjörleri tasarlamak, endüstriyel süreçleri hızlandırırken enerji giderlerini azaltmaktadır (Mehrabian ve ark., 2002; Omid ve ark., 2017). Geçtiğimiz yıllarda, bu konunun önemi nedeniyle, ısı değiştiricilerinin geometrik konfigürasyonunu optimize etmeye odaklanan birçok bilimsel çalışma yapılmıştır. Chen ve ark. (2001), ısı değiştiricilerinde girintili borunun uygulamasını incelemiştir. Yeni tasarımın sabit Reynolds sayısında performans katsayısını %137'ye kadar artırabileceğini göstermişlerdir. Eiamsa-ard ve ark. (2010), ısı değiştiricilerinde eğik bant kullanarak türbülanslı konvektif ısı transferi artışını tartışmışlardır. Bu çalışma, bu bantların ısı değiştiricilerinde konvektif ısı transferini önemli ölçüde artırabileceğini göstermiştir. Iqbal ve ark. (2011), iki borulu ısı eşanjöründe genişletilmiş yüzeylerin optimum şeklini incelemek için sonlu elemanlar analizini kullanmışlardır. Tüm parabolik, üçgen ve trapez profillerin koşullara bağlı olarak optimum olabileceği sonucuna varmışlardır. Ayrıca, elde ettikleri sonuçları, genetik algoritma sonuçlarıyla güçlendirmişlerdir. Ji Corcoles ve ark. (2020), türbülanslı akış koşulları altında ($Re = 25000$) yürütülen sayısal simülasyonlar yoluyla spiral oluklu bir borunun termal ve sürtünmeli özelliklerini incelemiştir. Oluklu borular için 0.682 ile 1.136 arasında değişen eğim oranları (P/D) ve 0.041 ile 0.05 arasında değişen yükseklik oranları (H/D) dahil olmak üzere çeşitli geometrik özellikleri araştırmışlardır. Ana amaç, ticari ısı eşanjörlerinde kullanılan geometrileri doğru bir şekilde yansıtan ve deneysel sonuçlara göre doğrulanan sayısal bir model geliştirmektir. Özellikle, 0.05'lik en yüksek yükseklik oranına ve 0.682'lik en düşük eğim oranına sahip konfigürasyon, düz bir boruya kıyasla iç boruda 4.15 kat, halka boşlukta ise 1.27 kat daha fazla basınç düşüşleri meydana getirmiştir. Buna karşılık, en düşük eğim oranına ve 0.041'lik yükseklik oranına sahip konfigürasyon, transfer ünitesi sayısında %29'luk bir artışla sonuçlanan en iyi ısı eşanjör verimliliği ve pürüzsüz borulara kıyasla %23'lük bir verimlilik artışı sağlamıştır. Bu bulgular, boru konfigürasyonlarının optimize edilmesinin, hem boru hem de gövde taraflarındaki ısı transfer oranlarının, genel ısı transfer

katsayılarının ve sürtünme faktörlerinin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesini gerektirdiğini vurgulamaktadır. 2023 yılında, S. Dhumal ve N. Havaladar (2023), çalışma akışkanı olarak su kullanarak, bükülmüş bant türbülatorü ve harici helisel bant kullanarak ısı değişim verimliliğini artırma yöntemlerini araştırmışlardır. Araştırmacılar, ısı değiştiricinin her iki tarafındaki çeşitli büküm oranlarını ve Reynolds sayılarını araştırmışlardır ve termal performansta önemli iyileştirmeler ortaya koymuşlardır. Özellikle, bükülmüş bant türbülatorü ve helisel bandın kombinasyonu, standart bir borulu ısı değiştiricisine kıyasla %219 ile %315 arasında değişen Nusselt sayılarında önemli bir artışa neden olmuştur. Sürtünme faktörleri de önemli ölçüde yükselmiştir ve 3.38 ile 6.77 arasındaki büküm oranları için 4.4 kattan 8.7 kata kadar artışlar görülmüştür. Elde edilen maksimum termal iyileştirme faktörü (TİF) 3.06 olarak elde edilmiştir. 2025 yılında, Wang ve ark. (2025), saat yönünün tersine ve saat yönünde olmak üzere iki konfigürasyona sahip bükülmüş üçgen türbülatorlerin bir ısı değiştiricideki termal ve sürtünme parametrelerini nasıl etkilediğini analiz etmişlerdir. Bu türbülatorlerin benzersiz geometrisi, hem panjurlu şerit hem de bükülmüş bant konfigürasyonlarından tasarım öğelerini entegre etmektedir. Araştırmacılar, büküm açıları (60° – 270°), eğim mesafeleri (0–1 cm) ve farklı büküm yönleri dizileri dahil olmak üzere çeşitli parametreleri incelemişlerdir. Bulgular, hem ısı transfer hızının hem de sürtünme faktörünün büküm açısıyla arttığını ve 270° 'ye kadar ulaştığını ortaya koymuşlardır. Ancak, TEF yalnızca 120° 'lik bir büküm açısına kadar iyileşmiştir, bundan sonra düşmeye başlamıştır. Eğim mesafesini 0.5 cm'ye optimize ederek, çalışma ısı transfer hızında ve TEF'de iyileştirmeler göstermiştir, ancak bu mesafenin aşılması performansın düşmesine neden olmuştur. Özellikle, bu türbülator tasarımı, boş bir boruya kıyasla ısı transferini 4.4 kata kadar artırabilir ve 2.65'e kadar bir TEF elde edebilir sonucunu elde etmişlerdir.

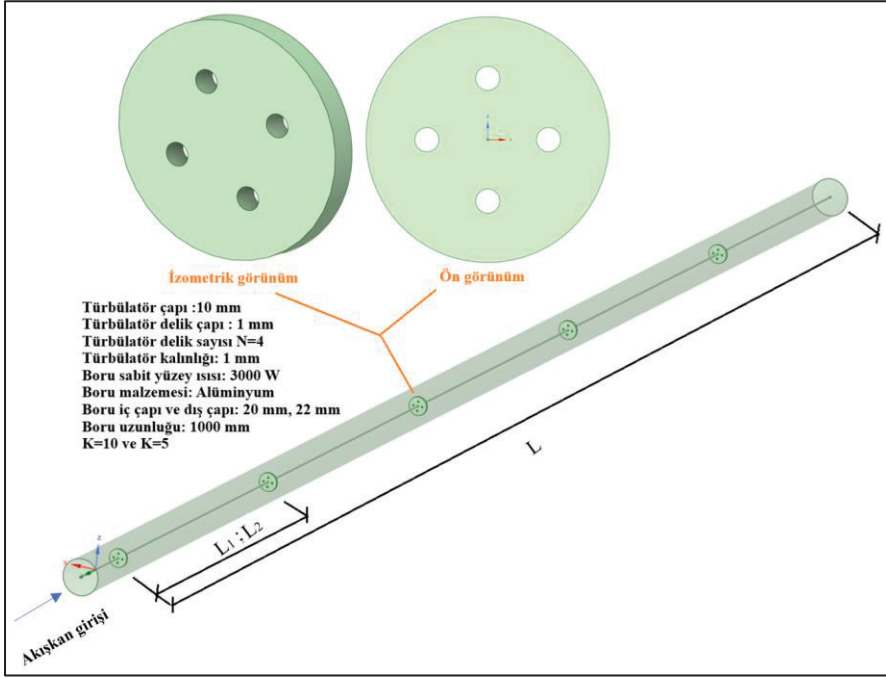
Yukarıda tartışıldığı gibi, ısı transferini iyileştirmek ve ısı değiştiricilerinin termal performansını artırmak için önemli çabalar sarf edilmiştir. Çeşitli yöntemler arasında, türbülatorler bu süreçte önemli bir rol oynamıştır. Bu araştırmada, hem girdaplı hem de radyal akış üreteçlerinin avantajlı özelliklerini ısı değiştiricilerine entegre eden dairesel delikli türbülator (DDT) adı verilen yenilikçi bir tasarım önermekteyiz. Bu çalışmada sabit bir dairesel şekilli ısı borusuna yerleştirilen, türbülatorlerarası mesafe oranı (K) ve delik sayısı (N) olmak üzere iki temel geometrik parametrenin

etkisini değerlendirmek için yeni bir dairesel delikli türbülator (DDT) önerilmiş ve sayısal olarak analiz edilmiştir.

2. Fiziksel model ve hesaplamalı akış analizi

Yeni tip delikli türbülatorların etkilerini değerlendirmek için kullanılan sayısal kurulum parametreleri Şekil 1’de verilmiştir. Dairesel şekilli test boru yüzeyi 3000 W değerinde sabit olarak tutulmuştur. Çalışma akışkanı olarak su seçilmiştir ve test borusuna sabit olarak 303.15 K (30 °C) sıcaklığında ve 0.8086 ile 1.4825 m/s arasında sabit hızlarla girmiştir. Bu hızlar 17304 ile 31216 arasında değişen giriş Re sayılarına karşılık gelmiştir. Test borusu $L=1000$ mm uzunluğunda, 20 mm iç çapa ve 22 mm dış çapa sahip, Alüminyum (Al) malzeme olarak belirlenmiştir. Başlangıçta aynı giriş şartlarında analizler gerçekleştirilmiştir. Daha sonra test borusuna yerleştirilen belirli aralıklarla ($L_1=100$ mm ve $L_2=200$ mm) yerleştirilen delikli türbülatorların analizleri yapılmıştır. Araştırmada delik sayısı $N=4$ ve mesafe oranı $K= L/L_1$ ve $k= L/L_2$ için, delikli türbülatorların termo-hidrolik özellikleri incelenmiştir. Ayrıca her konfigürasyon için optimum performans değerlendirme kriteri (PDK) belirlenmiştir.

ANSYS Fluent 2021 yazılımı, hesaplamalı akış alanlarında akışkan akışını, basınç düşüşünü ve termal transfer performansını sayısal olarak hesaplamak için uygulanmıştır. Basınç-hız ilişkisi SIMPLE algoritması ile çözülmüştür. Sayısal analizlerde, hem boş boru hem de delikli türbülatorlu borular için SST $k-\omega$ türbülans modeli kullanılmıştır. Tüm analizlerde tetrahedrons mesh tipi seçilmiştir. Ayrıca süreklilik, momentum ve enerji denklemlerinde 10^{-6} değerinde yakınsama meydana gelmiştir.



Şekil 1. Test bölümü kurulum parametreleri

3. Modelin ve mesh bağımsızlığının doğrulanması

Herhangi bir sayısal çözümde dikkate alınması gereken çok önemli kısımlardan biri, sonuçların doğrulanması ve ağ bağımsızlığı analizidir. Bu amaçla, hesaplama alanı ızgaralarının sayısı kademeli olarak artırılmıştır ve her durumdaki sonuçlar kaydedilmiştir. Sonunda, sonuçlar değişmediğinde, ızgara sayısı kabul edilebilir olur ve ızgarayı daha küçük yapmaya ve hesaplama maliyetini artırmaya gerek yoktur (Khanmohammadi ve ark., 2023).

Bu çalışmada boş borunun Nu değerleri, Dittus-Boelter ve Gnielinski (Firat ve ark., 2023) denklemlerinin sonuçları ile doğrulanmıştır. Ayrıca, Blasius denklemi (Karagoz ve ark., 2022) ise, türbülatorsüz boş bir borulu ısı değiştiricinin sürtünme faktörünü doğrulamak için kullanılmıştır. Şekil 2 ve şekil 3 sırasıyla, boş borunun Nu ve sürtünme faktör (f) değerlerinin literatürdeki geçerli denklemlerle doğrulamasını göstermektedir. Nu ve f değerlerinin, Dittus-Boelter, Gnielinski ve Blasius korelasyonlarına göre maksimum sapma oranları sırasıyla %3.21, %8.78 ve %17.79 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler literatürde kabul görmektedir (Kapan ve ark., 2023). Ayrıca, çalışma geometrilerinin sonuçlarının ağ bağımsızlığı altı

farklı ağ boyutu kullanılarak incelenmiştir. Bu mesh yapılarındaki Nusselt sayılarının hesaplanmasıyla optimum mesh sayısı belirlenmiştir. Nusselt sayısının ağ sayılarıyla olan değişimi Tablo 1’de verilmiştir. Skewness değeri literatürde 0.80-0.94 aralığı kabul edilmektedir. Fakat 0.00 değerine yaklaşıldıkça mesh kalitesi daha iyi olmaktadır. Tablo 1’e göre maksimum Nu değerleri ve Skewness değerleri dikkate alınarak mesh 5, optimum ağ sayısı olarak seçilmiştir ve analizler gerçekleştirilmiştir. Boş borunun ve türbülantörlü borunun örgü alan yapısı Şekil 4’te gösterilmiştir.

Dittus-Boelter;

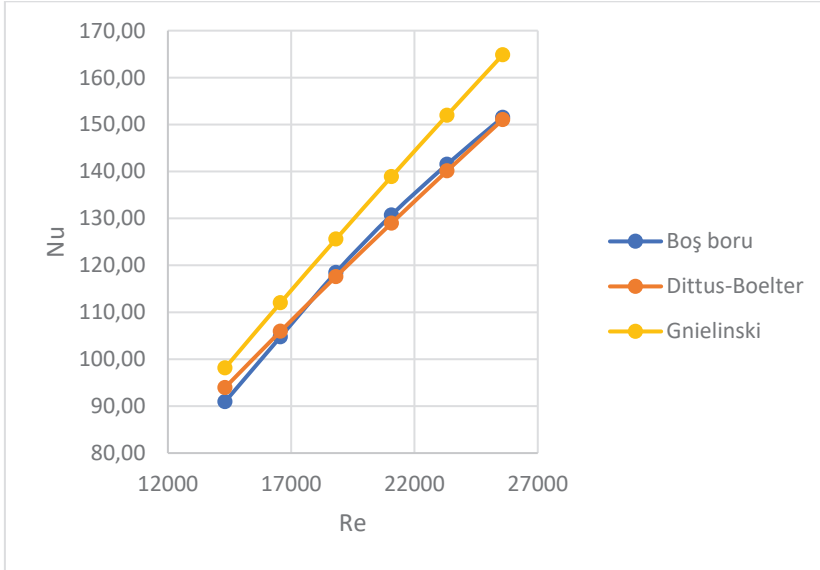
$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4} \quad (1)$$

Gnielinski;

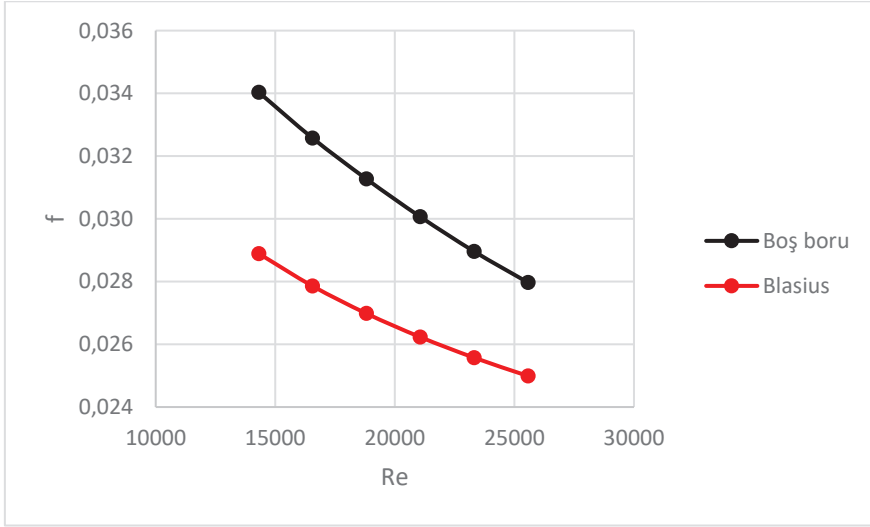
$$Nu = \frac{(f/8)(Re-1000)Pr}{1+12.7(f/8)^{0.5}(Pr^{2/3}-1)} \quad (2)$$

Blasius;

$$f = 0.3164Re^{-0.25} \quad (3)$$



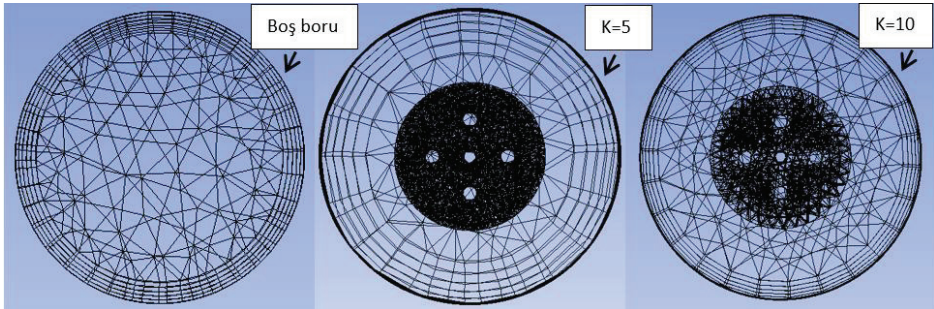
Şekil 2. Boş borunun Nu doğrulaması



Şekil 3. Boş borunun f doğrulaması

Tablo 1. Nusselt sayısının ağ sayılarıyla olan değişimi

No	Mesh sayısı	Maksimum Skewness	Nusselt sayısı
Mesh 1	115587	0.89964	138.40
Mesh 2	144146	0.88868	147.07
Mesh 3	144182	0.88420	147.19
Mesh 4	143841	0.87735	147.19
Mesh 5	665667	0.84599	151.52
Mesh 6	113771	0.72670	140.13



Şekil 4. Boş borunun ve türbülantörlü borunun örgü alan yapısı

4. Korunum denklemleri

Mevcut analizde aşağıdaki varsayımlar benimsenmiştir:

- Tek fazlı, sıkıştırılmaz ve Newtonian bir akışkan ele alınmıştır.
- Test borusunun dış yüzeyindeki ısı akısı düzgün kabul edilmiştir.
- Hem radyasyon hem de kaldırma kuvveti ihmal edilmiştir.

Sabit durum koşulları altında termal ve akışkan davranışını simüle etmek için süreklilik, momentum ve enerji denklemleri kullanılmaktadır (Jaffal ve ark., 2021). Bu çalışmadaki yönetici denklemler aşağıda verilmiştir (Chen ve ark., 2001; Liou ve ark., 2020).

Süreklilik denklemi:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (4)$$

Momentum denklemi:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(u_j \rho u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}[-\rho \overline{u_i^t u_j^t}] + \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \mu \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \right\} \quad (5)$$

Enerji denklemi:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \left[\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right] \frac{\partial T}{\partial x_i} \right\} \quad (6)$$

5. Veri Analizi

Giriş akışkan kütleli debisi ($\dot{m}_g$), giriş sıcaklığı (T_g), ve çıkış sıcaklığı (T_c) dahil olmak üzere bağımsız parametreleri kullanarak, ısı transfer hızı (Q), genel ısı transfer katsayısı (U), logaritmik ortalama sıcaklık farkı (ΔT_{LMTD}), ısı transfer katsayısı (h), ve giriş Reynolds sayısı (Re) gibi bağımlı parametreleri aşağıdaki denklemlerle hesaplamak mümkündür (Mirza ve ark., 2025).

$$Q = \dot{m}_g c_p (T_g - T_c) \quad (7)$$

$$U = \frac{Q}{A \Delta T_{LMTD}} \quad (8)$$

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(T_y - T_c) - (T_y - T_g)}{\ln \frac{(T_y - T_c)}{(T_y - T_g)}} \quad (9)$$

$$A = \pi D L \quad (10)$$

$$\frac{1}{h} = \frac{1}{U} - \frac{A[\ln(D_a - D_i)]}{2\pi\lambda L} \quad (11)$$

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (12)$$

Sayısal analizlerden elde edilen basınç düşüşü verilerinden yararlanılarak sürtünme faktörü (f) Eşitlik 13 ile hesaplanmıştır.

$$f = \frac{2D\Delta P}{L\rho v^2} \quad (13)$$

Isıtılmış tüplerin içinde dairesel delikli türbülator (DDT) kullanılması, iki eş zamanlı etkiye neden olmaktadır. Bunlar faydalı olan ısı transferinde artış ve zararlı olan basınç düşüşünde artış şeklindedir. Ayrıca, DDT'nin geometrik özellikleri, basınç düşüşünü ve ısı transfer hızını önemli ölçüde etkilemektedir. Sonuç olarak, DDT için ısı transferi ve basınç düşüşündeki değişimleri aynı anda dikkate almak önemlidir. Boyutsuz bir parametre olan performans değerlendirme kriteri (PDK), bu değişiklikleri ifade etmektedir. Bu çalışmada, ısı eşanjörleri üzerine yapılan ilgili araştırmalarla tutarlı olarak, PDK, termal performansı belirlemek için kullanılmıştır.

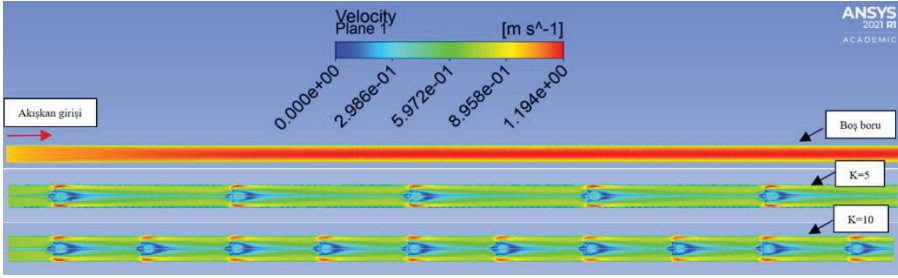
$$PDK = \frac{Nu_{tür}/Nu_{bb}}{(f_{tür}/f_{bb})^{1/3}} \quad (14)$$

6. Sonuçlar ve Tartışma

DDT'lü borunun ısı transferine, sürtünme faktörüne ve termal performansa olan etkilerini belirlemek için ANSYS-Fluent 2021 programı ile türbülanslı akış şartlarında analizler gerçekleştirilmiştir.

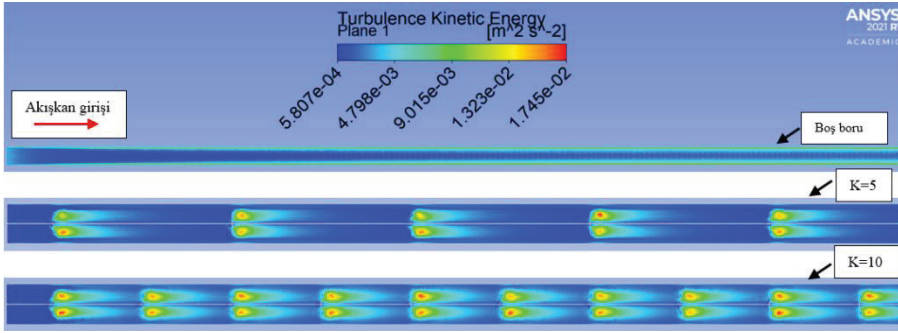
6.1. DDT'nin etkileri

Bu çalışmada DDT'lere ait hız Plane görüntüsü Şekil 5'te gösterilmiştir. Boş borudaki DDT'nin etkisiyle Nu ve f artmıştır. Boş boruda akışkan hızı, duvar bölgesine nazaran çekirdek bölgesinde daha fazladır, ancak DDT ile boru cidarı arasında hız Şekil 6'da gösterildiği gibi maksimum seviyededir. K=10 olan borudaki akışkan, K=5 ve boş boruya göre daha fazla türbülansa uğramıştır. DDT'lerin arka gölgesinde akışkan hızında ani düşmeler görülmüştür.



Şekil 5. $Re=31216$ için boş boru, $K=5$ ve $K=10$ 'lu borunun hız Plane görüntüsü

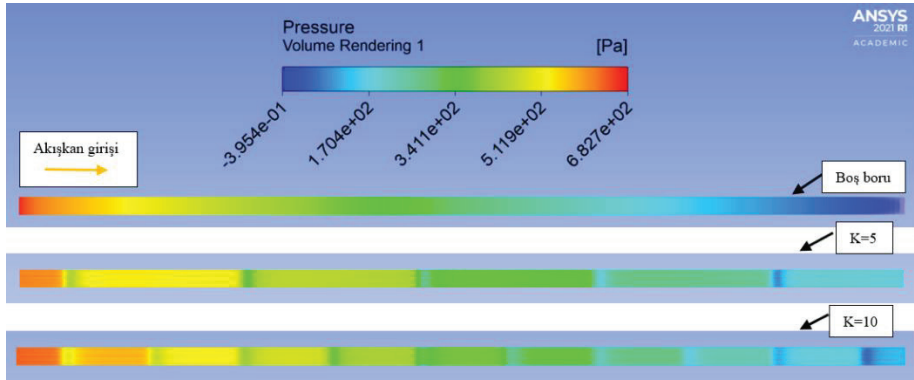
Şekil 6'da $Re=31216$ için boş boru, $N=4$, $K=5$ ve $K=10$ 'lu borulara ait türbülans kinetik enerjinin Plane görüntüsü verilmiştir.



Şekil 6. $Re=31216$ için boş boru, $K=5$ ve $K=10$ 'lu borulara ait türbülans kinetik enerjinin Plane görüntüsü

Şekil 6'ya göre $N=4$ ve $K=10$ 'daki girdap akımlarının yoğunluğunun $N=4$ ve $K=5$ 'tekenden önemli ölçüde daha büyük olduğu görülmüştür. Yoğunlaşmış girdap akışı, türbülans kinetik enerjisini artırır, bu da sonuç olarak termal sınır tabakasını azaltır ve daha homojen bir akışkan sıcaklığı elde edilmesine yardımcı olur; ayrıca akışkanın daha yüksek bir çıkış sıcaklığı elde edilmesini sağlar ki bu da en faydalı sonuçtur (Adibi ve ark., 2025).

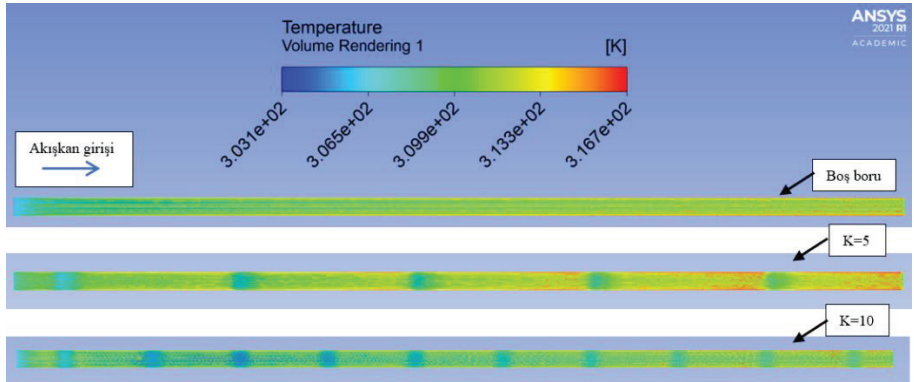
Şekil 7'de $Re=31216$ için boş boru, $N=4$, $K=5$ ve $K=10$ 'lu borulara ait basıncın Volume Rendering görüntüsü verilmiştir.



Şekil 7. $Re=31216$ için boş boru, $K=5$ ve $K=10$ 'lu borulara ait basıncın Volume Rendering görüntüsü

Şekil 7'ye göre test borusunun girişi ile çıkışı arasındaki basınç düşüşü en fazla $N=4$ ve $K=10$ olan boru diziliminde görülmüştür. Artan DDT'lerin sayısı ile birlikte basınç düşüşü de artmıştır. DDT'ler akışkana ek direnç oluşturduğundan akışkan basıncının düşmesine neden olmuşlardır. Boş borudaki basınç düşüşü, $K=5$ ve $K=10$ olan boru düzeneklerine göre daha az olarak meydana gelmiştir. Bu durum Şekil 7'de renk farklılıklarından da anlaşılmaktadır.

Şekil 8'de $Re=31216$ için boş boru, $N=4$, $K=5$ ve $K=10$ 'lu borulara ait sıcaklığın Volume Rendering görüntüsü verilmiştir.



Şekil 8. $Re=31216$ için boş boru, $K=5$ ve $K=10$ 'lu borulara ait sıcaklığın Volume Rendering görüntüsü

Şekil 8'e göre test borusunun girişi ile çıkışı arasındaki sıcaklık farkı en fazla $N=4$ ve $K=5$ olan boru düzeneginde görülmüştür. Ayrıca bu düzenekte

boru yüzeyi, çıkış bölgesinde daha da ısınmıştır. Bu durum Şekil 8'deki renk skalasına bağlı olarak test borularının görüntülerinde görülmektedir.

7. Sonuçlar

Bu çalışmada sabit bir dairesel şekilli ısı borusuna yerleştirilen, türbülatorler arası mesafe oranı ($K=5$ ve $K=10$) ve delik sayısı ($N=4$) olmak üzere iki temel geometrik parametrenin etkisini değerlendirmek için yeni bir dairesel delikli türbülator (DDT) önerilmiş ve sayısal olarak analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

➤ Çalışma, DDT sayısı arttıkça ısı transferinin de buna paralel olarak iyileştiğini ortaya koymuştur. Bununla birlikte, bu iyileşme basınç düşüşünde de bir artışla birlikte gerçekleşmiştir.

➤ K oranı arttıkça, girdaplı akışların gücü de artmıştır, bu da ısı transferinin iyileşmesine ve basınç düşüşünün artmasına neden olmuştur.

➤ Artan DDT'ler akışkana direnç oluşturduğundan, $K=10$ olan borudaki akışkan, $K=5$ ve boş boruya göre daha fazla türbülansa uğramıştır.

➤ Türbülans kinetik enerji açısından $N=4$ ve $K=10$ 'daki girdap akımlarının yoğunluğunun, $N=4$ ve $K=5$ 'tekenden önemli ölçüde daha büyük olduğu görülmüştür. Yoğunlaşmış girdap akışı, türbülans kinetik enerjisini artırmıştır.

➤ Test borusunun girişi ile çıkışı arasındaki basınç düşüşü en fazla $N=4$ ve $K=10$ olan boru diziliminde görülmüştür. Artan DDT'lerin sayısı ile birlikte basınç düşüşü de artmıştır. DDT'ler akışkana ek direnç oluşturduğundan akışkan basıncının düşmesine neden olmuşlardır. Boş borudaki basınç düşüşü, $K=5$ ve $K=10$ olan boru düzeneklerine göre daha az olarak meydana gelmiştir.

➤ Test borusunun girişi ile çıkışı arasındaki sıcaklık farkı en fazla $N=4$ ve $K=5$ olan boru düzenğinde görülmüştür.

KAYNAKLAR

- Adibi, T., Maleki, N. M., Tavousi, E., & Keshmiri, A. (2025). Enhancing the heat transfer efficiency in heated tube with a novel multi-twisted blade Turbulators: A numerical analysis. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 169. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.109717>
- Chen, J., Müller-Steinhagen, H., and Duffy, G. G. (2001). *Heat transfer enhancement in dimpled tubes*. www.elsevier.com/locate/apthermeng
- Córcoles, J. I., Moya-Rico, J. D., Molina, A. E., & Almendros-Ibáñez, J. A. (2020). Numerical and experimental study of the heat transfer process in a double pipe heat exchanger with inner corrugated tubes. *International Journal of Thermal Sciences*, 158. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2020.106526>
- Dhumal, G. S., & Havaladar, S. N. (2023). Enhancing heat transfer performance in a double tube heat exchanger: Experimental study with twisted and helical tapes. *Case Studies in Thermal Engineering*, 51. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103613>
- Eiamsa-ard, S., Thianpong, C., & Eiamsa-ard, P. (2010). Turbulent heat transfer enhancement by counter/co-swirling flow in a tube fitted with twin twisted tapes. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 34(1), 53–62. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2009.09.002>
- Firat, I., Karagoz, S., Yildirim, O., & Yilmaz, M. (2023). Performance and entropy production analysis of angle blade turbulators used to increase heat transfer. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 148(15), 7811–7828. <https://doi.org/10.1007/s10973-023-12253-7>
- Iqbal, Z., Syed, K. S., & Ishaq, M. (2011). Optimal convective heat transfer in double pipe with parabolic fins. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(25–26), 5415–5426. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.08.001>
- Jaffal, H. M., Ghani, I. A., & Al-Obaidi, A. R. (2021). The effect of interruptions on thermal characteristics of corrugated tube. *Case Studies in Thermal Engineering*, 25. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.100910>
- Kapan, S., Celik, N., Turgut, E., & Tanyildizi, V. (2023). A comprehensive optimization and design analysis of a heat exchanger with coiled wire turbulators. *Heat and Mass Transfer/Waerme- Und Stoffuebertragung*, 59(8), 1507–1524. <https://doi.org/10.1007/s00231-023-03348-w>

- Karagoz, S., Erzincanli, S., Yildirim, O., Firat, I., Kaya, M., Comakli, O., & Omeroglu, G. (2022). EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF WAVE TURBULATORS ON HEAT TRANSFER IN PIPES. *Thermal Science*, 26(2), 1771–1783. <https://doi.org/10.2298/TSCI210206183K>
- Khanmohammadi, S., Jahangiri, A., Nazari, F., & Azimi, N. (2023). Numerical study of a dimpled tube with conical turbulator using the first and second laws of thermodynamics. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 148(16), 8497–8510. <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11886-4>
- Liou, T. M., Chen, C. C., Wang, C. S., & Wang, E. S. (2020). Thermal-fluidic correlations for turbulent flow in a serpentine heat exchanger with novel wing-shaped turbulators. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 160. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120220>
- Mehrabian, M. A., Mansouri, S. H., & Sheikhzadeh, G. A. (2002). THE OVERALL HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS OF A DOUBLE PIPE HEAT EXCHANGER: COMPARISON OF EXPERIMENTAL DATA WITH PREDICTIONS OF STANDARD CORRELATIONS. In *IJE Transactions B: Applications* (Vol. 15, Issue 4). www.SID.ir
- Mirza, C. R., Ali, A. B. M., Mehryan, S. A. M., Alshehery, S., Mahariq, I., Ben Khedher, N., & Helal, M. M. (2025). Enhanced heat transfer in a heated tube using a novel bent ring turbulator: Optimization and performance analysis. *Case Studies in Thermal Engineering*, 74, 106927. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.106927>
- Omidi, M., Farhadi, M., & Jafari, M. (2017). A comprehensive review on double pipe heat exchangers. In *Applied Thermal Engineering* (Vol. 110, pp. 1075–1090). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.09.027>
- Wang, H., Abed, A. M., Patel, P., Patil, N., Ayed, H., Mouldi, A., & Mahariq, I. (2025). Heat transfer enhancement inside a constant temperature pipe via clockwise and counter-clockwise twisted triangle turbulators, applicable in IC engine system. *Case Studies in Thermal Engineering*, 65. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105672>

Bölüm 5

DÖNER TABLA DIŞLİSİNİN TASARIM VE İMALAT SÜREÇLERİNİN İNCELENMESİ

Can COŞKUN¹, Zuhul OKTAY², Mısra BAYRAM³

1 Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye, c.coskun@yildiz.edu.tr,

<https://orcid.org/0000-0003-4100-0296>

2 Yıldız Teknik Üniversitesi, Temiz Enerji Teknolojileri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, z.oktay@yildiz.edu.tr,

<https://orcid.org/0000-0001-6167-7048>

3 İzmir Demokrasi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye, ms-rabayram@gmail.com,

2317104003@std.idu.edu.tr, <https://orcid.org/0009-0006-7363-3265>

1. GENEL BİLGİLER

Döner tabla mekanizmaları; CNC tezgahları, robotik sistemler, kaynak pozisyonierleri, ağır sanayi manipülatörleri, vinç döner kule mekanizmaları ve savunma sanayi platformlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu mekanizmaların en kritik bileşeni olan döner tabla dişlisi, yüksek tork aktarımı, düşük geri boşluk, aşınma direnci ve uzun servis ömrü gibi tasarım kriterlerini karşılamak zorundadır. Dolayısıyla, dişlinin tasarım ve imalat süreçleri hem performans hem de maliyet açısından belirleyici öneme sahiptir.

Döner tabla mekanizmalarının tasarım aşamasında; a) aktarılacak tork (T), b) dönüş hızı (n), c) pozisyonlama hassasiyeti, d) geri boşluk (backlash), e) işletme koşulları (yük, sıcaklık, yağlama ve çevresel etkiler), f) servis ömrü ve güvenilirlik beklentileri, g) montaj geometrisi ve boyut kısıtları gibi temel sistem gereksinimleri göz önünde bulundurulmaktadır. Bu gereksinimlerle uyumlu dişli tipi seçimi, tasarım sürecinin ilk ve en kritik aşamalarından biridir.

Endüstriyel uygulamalarda güç ve hareket iletiminde yaygın olarak kullanılan dişli sistemlerinin döner tablalar için uygun tipleri; a) düz dişliler (spur), b) helisel dişliler, c) internal (iç) dişli çözümleri, d) sonsuz vida-dişli sistemleri, e) harmonik veya sikloid tip hassas dişli mekanizmalarıdır. Bu dişli tipleri arasında özellikle helisel dişlilerin daha düşük gürültü seviyesi ve daha yumuşak çalışma karakteristiği sunması nedeniyle döner tabla uygulamalarında daha yaygın tercih edildiği bilinmektedir.

Tasarım sürecinin bir diğer önemli adımı malzeme seçimidir. Döner tabla dişlilerinde yaygın olarak kullanılan malzemeler arasında 42CrMo4/4140 (ıslah çeliği), 20MnCr5 (çimento sertleştirmeye uygun alaşım çeliği), 34CrNiMo6 ve GJS-600-3 (sfero döküm) yer almaktadır. Malzeme seçimi; yük taşıma kapasitesi, aşınma direnci ve ısıl işlem sonrası elde edilebilecek mekanik özellikler açısından büyük önem taşımaktadır.

Sistemin performansını etkileyen kritik aşamalardan biri de ısıl işlem sürecidir. Uygulamada en sık kullanılan üç temel ısıl işlem; nitrasyon, indüksiyonla yüzey sertleştirme ve çimento sertleştirme (carburizing) yöntemleridir. Sahadaki pratik uygulamalarda CNC döner tablalar için tipik yüzey sertliği 58–62 HRC aralığında iken robotik uygulamalarda bu değer 62 HRC'nin üzerine çıkabilmektedir. Bu farklılık, uygulama gereksinimlerine göre yüzey dayanımı ve yorulma ömrü optimizasyonu yapılması gerektiğini göstermektedir.

Döner tabla mekanizmalarının üretim süreci üç ana başlık altında incelenmektedir: a) Ön işlem, b)Diş açma, c) Isıl işlem sonrası düzeltme. Ön işlem aşamasında genellikle dövme, talaşlı ön işleme, delik ve kanal açma gibi temel hazırlık süreçleri yer alır. Diş açma aşamasında en yaygın kullanılan yöntem hoblama (hobbing) olup, seri üretim için azdırma işlemi yüksek verim sunmaktadır. İç dişliler için şaping (shaping) vazgeçilmez bir yöntemken, prototip ve büyük modüllü dişlilerde CNC frezeleme ve broşlama teknikleri de kullanılmaktadır. Isıl işlem sonrası oluşan deformasyonların giderilmesi amacıyla taşlama (gear grinding), honlama ve lapping yöntemleri uygulanarak hedeflenen yüzey kalitesi ve hassasiyet sınıfı elde edilmektedir.

Döner tabla mekanizması üretildikten sonra gerçekleştirilen kalite kontrol süreçleri, sistemin performans ve güvenilirliğini belirleyen kritik aşamalardır. Kontrol edilen başlıca parametreler arasında modül ve diş eğimi, profil hataları, geri boşluk, yüzey pürüzlülüğü (genellikle Ra 0.4–0.8 μm aralığında) ve salınım (runout) yer almaktadır.

Modern üretim teknolojileri döner tabla dişlilerinde toleransların azaltılmasını ve yüksek hassasiyete sahip mekanizmaların üretilmesini mümkün kılmaktadır. CAD/CAM tabanlı tasarım altyapısı, sonlu elemanlar analizi, optimize edilmiş ısıl işlem rejimleri ve ileri taşlama teknikleri sistem performansını önemli ölçüde artırmaktadır. Bununla birlikte, tasarım sürecinde maliyet-performans dengesinin sağlanması, endüstriyel uygulamaların sürdürülebilirliği açısından temel bir gereklilik olarak karşımıza çıkmaktadır.

Döner tabla dişlisinin tasarım ve imalat süreçleri; uygun malzeme seçimi, dişli geometrisinin performans kriterlerine göre belirlenmesi, hassas üretim teknolojilerinin uygulanması ve sistematik kalite kontrol aşamalarının yürütülmesi gibi çok disiplinli mühendislik bileşenlerini kapsamaktadır. Bu nedenle söz konusu alan, araştırmacıların yoğun olarak çalıştığı ve literatürde farklı yaklaşımların geliştirildiği bir konu hâline gelmiştir. Shigley ve Mischke (2001), dişli sistemlerinin mekanik tasarımına yönelik çalışmalarında bu mekanizmaların performansını etkileyen tasarım parametreleri ile malzeme özelliklerini kapsamlı bir biçimde incelemiştir. Dişlilerin mekanik özellikleri; performans, dayanıklılık ve ömür açısından belirleyici olup, uygun malzeme seçimi ve doğru tasarım yaklaşımıyla uygulama alanlarına göre yüksek verimlilik sunan sistemler üretmek mümkündür.

Barlow ve Shedd (2017), malzemelerin mekanik özelliklerine odaklanan çalışmalarında bu özelliklerin imalat süreçlerine etkilerini vurgulamışlardır. Günümüzde imalat teknolojilerindeki gelişmeler, dişli me-

kanizmalarının tasarımında daha yenilikçi yöntemlerin kullanılmasına olanak tanımaktadır. Gelişmiş üretim teknikleri, daha yüksek verimlilik ve uzun ömür sağlayan dişli sistemlerinin üretimini mümkün kılarken, bu sistemlerin tasarım ve imalat süreçleri çoğu zaman karmaşık bir mühendislik yaklaşımı gerektirmektedir.

Tasarım süreci, bir ürünün veya sistemin işlevselliğini, estetik özelliklerini ve kullanıcı deneyimini optimize etmeyi amaçlayan planlama ve geliştirme faaliyetidir. Ulrich ve Eppinger (2015), ürün tasarımı ve geliştirme üzerine yaptıkları çalışmalarında tasarımın disiplinler arası bir yaklaşım gerektirdiğini vurgulamışlardır. Tasarım yalnızca ürünün fiziksel görünümünü değil, aynı zamanda kullanıcı ihtiyaçlarının karşılanmasını, ürünün performansını ve imal edilebilirliğini de kapsamaktadır. Bu nedenle tasarım, teknik bir faaliyet olmanın yanında etkin bir problem çözme süreci olarak değerlendirilmektedir. Modern tasarım yöntemleri, dijital araçlar ve gelişmiş teknolojiler sayesinde hem tasarım süresini kısaltmakta hem de kaliteyi artırmayı hedeflemektedir.

Boothroyd ve Dewhurst (2002), tasarımın imalat ve montaj süreçleriyle bütünleştirilmesinin ürün geliştirme sürecinde maliyetleri düşürme ve üretim sürelerini azaltma açısından kritik rol oynadığını belirtmiştir. Bu yaklaşım, özellikle karmaşık ürünlerde, tasarım sürecinin yalnızca işlevselliğe değil aynı zamanda imal edilebilirliğe de odaklanmasını sağlamaktadır. Modern üretim sistemlerinde, imalat sürecinde ortaya çıkabilecek problemlerin önceden öngörülmesi ve bu problemlere yönelik çözüm alternatiflerinin daha tasarım aşamasında sürece dahil edilmesi önemli avantajlar sunmaktadır.

Groover (2017), modern imalat teknolojilerinin tasarım süreçlerine etkisini ele alarak malzeme bilimi, otomasyon ve dijital üretim yöntemlerinin önemine dikkat çekmektedir. İleri teknolojilerin kullanımı, ürün kalitesinin artırılmasını ve imalat verimliliğinin üst seviyelere çıkarılmasını mümkün kılmakta; aynı zamanda sürdürülebilir üretim yaklaşımlarını destekleyerek çevresel etkilerin azaltılmasına katkı sağlamaktadır.

Tasarım ve imalat süreçleri arasındaki uyum, ürünlerin teknik, ekonomik ve çevresel gerekliliklere uygun şekilde geliştirilmesinde temel bir unsurdur. Bu süreçlerin etkili biçimde entegre edilmesi, yalnızca yüksek kaliteli ürünlerin üretimini değil, aynı zamanda bu ürünlerin rekabet gücünün artırılmasını da mümkün kılmaktadır. Bu nedenle, tasarım ve imalat süreçlerinin sürekli geliştirilmesi ve yenilikçi yaklaşımlarla desteklenmesi, modern mühendislik uygulamalarının temel hedefleri arasında yer almaktadır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Shigley ve Mischke (2001), yataklamalı rulmanların tasarımı ve performans analizine yönelik kapsamlı incelemelerinde, özellikle dişli mekanizmalarının verimli şekilde çalışabilmesi için rulman tasarımının kritik önem taşıdığını vurgulamışlardır. Yataklama elemanlarının doğru seçimi, malzeme özellikleri, yük taşıma kapasiteleri ve ömür hesaplamaları, rulmanların performansını doğrudan etkileyen temel faktörlerdir. Çeşitli rulman türlerinin (bilyalı, makaralı vb.) farklı uygulamalara göre özelleştirildiğini belirten araştırmacılar, özellikle bilyalı rulmanlar üzerinde yoğunlaşarak yük taşıma kapasitesi hesaplamaları, rulman çalışma ömrünün tahmini ve yataklama elemanlarıyla etkileşimleri ayrıntılı şekilde incelemişlerdir. Ayrıca, rulmanların statik ve dinamik yükler altındaki davranışlarına yönelik hesaplama yöntemleri ile yüksek hızda çalışan dişli sistemlerinde titreşim ve gürültünün nasıl azaltılabileceğine dair önemli değerlendirmeler sunmuşlardır. Malzeme seçimi konusuna da değinen Shigley ve Mischke, yorulma ve aşınma dayanımının rulman ömrü üzerinde belirleyici olduğunu ifade etmişlerdir. Bu kapsamda, rulmanların doğru tasarımı ve uygun malzeme seçimi, dişli mekanizmalarının verimliliğini artırarak daha dayanıklı ve düşük bakım gerektiren sistemlerin elde edilmesini sağlamaktadır.

Döner tabla dişli sistemleri, yüksek moment iletimi ve hassasiyet gerektiren mekanizmalarda öne çıkan tasarım elemanlarıdır. Bu sistemlerde malzeme seçimi, diş profili tasarımı, yüzey sertleştirme yöntemleri ve montaj toleransları gibi unsurlar büyük önem taşımaktadır. Ayrıca çalışma koşulları ve mekanizmanın ömrünü uzatmaya yönelik tasarım kriterlerinin dikkate alınması gerekmektedir. Barlow ve Shedd (Barlow ve Shedd, 2017), malzeme seçiminin sistemin dayanıklılığı ve verimliliği üzerinde doğrudan etkili olduğunu vurgulayarak, doğru malzemenin belirlenmesinin tasarım sürecinin kritik bir adımı olduğunu ifade etmişlerdir. Özellikle döner tabla gibi sürekli dönme hareketine maruz kalan dişlilerde, malzemenin yorgunluk, aşınma ve darbe dayanımlarının yüksek olması gerekmektedir. Malzeme seçiminde sertlik, dayanıklılık, elastisite, darbe direnci ve yorulma dayanımı gibi özellikler dikkate alınmalıdır. Malzemelerin işlenebilirliği ve imalat maliyetleri de tasarım sürecinde önemli rol oynar.

Groover (Groover, 2017), döner tabla tasarımında kullanılan malzemelerin uygulamaya göre optimize edilmesi gerektiğini belirtmiştir. 42CrMo4 çelik alaşımı, yüksek çekme ve darbe dayanımı ile ağır yük taşıyan dişlilerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu malzeme indüksiyonla yüzey sertleştirme ve nitrasyon gibi ısıl işlemlerle aşınma direnci artırılarak işlenebilmekte ve CNC tezgâhlarında yüksek hassasiyetle

üretilebilmektedir. Savunma sanayiindeki zırhlı araç döner tablaları, rüzgâr türbinleri ve ağır yük vinç sistemleri, bu alaşımın sık tercih edildiği uygulamalardandır. Ancak yüksek özkütlesi, çelik malzemelerin taşınabilirlik ve enerji verimliliği gerektiren projelerde kullanımını sınırlandırmaktadır. Bu nedenle alüminyum alaşımları, özellikle yüksek hız ve hafiflik gerektiren mekanizmalarda avantaj sağlamaktadır. 7022 alaşımı, korozyon direnci ile dış ortam uygulamalarında; 7075 alaşımı ise yüksek mukavemeti ve düşük ağırlığı sayesinde savunma, havacılık ve otomotiv sektörlerinde yaygın kullanım alanı bulmaktadır. Alüminyum dişliler döküm veya dövme yöntemleriyle üretilip frezeleme işlemleri ile son şekillerine getirilmekte, anodizasyon gibi yüzey işlemleri ile sertlik ve aşınma direnci artırılmaktadır. Örneğin, ağır yük taşıyan vinç döner tablalarında 42CrMo4 çeliği tercih edilirken, robotik sistemlerde hafifliği sayesinde 7075 alüminyum alaşımı kullanılmaktadır.

Ulrich ve Eppinger (Ulrich ve Eppinger, 2015), başarılı bir tasarımın fonksiyonellik ve estetiğin dengeli bir birleşimini gerektirdiğini, kullanıcı geri bildirimlerinin ise ürünün kullanım kolaylığı ve memnuniyetini artırdığını vurgulamıştır. Tasarım süreci; gereksinimlerin belirlenmesi, kavramsal tasarım, detaylı tasarım ve prototip oluşturma aşamalarından oluşmakta olup, her aşamada mühendislik ve ergonomi unsurlarının bir arada değerlendirilmesi gerekmektedir.

Bu noktada CAD (Computer-Aided Design) yazılımları, tasarım sürecinin vazgeçilmez araçları hâline gelmiştir. CAD, bileşenlerin 2D ve 3D modellerinin oluşturulmasına olanak sağlayarak, karmaşık geometrilerin hızlı ve hatasız oluşturulmasını mümkün kılar. Esanakula ve Gondi (Esanakula ve Gondi, 2023), bilgisayar destekli tasarımın (CAD) gemi inşası, havacılık, mimari ve otomotiv gibi birçok endüstride kritik bir rol oynadığını belirterek, geleneksel CAD modelleme süreçlerinin yüksek düzeyde uzmanlık gerektirmesi ve zaman alıcı olması nedeniyle tasarım verimliliğini sınırladığını vurgulamıştır. Bu sınırlamaların aşılması amacıyla geliştirilen parametrik modelleme yöntemleri, tasarım parametrelerine bağlı otomatik model oluşturmaya mümkün kılarak özellikle tekrarlayan ve hesaplama yoğun tasarımlarda büyük bir hız kazandırmaktadır. Çalışmada, SolidWorks tabanlı bilgi tabanlı bir sistem (KBS) kullanılarak geliştirilen VBA tabanlı otomasyon aracının, kullanıcı arayüzü (GUI) üzerinden alınan modül, diş sayısı ve basınç açısı gibi temel parametreleri işleyip gerekli matematiksel hesaplamaları gerçekleştirdikten sonra dişli modelini saniyeler içinde oluşturabildiği belirtilmiştir. Bu otomasyon süreci, manuel tasarım yöntemleriyle 150–200 saat sürebilen bir işlemi yalnızca 15 saniyeye indirerek parametrik modelleme ve makro tabanlı CAD otomasyonunun tasarım verimliliğini dramatik biçimde artırdığını göstermektedir. Ayrıca parametrik ilişkilerin tanımlanması, ta-

sarım değişikliklerinin hızlı ve hatasız şekilde uygulanmasını sağlarken; makroların kullanımı modellemenin tekrarlanabilirliğini artırmakta ve kullanıcı kaynaklı hataları minimuma indirmektedir. Bu özellikler, otomatik CAD modelleme sistemlerinin hem doğruluğu hem de mühendislik tasarım süreçlerinin güvenilirliğini önemli ölçüde artırdığını ortaya koymaktadır.

Fetvacı ve İmrak (Fetvacı ve İmrak, 2004), dişli çarklarının bilgisayar destekli tasarım (BDT) süreçlerinde karşılaşılan zaman kaybı ve hesaplama zorluklarına çözüm olarak geliştirdikleri yazılımın, mühendislik tasarımında önemli bir yenilik sunduğunu belirtmiştir. Geleneksel CAD tekniklerinde dişli çarklarının tasarımı, manuel hesaplamalar, karmaşık geometrik işlemler ve yüksek uzmanlık gerektirdiğinden oldukça zaman alıcıdır. Bu doğrultuda araştırmacılar, Visual BASIC ve AutoLISP kullanarak AutoCAD ortamında çalışan parametrik bir otomasyon aracı geliştirmiştir. Sistem, modül, diş sayısı ve basınç açısı gibi temel geometrik parametreleri kullanıcı arayüzü üzerinden toplayarak, bu verilere dayalı 2D veya 3D dişli modellerini otomatik olarak oluşturmaktadır. Parametrik modelleme tekniklerinin kullanılması, girilen parametreler arasındaki ilişkilerin tanımlanmasını sağlayarak tasarım değişikliklerinin anında güncellenmesine olanak tanımakta ve farklı dişli konfigürasyonlarının saniyeler içinde oluşturulmasına imkân vermektedir. Manuel yöntemlerle saatler sürebilen dişli tasarımının otomasyon aracıyla saniyelere inmesi, tasarım hızını ve mühendislik verimliliğini önemli ölçüde artırmıştır. Ayrıca sistemde kullanılan makrolar, CAD modelleme sürecinin tekrarlanabilirliğini artırarak kullanıcı hatalarını minimize etmekte; parametrik hesaplamalar ise geometrik doğruluğu güvence altına almaktadır. Çalışma, dişli tasarımında kritik olan modül, diş sayısı, basınç açısı, profil tipi, malzeme seçimi ve yüzey işleme gibi parametrelerin CAD yazılımlarıyla hassas biçimde modellenmesinin, hem performans hem de dayanıklılık açısından tasarımı optimize ettiğini vurgulamaktadır. Özellikle involüt ve asimetrik diş profillerinin farklı yük koşullarına uygun şekilde modellenebilmesi, CAD tabanlı sistemlerin esnekliğini artırmaktadır. Ek olarak, döner tabla uygulamalarında kullanılan tek ve çift sıralı dört nokta temaslı bilyalı yataklar gibi bileşenlerin seçiminde CAD ortamının sağladığı hassas analiz araçları, tasarım sürecinin doğruluğunu ve güvenilirliğini desteklemektedir. Sonuç olarak Fetvacı ve İmrak'ın geliştirdiği bu CAD otomasyon sistemi, tasarım süresini kısaltarak mühendislerin daha karmaşık problemlere odaklanmasını sağlamakta, doğruluğu artırmakta ve endüstriyel uygulamalarda yüksek verimlilik sunarak parametrik CAD otomasyonunun potansiyelini açık bir biçimde ortaya koymaktadır. Döner tabla tasarımında yataklama seçimi de kritik bir rol oynamakta ve imalat sürecini şekillendirmektedir. Günümüzde kullanılan döner tabla

yataklarına yönelik araştırmalar daha çok, tek sıralı veya çift sıralı dört noktalı temaslı bilyalı yataklar üzerinde yoğunlaşmaktadır.

Gao ve arkadaşları (Gao ve ark., 2010), tek sıralı dört nokta temaslı bilyalı döner tabla yataklarının performansını değerlendirmek amacıyla sistemin davranışını temsil eden doğrusal olmayan yük dağılımı denklemlerini geliştirmiştir. Çalışmada, bilya çapı, bilya sayısı ve yarı ızgara açıları gibi temel geometrik ve yapısal parametrelerin maksimum bilya yükü üzerindeki etkileri analiz edilmiş; bu parametrelerin yatak ömründe belirleyici rol oynadığı ortaya konulmuştur. Araştırma sonuçları, özellikle yük dağılımının doğru modellenmesinin, döner tabla uygulamalarında yatak dayanıklılığını ve çalışma güvenilirliğini artırmak için kritik önem taşıdığını göstermektedir.

Chen ve arkadaşları (Chen ve ark., 2013), çift sıralı dört nokta temaslı bilyalı yataklar için geliştirdikleri mekanik model aracılığıyla geometrik parametrelerin yatak taşıma kapasitesi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir.

Benzer şekilde, Potočnik ve arkadaşları (Potočnik ve ark., 2010), bu yatakların iç geometrik ilişkilerini vektör tabanlı bir yaklaşımla tanımlamış ve yatak dengelemelerini kurarak maksimum bilya yükü ve yorgunluk ömrünü hesaplamışlardır. Her iki çalışma da, çift sıralı dört nokta temaslı bilyalı yatak tasarımında geometrik parametrelerin performans ve dayanıklılık üzerindeki kritik rolünü ortaya koymaktadır.

Glodež ve arkadaşları (Glodež ve ark., 2012), çift sıralı dört nokta temaslı bilyalı yataklar için vektörel bir statik denge modeli geliştirmiş ve yatak yorgunluk ömrünü stres-yaşam ve deformasyon-yaşam yaklaşımları ile hesaplamışlardır. Çift sıralı konik makaralı döner yataklar ise sıfır kayma kavramına dayalı tasarımı sayesinde uzun süreli çalışmalarda aşınmayı minimize etmektedir; ancak bu yatakların mekanik hesaplamalarına yönelik araştırmalar sınırlıdır. Geleneksel döner yatak tasarımında, yatak elemanlarının çevre boyunca izlediği açılar, yatak merkezinde kurulan kutupsal koordinat sistemi üzerinden belirlenmekte ve güvenlik faktörü ile yorgunluk ömrü gibi taşıma kapasitesini etkileyen parametreler analiz edilmektedir. İmalat süreci, teorik tasarım parametrelerinin gerçek dünyada uygulanabilirliğini test ederek ürün kalitesini ve tasarım verimliliğini doğrudan etkilemektedir. Bu kapsamda, döner tabla dişlileri çelik veya alüminyum alaşımlarından; CNC işleme, döküm, dövme, frezeleme, taşlama ve ısıt işlemler gibi yöntemlerle üretilmekte, malzeme ve yüzey kaplama seçimleri (ör. anodizasyon) sistemin dayanıklılığı ve aşınma direncini artırmaktadır. Doğru imalat tekniklerinin uygulanma-

şı, hem geometrik hassasiyetin sağlanmasını hem de uzun ömürlü ve yüksek performanslı dişli sistemlerinin elde edilmesini garanti etmektedir.

Ayyıldız ve arkadaşları (Ayyıldız ve ark., 2013) bilgisayar destekli tasarım ortamlarında parametrik modelleme yönteminin dişli çark tasarımlarındaki etkinliğini kapsamlı biçimde incelemiştir. Çalışmalarında, modül, diş sayısı, basınç açısı ve profil kaydırma gibi temel geometrik değişkenlerin parametrik olarak tanımlanması sayesinde tasarım sürecinin önemli ölçüde hızlandığını ve hata oranlarının azaldığını göstermişlerdir. Farklı CAD yazılımlarında oluşturulan parametrik modellerin karşılaştırmalı analizi, bu yaklaşımın tasarım esnekliği ve revizyon kolaylığı açısından klasik modelleme yöntemlerine göre belirgin üstünlük sunduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca parametrik dişli modellerinin üretim öncesi doğrulama, montaj uyumluluk analizi ve geometrik hassasiyet değerlendirmelerinde mühendislik süreçlerini optimize ettiği belirtilmiştir. Bu yönleriyle çalışma, modern dişli çark tasarımında parametrik CAD tekniklerinin hem verimlilik hem de kalite açısından kritik bir araç olduğunu vurgulayarak literatürde önemli bir referans noktası oluşturmaktadır.

Yeh ve arkadaşları (Yeh ve ark., 2001), yüksek yük taşıma kapasitesine sahip dişliler için yeni bir diş profili tasarımı geliştirmiştir. Çalışmada, diş geometrisinin yük dağılımı ve temas gerilmesi üzerindeki etkileri detaylı olarak analiz edilmiş, optimize edilmiş diş profilleri sayesinde dişlilerin yük taşıma kapasitesinin artırılabilirliği gösterilmiştir. Bu yaklaşım, özellikle ağır yük uygulamalarında dişli sistemlerinin performansını ve dayanıklılığını artırmaya yöneliktir ve CAD tabanlı parametrik tasarım teknikleriyle birlikte kullanıldığında, yüksek doğruluk ve hızlı tasarım süreçleri sağlayabilmektedir.

Li ve arkadaşları (Li ve ark., 2011), helisel dişlilerde asimetric involüt diş profillerinin tasarımı ve dişli eşleşme (meshing) performansını incelemiştir. Çalışma, asimetric diş profillerinin yük dağılımını optimize ederek temas gerilmesini azalttığını ve dişli ömrünü artırdığını göstermektedir. Bu yaklaşım, özellikle yüksek yük taşıma kapasitesine sahip dişli sistemlerinde geleneksel simetric diş profillerine kıyasla önemli avantajlar sunmaktadır. Ayrıca, parametrik CAD tabanlı tasarım teknikleri ile entegre edildiğinde, tasarım sürecinin doğruluğunu ve verimliliğini önemli ölçüde artırmaktadır.

Kapelevich (Kapelevich, 2000) asimetric involüt diş profiline sahip düz dişlilerin geometrisi ve tasarımını incelemiş, bu profillerin yük dağılımını iyileştirerek dişli temas gerilmesini azaltabileceğini göstermiştir. Çalışma, özellikle yüksek yük taşıma kapasiteli sistemlerde asimetric

profillerin performans avantajlarını vurgulamakta ve parametrik CAD tabanlı modelleme ile birleştirildiğinde, tasarım doğruluğu ve verimliliğinin önemli ölçüde artırılabilceğini ortaya koymaktadır.

Dassanayake ve Tsutsumi (Dassanayake ve Tsutsumi, 2009) çalışmasında, takım tezgâhlarında kullanılan yüksek performanslı döner tablaların tasarım ve performans karakteristikleri ele alınmıştır. Araştırma, modern imalat süreçlerinde hassasiyetin artmasıyla birlikte döner tablaların konumlama doğruluğu, rijitlik, dinamik tepki ve yük taşıma kapasitesi gibi temel özelliklerinin kritik hâle geldiğini vurgular. Makale kapsamında geliştirilen döner tabla sistemi şu temel özellikleriyle öne çıktığı görülmektedir. Yüksek hassasiyetli konumlama: Geliştirilen yapı, özellikle CNC tezgâhlarda çok eksenli işleme uygulamaları için gerekli olan mikron seviyesinde konumlama doğruluğu sunmamaktadır. Gelişmiş kontrol sistemi: Motor sürücüsü ve kontrol algoritmalarında yapılan iyileştirmelerle titreşim azaltılmış ve dinamik cevap hızlandırılmıştır. Optimize edilmiş mekanik tasarım: Tabla yapısında kullanılan rulman düzenlemeleri, tahrik mekanizması ve gövde yapısı yüksek rijitlik ve dayanım sağlayacak şekilde yeniden tasarlanmıştır. Isıl etkilerin azaltılması: İşleme sırasında oluşan ısıl genleşmelerin konumlama doğruluğunu etkilememesi için kompanzasyon yaklaşımı uygulanmıştır. Çalışmada, geliştirilen döner tablanın mevcut endüstriyel çözümlerle karşılaştırıldığında daha iyi konumlama hassasiyeti, yüksek tork aktarımı ve kararlı çalışma sunduğu deneysel verilerle gösterilmiştir.

Wang ve Yang (Wang ve Yang, 2019) yapmış olduğu çalışmada, bileşik gezegen dişli setine sahip döner aktüatörlerde ortaya çıkan dişli boşluğu miktarı analiz edilmiştir. Araştırmada dişli boşluğunu etkileyen üç temel unsur ele alınmıştır: üretim kaynaklı hatalar, montaj sürecinden doğan hatalar ve yapısal deformasyonlar. Bu hata türlerinin rastlantısal özellikleri nedeniyle, yazarlar olasılıksal bir analiz modeli geliştirerek dişli boşluğu değerlerinin gerçek koşullara daha yakın bir şekilde belirlenmesine imkân sağlamıştır. Modelin ortaya koyduğu sonuçlar, söz konusu üç hata kaynağının da toplam dişli boşluğu üzerinde kayda değer bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Buna göre dişli boşluğu miktarı yalnızca tek bir hatadan değil, hata bileşimlerinin ortak etkisinden önemli ölçüde etkilenmektedir. Bu kapsamlı yaklaşım, hem dişli mekanizması tasarımında hem de döner aktüatörlerin üretim kalite kontrolünde dikkate alınması gereken önemli mühendislik çıktıları sağlamışlardır.

Santos ve de Oliveira (2020), sonlu elemanlar yönteminin (FEM) mühendislik uygulamalarındaki kullanım alanlarını kapsamlı bir şekilde ele alarak yöntemin yapısal analizden ısıl problemlere, akışkanlar mekaniğinden malzeme davranışlarının modellenmesine kadar geniş bir

mühendislik yelpazesinde kritik bir araç haline geldiğini ortaya koymuştur. Çalışmada, FEM'in özellikle karmaşık geometrilere sahip parçaların davranışlarını yüksek doğrulukla simüle etme kapasitesi sayesinde tasarım doğrulama süreçlerinde önemli avantajlar sağladığı vurgulanmıştır. Ayrıca modern mühendislik yazılımlarının gelişimiyle birlikte FEM analizlerinin daha hızlı, kullanıcı dostu ve güvenilir hale geldiği; bu gelişmenin tasarım optimizasyonu, maliyet azaltma ve prototipleme süreçlerinde mühendislik ekiplerine belirgin katkılar sunduğu belirtilmiştir. Bu yönüyle çalışma, FEM'in hem akademik araştırmalar hem de endüstriyel tasarım süreçleri için vazgeçilmez bir analiz yöntemi haline geldiğini göstererek literatürde önemli bir referans niteliği taşımaktadır.

Dişli tasarım sürecinde modül, diş sayısı, basınç açısı, profil tipi, malzeme özellikleri, yüzey sertleştirme gibi parametrelerin doğru belirlenmesi, sistem performansını doğrudan etkiler. CAD yazılımları, bu parametrelerin mühendislik hesaplamalarına uygun şekilde işlenmesini sağlayarak hem tasarımın doğruluğunu hem de üretim verimliliğini artırır. Yüzey işleme ve kaplama teknikleri ise dişli ömrünü uzatmak ve aşınma direncini artırmak konusunda kritik rol oynar.

Döner tabla tasarımında yataklama seçimi de en az dişli tasarımı kadar önemli bir konudur ve hem performansı hem de imalat süreçlerini doğrudan etkilemektedir. Günümüzde kullanılan döner tabla yatakları üzerine yapılan araştırmalar, tek sıralı ya da çift sıralı dört noktali temaslı bilyalı yatakların performansını, yük dağılımlarını, sürtünme davranışlarını ve ömür hesaplamalarını detaylı olarak incelemektedir. Yatak tipinin doğru belirlenmesi, döner tablanın hassasiyetini, yük taşıma kapasitesini, dönme verimliliğini ve sistem ömrünü artıran en kritik tasarım adımlarından biridir.

3. SONUÇLAR

Bu araştırma, döner tabla dişli sistemlerinin tasarım ve imalat süreçlerini kapsamlı bir çerçevede inceleyerek modern mühendislik tekniklerinin bu süreçlere sağladığı katkıları detaylı bir şekilde ortaya koymuştur. Literatürde yer alan güncel çalışmalar ışığında, dişli mekanizmalarının performansını artırmaya yönelik çok sayıda yöntem değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, diş tipi, diş sayısı, modül, basınç açısı, profil kaydırma katsayıları ve malzeme seçimi gibi temel tasarım parametrelerinin sistem davranışı üzerindeki etkisi ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Çalışmada, yüksek sertlik, iyi aşınma direnci, yorulma dayanımı ve uygun elastikiyet sınırlamasına sahip malzemelerin tercih edilmesinin, döner tabla dişlilerinin hem uzun ömürlü hem de yüksek performanslı çalışması açısından kritik bir role sahip olduğu özellikle vurgulanmıştır. Ayrıca, tasarım sü-

recinde kullanılan parametrik optimizasyon tekniklerinin, dişli geometrisinin titizlikle belirlenmesini sağlayarak daha dengeli yük dağılımı ve düşük titreşim üretimi gibi avantajlar sunduğu belirtilmiştir.

Modern imalat teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte CAD/CAM, bilgisayar destekli simülasyonlar, sonlu elemanlar analizleri ve dijital ikiz uygulamaları, dişli tasarım ve üretim süreçlerinde geleneksel yöntemlere kıyasla çok daha yüksek doğruluk ve kontrol sağlamaktadır. CAD tabanlı tasarım yaklaşımları, dişli geometrisinin erken aşamalarda optimize edilmesine olanak tanıırken, imalat öncesinde gerçekleştirilen sanal testler sayesinde olası hatalar önceden belirlenebilmekte ve prototip ihtiyacı azaltılabilmektedir. Bu durum hem maliyetleri düşürmekte hem de geliştirme sürecinin hızlanmasına katkı sağlamaktadır. Buna ek olarak, CNC işleme, hobbing, honing ve taşlama gibi yüksek hassasiyetli imalat yöntemleri, dişlilerin yüzey kalitesini, hassasiyetini ve tekrarlanabilirliğini artırarak daha verimli ve güvenilir sistemler elde edilmesine imkân tanımaktadır. Yüksek yüzey kalitesi ve dar toleranslı üretim, döner tabla sistemlerinde yaygın olarak karşılaşılan titreşim, ses ve aşınma problemlerinin azaltılmasında önemli bir rol oynamaktadır.

Dişli üretiminde kullanılan malzemelerin seçim süreci de performans üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Çelik, yüksek dayanım ve yorulma direnci gibi özellikleri nedeniyle ağır yük altında çalışan döner tabla sistemleri için ideal bir seçenek olarak öne çıkarken; alüminyum, hafifliği ve işlenebilirliği sayesinde düşük moment uygulamalarında avantaj sağlamaktadır. Bununla birlikte, yüksek yük ve tork gerektiren endüstriyel uygulamalarda, özellikle ısı işlem görmüş veya yüzeyi sertleştirilmiş çelik alaşımların kullanımı zorunluluk hâline gelmektedir. Malzeme seçimi yalnızca dayanıklılığı değil, sistemin toplam verimini, titreşim karakteristiğini, termal kararlılığını ve uzun vadeli bakım ihtiyacını da doğrudan etkilemektedir. Ayrıca, hobbing, frezeleme ve taşlama gibi uygun üretim tekniklerinin doğru seçilmesi ve uygulanması, yüksek hassasiyetli parçaların elde edilmesini sağlayarak kalite kontrol süreçlerinin daha etkin yürütülmesine olanak tanımaktadır. Bu sayede hem üretim sürecindeki hata oranları düşmekte hem de daha tutarlı performans sunan mekanizmalar geliştirilebilmektedir.

Döner tabla dişli sistemlerinin tasarım ve imalatında yüksek performans, güvenilirlik ve uzun servis ömrü elde edebilmek için tasarım parametreleri, malzeme özellikleri, üretim toleransları ve modern imalat tekniklerinin entegre bir şekilde ele alınması gerekmektedir. Bu çalışma, söz konusu sistemlerin performansını artırmaya yönelik bütüncül bir değerlendirme sunarak hem akademik hem de endüstriyel uygulamalar için değerli bir referans niteliği taşımaktadır. Gelecekte yapılacak araş-

tırmaların; farklı malzeme kombinasyonlarının deneysel ve simülasyon tabanlı karşılaştırılması, yeni nesil üretim teknolojilerinin (örneğin eklemeli imalat ve lazerle işleme) entegrasyonu, yapay zekâ destekli tasarım optimizasyonları ve dayanım odaklı geometrik iyileştirmeler ile döner tabla sistemlerinin verimlilik, maliyet etkinliği, titreşim kontrolü ve sürdürülebilirlik açısından daha da geliştirilebileceği öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- Ayyıldız, M., Çiçek, A., Kara, F. (2013) *Bilgisayar Destekli Tasarımda Parametrik Dişli Çark Uygulamaları*. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 25(3)
- Barlow, J. B., Shedd, E. A. (2017) *Mechanical Properties of Materials*. Springer.
- Boothroyd, G., Dewhurst, P., Knight, W.A. (2010) *Product Design for Manufacture and Assembly* (3rd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420089288>
- Dassanayake, K. M. M. and Tsutsumi, M. (2009) *High Performance Rotary Table for Machine Tool Applications*. Int. J. of Automation Technology 3:3
- Esanakula J.R, Gondi K.R. (2023) *Development of a CAD Modeling Automation Tool for Spur Gear Design in SolidWorks*. NanoWorld J 9(S4): S275-S280
- Fetvacı, M.C., İmrak, C.E. (2004) *Design of Visual Spur Gear Materials With Computer*. Journal of Engineering and Natural Sciences, 4:1-8.
- Gao XH, Huang XD, Wang H, Hong, R, Chen J (2010). *Effect of raceway geometry parameters on the carrying capability and the service life of a four-point-contact slewing bearing*. J Mech Sci Technol 24:2083–2089
- Groover, M. P. (2017) *Groover's principles of modern manufacturing : materials, processes, and systems* (Global edition, SI version; 6th edition). John Wiley & Sons, Inc.
- Glodez S, Potocnik R and Flaker J. (2012) *Computational model for calculation of static capacity and lifetime of large slewing bearing's raceway*. Mech Mach Theory 47:16–30
- Kapelevich, Alexander L. (2000) *Geometry and design of involute spur gears with asymmetric teeth*. Mechanism and Machine Theory 35:117-130. DOI: 10.1016/S0094-114X(99)00011-2
- Li, N., Li, W., Han, J., Liu, N. (2011) *Tooth Profile Design and Meshing Analysis on a Helical Gear with Asymmetric Involute Teeth*. Chinese Journal of Engineering. 33(7): 876-882. DOI: 10.13374/j.issn1001-053x.2011.07.020
- Potocnik P, Gonczb P, Flaker J, Glodež, S (2010) *Fatigue life of double row slewing ball bearing with irregular geometry*. Procedia Eng 2: 1877–1886.
- Shigley, J. E., Mischke, C. R. (2001) *Mechanical Engineering Design*. 6th ed., McGraw-Hill, New York
- Ulrich, K.T. and Eppinger, S.D. (2015) *Product Design and Development*. McGraw-Hill Education, New York, 1-448.
- Yeh, T, Yang, D. C. H., Tong, S. H. (2001) *Design of New Tooth Profile for High-Load Capacity Gears*. Mechanism and Machine Theory, 36;10:1105-1120. DOI: 10.1016/S0094-114X(01)00050-1
- Wang, Y., Yang, F. (2019) Backlash Analysis of Compound Planetary Gear Set in Rotary Actuators. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 470, 012022. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/470/1/012022>

Bölüm 6

BİYO BAZLI FAZ DEĞİŞİM MALZEMELERİ İLE TERMAL ENERJİ DEPOLAMA

Nergiz ÜLKER¹, Hüsamettin BULUT²

1 Harran Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Şanlıurfa, Türkiye nergizulker@harran.edu.tr, ORCID: 0000-0002-6079-4792

2 Harran Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Şanlıurfa, Türkiye hbulut@harran.edu.tr, ORCID: 0000-0001-7123-1648

1. Giriş

Son yıllarda ekonomi ve sanayideki hızlı gelişmeler, küresel enerji talebini ve tüketimini önemli ölçüde artırmıştır. Bu durum, fosil enerji kaynaklarının hızla tükenmesine ve sera gazı emisyonlarının istenmeyen seviyelere çıkmasına yol açmış ve temel bir küresel sorun haline gelmiştir. Nüfus artışı, sanayileşme ve yaşam standartlarının iyileşmesi ile birlikte önümüzdeki yıllarda toplam birincil enerji talebinin yaklaşık %25-30 oranında artacağı öngörülmektedir (Aftab vd., 2021; Nalla vd., 2025). Ancak bu enerji talebini karşılayacak potansiyeli olan güneş ve rüzgar enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının çoğu doğası gereği kesintili ve değişken bir yapıya sahiptir. Bu nedenle günlük ve mevsimsel döngülerde enerji arz ve talebini karşılayabilmek için etkili ve güvenilir yöntemlerden biri olarak enerji depolama teknolojilerinin geliştirilmesi önemli hale gelmiştir (Hong ve Xin-shi, 2000; Malode ve Shetti, 2025).

Enerji depolama teknolojileri arasında termal enerji depolama (TES), özellikle nihai kullanımının ısı enerjisi olduğu uygulamalarda öne çıkmaktadır. TES sistemleri, fazla termal enerjinin düşük talep dönemlerinde depolanmasını ve talebin arttığı zamanlarda depolanan bu enerjinin tekrar kullanılmasını sağlayarak, pik yüklerin azaltmaktadır. Böylece enerji tüketiminin yoğun olduğu saatlerden yoğun olmayan saatlere doğru kaydırılmasına olanak tanımaktadır (Alva vd., 2018; Costa ve Kenisarin, 2022). TES ısıtma ve soğutma uygulamalarının yanı sıra ulaşım, gıda, ilaç ve elektronik gibi alanlarda konut, ticari ve endüstriyel ölçeklerde yaygın biçimde kullanılmaktadır. Depolama mekanizmasına bağlı olarak TES, katı veya sıvı bir ortamın sıcaklığının artırılmasıyla enerjinin depolandığı duyulur ısı depolama (SHS), faz değişimi sırasında açığa çıkan gizli ısının kullanıldığı gizli ısı depolama (LHS) ve tersinir kimyasal reaksiyonların kullanıldığı termokimyasal depolama olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır (Tyagi vd., 2022).

Gizli ısı depolama sistemleri (LHTES), faz geçiş süreci boyunca nispeten yüksek enerji yoğunluğunu büyük ölçüde izotermal çalışma ile birleştirdikleri için kritik bir öneme sahiptir. Gizli ısıyı depolayan bu malzemeler faz değiştiren malzemeler (FDM) olarak adlandırılmaktadır (Benhorma vd., 2024). FDM'ler erime (şarj) ve katılaşma (deşarj) sırasında neredeyse sabit sıcaklıkta enerjiyi depolayıp geri verebilmektedir. Bu özellik özellikle dar sıcaklık aralıklarında termal konforun sağlanması veya belirli proses sıcaklıklarının korunması açısından önemli bir avantaj sunmaktadır (Prajapati ve Kandasubramanian, 2019). Su ve taş gibi düşük maliyetli malzemelerin kullanıldığı SHS sistemleriyle karşılaştırıldığında FDM'lerin kullanıldığı LHTES sistemleri, aynı hacimde birkaç kat daha fazla enerji depolayabilmektedir. FDM'li LHTES sistemler, bina

cepheleri, HVAC sistemleri, güneş enerjisi kolektörleri, fotovoltaiik panel-ler, koruyucu giysiler, elektronik cihazlar ve sıcaklığa duyarlı ambalajlara kadar birçok uygulamada kompakt ısı depolama çözümleri sunmaktadır (Rashid, Al-Obaidi, Dhaidan, vd., 2023). Uygulama alanına bağlı olarak FDM'ler genellikle çalışma sıcaklık aralıklarına göre seçilir. Soğutma ve soğuk zincir uygulamaları için $-20\text{ }^{\circ}\text{C} - 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığı, bina ısıtma, soğutma ve termal konfor uygulamaları için $5\text{ }^{\circ}\text{C} - 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığı (Düşük sıcaklık), elektronik soğutma/evsel sıcak su/güneş enerjisi sistemleri için $40\text{ }^{\circ}\text{C} - 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığı (Orta sıcaklık), endüstriyel atık ısı geri kazanımı, absorpsiyonlu soğutma ve güç üretimi gibi yüksek sıcaklık uygulamaları için $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin üzerindeki sıcaklıklar uygundur (Mehrizi vd., 2023; Sharma vd., 2024).

FDM'ler kimyasal yapılarına göre organik, inorganik ve ötektik olmak üzere üç gruba ayrılır. Organik FDM'ler; parafinler, yağ asitleri, esterler, glikoller ve alkoller gibi karbon bazlı malzemelerden oluşur (Sarı ve Kaygusuz, 2001). Genellikle yüksek erime entalpisi, iyi kimyasal kararlılık ve metallerle karşı düşük korozyon etkisi gibi avantajlara sahiptir. Bu özellikleri nedeniyle TES uygulamalarında en yaygın kullanılan FDM grubunu oluşturmaktadır. Bununla birlikte düşük termal iletkenlikleri, yanıcılıkları, bazı türlerde uçuculuk ve belirli polimer kaplama malzemeleriyle olası uyumsuzluk gibi dezavantajları da bulunmaktadır (Mehrizi vd., 2023).

Inorganik FDM'ler esas olarak tuz hidratları, erimiş tuzlar ve metal alaşımlarından oluşur. Benzer çalışma sıcaklıklarında organik FDM'lere göre çoğu durumda daha yüksek termal iletkenlik ve daha büyük erime entalpisi sağlayabilir. Ayrıca kütle bazında daha düşük maliyet sunabilmektedir. Ancak aşırı soğuma, katılaşma sırasında faz ayrışması ve metal yüzeylerde korozyon gibi sorunlar nedeniyle bu malzemelerin uzun dönemli termal ve kimyasal kararlılıkları sınırlıdır (Rashid, Al-Obaidi, Dhaidan, vd., 2023; Benhorma vd., 2024).

İki veya daha fazla organik ya da inorganik bileşenin (organik-organik, inorganik-inorganik veya organik-inorganik) belirli oranlarda bir araya getirilmesiyle elde edilen ötektik FDM'ler ise tek bir sıcaklıkta uyumlu şekilde eriyip katılaşacak şekilde tasarlanmaktadır. Böylece dar sıcaklık aralıklarında etkin bir ısıl düzenleme sağlanırken depolama özellikleri uygulama ihtiyaçlarına göre ayarlanabilir. Ayrıca uygun formülasyonlarla bazı inorganik sistemlerde görülen faz ayrışması gibi sorunlar da azaltılabilmektedir (Ghani vd., 2021; P. Singh vd., 2021).

FDM'ler performansları ile birlikte sürdürülebilirlik boyutlarıyla da değerlendirilmesi gerekmektedir. Ticari ölçekte kullanılan parafinler ve diğer petrol türevli FDM'lerin büyük bölümü fosil kaynaklara dayandı-

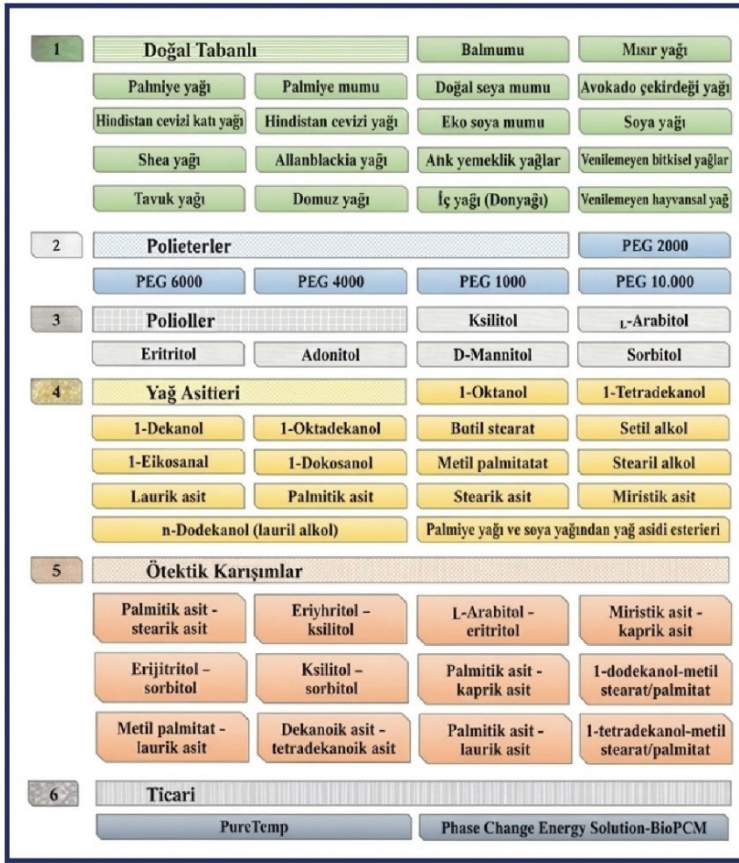
ğından, üretim ve kullanım süreçleri hem kaynakların tükenmesine hem de sera gazı emisyonlarının artmasına neden olmaktadır. Bu bağlamda, biyo bazlı FDM'ler yenilenebilir kaynaklara dayanmaları ve çevresel etkilerinin düşük olması nedeniyle çevreyle uyumlu alternatifler olarak öne çıkmaktadır. Biyo bazlı FDM'ler tarım, gıda ve biyokütle endüstrilerinin yan ürünleri ile atıklardan elde edilen yağ asitleri, bitkisel yağlar, doğal mumlar ve benzeri organik bileşiklere dayanmaktadır (Rashid, Al-Obaidi, Dhaidan, vd., 2023; Rashid, Al-Obaidi, Dulaimi, vd., 2023).

Bu malzemeler, düşük ve orta sıcaklık TES uygulamaları için uygun erime sıcaklık aralıklarında geleneksel organik FDM'lere benzer gizli ısı değerleri sunmaktadır. Ayrıca yaşam döngüsü değerlendirmelerine göre petrol kökenli eşdeğerlerine kıyasla belirgin derecede daha düşük karbon ayak izi sergileyebilmektedir (R. Singh vd., 2018; Nalla vd., 2025). Bununla birlikte biyo bazlı FDM'ler organik FDM'lere de özgü olan bazı sınırlılıklara sahiptir. Özellikle düşük termal iletkenlik, sıvı fazda sızıntı riski ve uzun süreli döngülerde olası bozunma bu sınırlamaların başında gelmektedir. Bu nedenle güncel çalışmalar, ötektik tasarımlar, mikro ve makro kapsülleme, polimer veya gözenekli matrislere gömme ve yüksek iletkenlikli nano katkıların kullanımı yoluyla biyo bazlı kompozit FDM'lerin geliştirilmesine odaklanmaktadır. Söz konusu stratejilerle ısı transferinin iyileştirilmesi, faz ayrışması riskinin azaltılması, sızıntının önlenmesi ve kullanım ömrünün uzatılması amaçlanmaktadır (Hekimoğlu vd., 2021; Rashid, Al-Obaidi, Dhaidan, vd., 2023).

Bu bölüm, biyo bazlı FDM'lerin termofiziksel özelliklerine, performanslarını iyileştirmeye yönelik optimizasyon stratejilerine ve konut, ticari ile endüstriyel sistemlerdeki uygulama alanlarına ilişkin güncel ve bütüncül bir genel bakış sunmayı amaçlamaktadır. Ayrıca biyo bazlı FDM'lerin başlıca sınırlılıkları ile gelecekteki çalışmalara yön verecek literatürde öne çıkan araştırma ihtiyaçları özetlenmiştir.

2. Biyo bazlı Faz Değiştiren Malzemeler

Biyo bazlı FDM'ler bitkisel yağlar, hayvansal yağlar, tarımsal atıklar, doğal mumlar ve ilgili biyopolimerler gibi yenilenebilir ve çevreye zararsız kaynaklardan elde edilen, ağırlıklı olarak organik, parafinik olmayan FDM'lerden oluşan geniş bir malzeme grubunu oluşturur (Kahwaji ve White, 2019; Benhorma vd., 2024). Şekil 1'de biyo bazlı FDM'lerin sınıflandırılması gösterilmiştir. Burada ticari FDM grubu için PureTemp ve Phase Change Energy Solution-Bio PCM firmaları örnek olarak verilmiştir.



Şekil 1. Biyo bazlı FDM türleri (Junaid vd., 2022) to promote recycling, pure green buildings campaign and natural resources conservation, biobased PCMs (bPCMs)

Kimyasal açıdan bakıldığında, biyo bazlı FDM'ler yağ asitleri, esterler, alkol ve glikoller içerir. Bu FDM'ler geniş bir erime sıcaklığı aralığı, nispeten yüksek gizli ısı kapasitesi, iyi kimyasal ve termal kararlılık, geri dönüştürülebilirlik ve çoğu durumda tekrarlanan erime-donma döngüsünü kolaylaştıran kendiliğinden çekirdeklenme davranışı gibi avantajlar sunar. Bunlar arasında, yağ asitleri genellikle en çekici alt grup olarak kabul edilmektedir (Malode ve Shetti, 2025; Nalla vd., 2025). Tablo 1'de en yaygın kullanılan yağ asitlerinin termal özellikleri verilmiştir.

Tablo 1. *En çok kullanılan yağ asitlerinin termal özellikleri (Prajapati ve Kandasubramanian, 2019)*

Biyo bazlı FDM	Kimyasal Yapısı	Erime Sıcaklığı (°C)	Erime Entalpisi (J/g)	Referans
Kaprilik Asit	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_6\text{COOH}$	16,1	144,2	(Inoue vd., 2004)
Kaprik Asit	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_8\text{COOH}$	31,6	163	(Feldman vd., 1989)
Laurik Asit	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{COOH}$	44,2	183	(Feldman vd., 1989)
Miristik Asit	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12}\text{COOH}$	51,5	204	(Sarı ve Kaygusuz, 2001)
Palmitik Asit	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{COOH}$	62,9	212	(Feldman vd., 1989)
Stearik Asit	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$	69,6	222	(Feldman vd., 1989)

Yağ asitleri uzun alifatik zincirlere sahip doymuş veya doymamış karboksilik asitlerdir. Termofiziksel özellikleri zincir uzunluğu ve doymamışlık derecesine bağlı olarak ayarlanabilir. Doymuş yağ asitleri, genellikle minimum aşırı soğuma ile kristalleştikleri için uygulamalarda özellikle tercih edilir. Tipik adaylar arasında kaprilik, kaprik, laurik, miristik, palmitik ve stearik asitler bulunur. Bu asitlerin termofiziksel özellikleri, ticari parafin bazlı FDM'lerin özellikleri ile benzerlik göstermektedir. Aynı zamanda, üstün çevresel performans sunmakta ve işlenmiş formlarda (örneğin esterler) tuz hidratlarına göre daha iyi döngü kararlılığı sağlarlar (Duquesne vd., 2021; Zadshir vd., 2024).

Biyo bazlı esterler de benzer şekilde yüksek erime entalpisi, aşındırıcı olmama, toksik olmama, ihmal edilebilir aşırı soğuma ve iyi termal/kimyasal kararlılık gibi avantajlar sağlamaktadır. Ancak mevcut yüksek maliyetleri ve sınırlı ticari bulunabilirlikleri hala önemli kısıtlamalar olmaya devam etmektedir (Ravotti vd., 2019). Genel olarak, biyo bazlı FDM'ler sürdürülebilirlik, biyobozunurluk, toksik olmama ve rekabetçi depolama kapasitesi gibi güçlü özellikleri bir araya getirir. Fakat parafinlere benzer şekilde genellikle düşük termal iletkenlik gösterirler. Bu nedenle son zamanlarda yapılan çalışmalar, biyo bazlı hammaddelerin çevresel faydala-

rını koruyarak ısı transferi sınırlamalarını aşmak için yüksek iletkenlikli nanopartiküller ve/veya gözenekli taşıyıcı matrisler kullanılarak üretilen nano geliştirilmiş ve kompozit biyo bazlı FDM gruplarına odaklanmaktadır (Zhang vd., 2018; Junaid vd., 2022).

Bir FDM seçilirken, uygulamaya bağlı olarak kimyasal kararlılık, faz değişimi esnasında hacim değişiminin sınırlı olması ve katılaşma sırasında düşük aşırı soğuma eğilimi gibi özellikler büyük önem taşımaktadır. Bununla birlikte, nihai değerlendirmede belirleyici olan temel ölçütler erime sıcaklığı ve entalpi gibi termodinamik özelliklerdir (Sharma vd., 2024). Şekil 2’de FDM’ler için öne çıkan başlıca seçim kriterleri özetlenmiştir.



Şekil 2. FDM'lerin seçim kriterleri (Sharma vd., 2024)

Ao ve ark. (Ao vd., 2023) biyo bazlı organik FDM grubundan olan stearik asitin (SA) düşük termal iletkenlik ve sızıntı sorunlarının üstesinden gelmek için altıgen bor nitrür (BN) ve genişletilmiş grafit (EG) ile güçlendirilmiş şekil stabilitesine sahip olan kompozit bir FDM'yi araştırmıştır. SA, ağırlıkça farklı oranlarında hazırlanan gözenekli bir BN/EG ağına entegre edilmiştir. Elde edilen kompozitlerin SEM, FTIR, XRD, DSC, TGA, termal iletkenlik, termal difüzyon, sızıntı testleri ve döngü testleri ile analizleri yapılmıştır. Optimum özellikler SA/BN/EG-12 numunesinde elde edilmiştir. SA'nın kristal yapısının korunduğu, aşırı soğumanın önemli ölçüde azaltıldığı ve 154 J/g ile yüksek bir gizli ısı değerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca termal iletkenlik değeri saf SA'ya göre 19 kat artış göstererek yaklaşık 6,3 W/mK değerine ulaşmıştır. Öte yandan

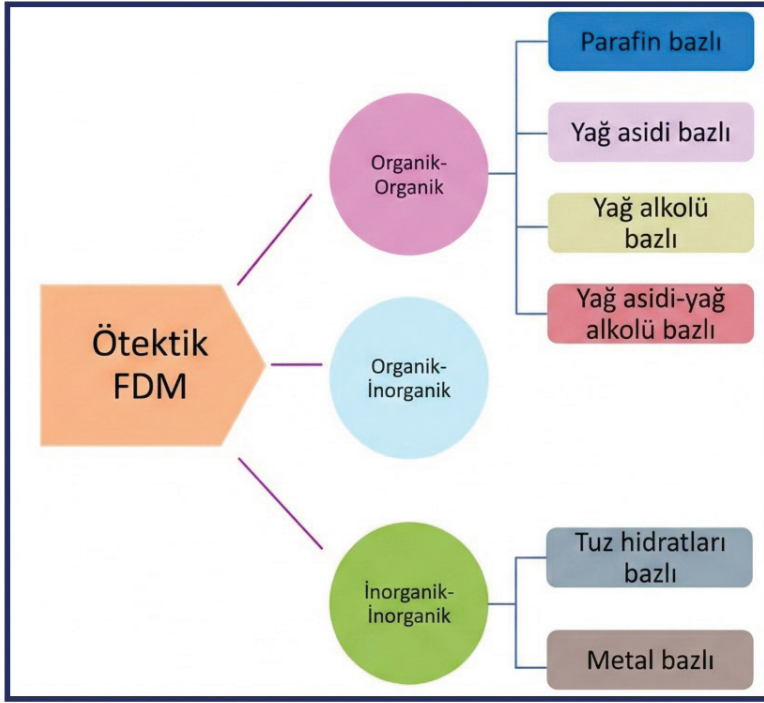
numunede ihmal edilebilir sızıntı, iyi boyutsal kararlılık ve tekrarlanan erime/donma döngülerinden sonra faz değişim sıcaklığı ve entalpisinde minimum değişikliklerle mükemmel termal döngü güvenilirliği sergilediği ortaya konmuştur. Genel olarak, sonuçlar SA/BN/EG numunesinin düşük sıcaklıklı termal enerji depolama ve bina ile ilgili ısıtma uygulamaları için uygun bir FDM adayı olduğu tespit edilmiştir.

Mert ve ark. (Mert vd., 2022), TES için yeni, düşük maliyetli, biyo bazlı, şekil stabilitesine sahip kompozit FDM'ler geliştirmiştir. Hindistan cevizi yağı, FDM olarak kullanılarak fosforik asit aktivasyonu ve azot altında karbonizasyon yoluyla kiraz çekirdeklerinden üretilen aktif karbon içeren makro gözenekli doymamış polyester reçine köpüğüne sabitlenmiştir. Numuneler arasında, %5 ağırlık oranında aktif karbon içeren numune, yaklaşık 24 °C erime sıcaklığı ve 42,92 J/g erime entalpisi ile en iyi performansı göstermiştir. Bu biyo bazlı kompozit FDM'ler, termal düzenleme gerektiren akıllı tekstil uygulamaları için umut vadeden adaylar olarak önerilmiştir.

Majó ve ark. (Majó vd., 2021)deploy phase change materials (PCM, bina entegre TES sistemlerinde kullanılan FDM grubundan yağ asitlerinin termal bozunma davranışını araştırmıştır. Yağ asitlerinden kaprik ve miristik asit hızlandırılmış iki yaşlandırma sürecine tabi tutulmuştur. 60 °C'de 500 saate kadar sabit sıcaklık işlemi ve 15 ile 70 °C arasında 1000 döngüye kadar termal döngü uygulanmıştır. Daha sonra bu işlemler FT-IR, NMR, gaz kromatografisi, reoloji, TGA ve DSC analizleri ile karakterize edilmiştir. Sonuç olarak, yağ asitlerinde meydana gelen ince kimyasal ve termofiziksel bozulmaları belirlemek için birleşik bir analitik yaklaşım önerilmektedir. Kaprik asitin kullanım ömrü boyunca ölçülebilir performans kayıpları yaşayabileceğini, miristik asitin ise benzer koşullar altında daha iyi uzun vadeli stabilite sergilediğini vurgulanmaktadır.

3. Ötektik Biyobazlı FDM'ler

Ötektik FDM'ler, iki veya daha fazla FDM'nin uygun oranlarda birleştirilmesiyle elde edilir. Bu malzemeler genel olarak tek ve iyi tanımlanmış bir faz geçiş sıcaklığına sahip olurlar (Ghani vd., 2021). Bir araya getirilen FDM'lerin bileşim oranlarının ayarlanmasıyla erime sıcaklığı ve entalpi gibi temel termofiziksel özellikler belirli bir uygulamanın temel ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde uyarlanabilmektedir (Sun vd., 2023). Ötektik FDM'ler Şekil 3'te gösterildiği gibi, organik-organik, organik-inorganik ve inorganik-inorganik olmak üzere üç kategoride sınıflandırılmaktadır.



Şekil 3. Ötektik FDM'lerin Sınıflandırılması (Anand vd., 2025)

Organik-organik ötektik FDM'ler parafin, yağ asitleri, yağ alkolleri ve esterlerin birleşimi ile elde edilmektedir (Sun vd., 2023). Bu malzeme grubu kimyasal kararlılık, düşük aşırı soğuma eğilimi ve istenen termofiziksel özelliklerin bileşim oranları üzerinden daha kolay oluşturulabilmesi açısından düşük ve orta sıcaklıklı TES uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca organik ötektik FDM'ler çoğu zaman tek bileşenli muadillerine göre daha düşük erime sıcaklığına ve uygulamaya uygun optimum entalpi değerine sahip olduklarından dolayı LHTES sistemleri için uygun adaylar arasında yer almaktadır (Okogeri ve Stathopoulos, 2021; Anand vd., 2025).

Tuz hidratları veya metallerden oluşan inorganik-inorganik ötektik FDM'ler, organik FDM'lere göre daha yüksek termal iletkenlik ve enerji depolama yoğunluğuna sahiptir. Fakat uygulamalarda genelde faz ayrışması, uyumsuz erime, aşırı soğuma, kaplarda korozif etki yaratma gibi dezavantajları vardır. Organik-inorganik ötektik FDM'ler ise teorik olarak diğer iki malzeme grubunun avantajlarını birleştirebilme potansiyeline sahiptir. Fakat organik ve inorganik bileşenler arasındaki uyum sorunu nedeniyle bu malzeme grubunun geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması hala sınırlı düzeydedir (Anand vd., 2025; El Hadi Attia vd., 2026).

Ötektik FDM'lerin termal performansı ve uzun vadeli döngü kararlılığı, gelişmiş malzeme sentezi ve kompozit malzeme yaklaşımlarıyla daha fazla geliştirilebilir. Örneğin FDM'ye çekirdeklenme ajanlarının veya bu etkiyi yaratacak malzemelerin eklenmesi aşırı soğutmayı etkili bir şekilde bastırırken kalınlaştırıcılar veya stabilize edici katkı maddelerinin eklenmesi faz ayrışmasının önüne geçmektedir (Ding vd., 2021; El Hadi Attia vd., 2026). Öte yandan ötektik FDM'ler uygun şekilde birleştirildiğinde termal kararlılık iyileştirilebilir, korozyon eğilimleri azaltılabilir, ısı transfer davranışı iyileştirilebilir. Yeri geldiğinde uygun bileşenlerin kullanılmasıyla malzeme maliyetleri de azaltılabilmektedir. Ayarlanabilir termofiziksel özellikler sayesinde bu malzemeler geniş bir uygulama sıcaklık aralığı ve geliştirilmiş operasyonel güvenilirlik potansiyeli sunmaktadır. Dolayısıyla hassas termal kontrol, yüksek enerji verimliliği ve uzun vadeli dayanım gerektiren TES uygulamalarında tek bileşenli FDM'lere göre daha uygulanabilir bir alternatif sunmaktadır (Ghani vd., 2021; Su vd., 2024). Tablo 2'de ötektik FDM'ler ile ilgili yapılan bazı çalışmaların önemli araştırma bulguları sunulmuştur.

Tablo 2. Ötektik FDM'ler ile ilgili yapılan bazı çalışmalar

Ötektik FDM	Erime Sıcaklığı (°C)	Erime Entalpisi (J/g)	Araştırma Bulguları	Referans
Laurik Asit-Palmitik Asit	36,2	182,7	Bakır tüpler içinde makro kapsüllenmiş ötektik FDM kil tuğlalara entegre edilerek iç mekanda termal dalgalanmaları azaltmıştır. Isı akışında $39,8 \text{ W/m}^2$ 'lik bir azalma ile yaklaşık $17,5 \text{ kWh'lik}$ tahmini günlük enerji tasarrufu elde edilmiştir.	(Taj vd., 2024)
Stearik Asit- Laurik Asit	33,2	151,7	Hazırlanan ötektik FDM'nin Li-ion pillerin termal yönetimindeki performansı araştırılmıştır. Su ile birleştirilen hibrit sistem ile pil sıcaklığı güvenli çalışma aralığında tutularak hücreler arası sıcaklık farkı en aza indirilmiştir.	(Khan vd., 2024)

Stearik Asit- Asetamid	65,7	203,7	Ötektik FDM'ye Al ₂ O ₃ ve çok duvarlı karbon nano tüplerin katkılanmasıyla termal iletkenlikte %132,7 oranında artış sağlanmıştır. Hızlandırılmış 500 termal döngü ile elde edilen nanopartikül katkılı ötektik FDM'nin termal kararlılığı ve uzun vadeli uygulanabilirliği ortaya konmuştur.	(C N ve Behura, 2024)
1 - D o d e k a - n o l / 1 - H e k s a d e - k a n o l (HD82.44) 1-Dodekanol/1-Ok-tadekanol (OD82.6)	17,3-22	193,7-206,4	Ötektik FDM'ye yapılan termal karakterizasyonlar sonucunda ihmal edilebilir aşırı soğuma ve yüksek enerji depolama yoğunluğu elde edildiği ortaya konmuştur. Kimyasal ve termal kararlılık gösteren bu malzeme grubunun düşük sıcaklıklı bina termal yönetimi için uygun adaylar olduğu tespit edilmiştir.	(D. Li vd., 2024)
Sodyum sülfat dekahidrat (Na ₂ -SO ₄ ·10H ₂ O, SS-D)-Sodyum fosfat dibazik dekahidrat (Na ₂ HPO ₄ ·12H ₂ O, SPDD)	27-28	202-216	Hindistan cevizi kabuğundan elde edilen biyokömür nanopartikülleri katkılanan SSD/SPDD ile çevre dostu ötektik bir FDM hazırlanmıştır. Termal iletkenlikte %54'e kadar artış, 200 döngü sonucunda iyi termal kararlılık ve kabul edilebilir seviyede kimyasal kararlılık elde edilmiştir. Korunan enerji depolama kapasitesi ile düşük sıcaklıklı termal düzenleme ve bina enerji uygulamaları için uygun adaylar olarak gösterilmiştir.	(Kalidasan vd., 2023)

4. Biyobazlı FDM'lerin Uygulama Alanları

Biyo FDM'ler sürdürülebilirlik, düşük toksisite, düşük aşındırıcılık, sınırlı aşırı soğuma ve ötektik formülasyon ile faz geçiş sıcaklıklarını ayarlayabilme kabiliyetleri yoluyla TES sistemlerinde termal yönetim uygulamaları için giderek artan bir ilgi odağı haline gelmiştir. Bu malzemeler özellikle bina uygulamalarında ısıyı depolayıp uygun koşullarda geri vererek pasif termal konforu sağlamaktadır (Kahwaji ve White, 2019; Benhorma vd., 2024). Ancak FDM'lerin erime esnasındaki sızıntı

problemi hem performansı hem de dayanıklılığı tehlikeye atmaktadır. Bu nedenle sızıntıyı önleyebilmek amacıyla mikro/makro kapsülleme yöntemleri veya hem gözenekli hem de termal olarak iletken taşıyıcı yapılarla şekil stabilizasyonu sağlanmaktadır. Böylece geliştirilen FDM'ler duvar, tavan ve bina cephesi gibi yapı bileşenlerine daha güvenilir bir şekilde entegre edilmektedir (Boussaba vd., 2019; Prajapati ve Kandasubramanian, 2019).

Bina dış cephe uygulamalarının yanı sıra bu malzemeler buzdolabı, iklimlendirme üniteleri ve güneş ocakları gibi ev ve endüstriyel sistemlerde gizli ısı tamponları olarak kullanılmaktadır. Böylece termal yükler sönümlenerek çalışma sıcaklıkları dengelenmektedir. Öte yandan güneş enerjisi teknolojilerinde fotovoltaik (PV) panellerin veriminin panel yüzey sıcaklığının artmasıyla düştüğü bilinmektedir. Biyo bazlı FDM'ler PV panellere entegre edilerek fazla ısının belirli bir süre depolanmasını sağlayarak sıcaklık artışının önüne geçer. Dolayısıyla elektriksel performansın korunmasına katkı sağlar (Kahwaji ve White, 2019; Togun vd., 2025).

Elektronik cihazların termal yönetiminde ise cihazların aşırı ısınmasına bağlı olarak meydana gelen arızaların önüne geçmek amacıyla biyo bazlı FDM'ler bir ısı emici bileşen olarak cihazlara entegre edilmektedir. Bu malzemeler faz değişimi sırasında ısıyı absorbe ederek sıcaklık artışını sınırlandırırken herhangi bir ek elektrik gücü gerektirmemeleri ve hafif kompakt yapıda olmalarından dolayı uygulamalarda sıkça tercih edilmektedir. Özellikle Li-iyon pillerde artan güvenlik endişeleri dikkate alındığında FDM tabanlı çözümler etkili sıcaklık düzenlemesi sağlayarak güvenli çalışma koşullarını desteklemekte ve bileşen ömrünün uzamasına katkı sunmaktadır (Guo vd., 2025; Srivastav vd., 2025) the safety performance of lithium-ion batteries has become increasingly critical. These batteries can generate substantial heat during high-load operation, posing significant thermal safety challenges. To address this issue, this study developed a thermally induced flexible electrically insulating phase change material (FPCM).

Biyo bazlı FDM'lerin hedef sıcaklıkları koruyabilme özelliklerinden dolayı bozulabilir gıda, tıbbi ve kimyasal ürünlerin taşınması ile soğuk zincir uygulamalarında da kullanılmaktadır (İlangovan vd., 2022). Çeşitli kullanım alanları ile enerji verimliliği, termal güvenlik ve sürdürülebilirlik açısından çok yönlü malzemeler olarak öne çıkmaktadır (Nalla vd., 2025)(LCAs. Biyo bazlı FDM'lerin farklı uygulama alanlarına yönelik seçilmiş olan örnek çalışmalardan elde edilen bulgular Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. *Biyo bazlı FDM'lerin farklı uygulamalarındaki analizini yapan çalışmalarda ortaya çıkan bulguların özeti*

Biyo bazlı FDM	Uygulama Alanı	Bulgular	Referans
Hindistan cevizi yağı	Bina	Bina zarfına entegre edilen FDM ile iç mekana geçen ısı- nın geciktirildiği ve sıcaklık dalgalanmalarının azaltıldığı tespit edilmiştir.	(A. Li vd., 2024)
Balmu- mu-Hindistan cevizi yağı	PV Panel	PV panel yüzey sıcaklığının referans panele göre %28 oranına kadar azaldığını ve bunun sonucunda elektrik güç çıkışında %20,87 artış sağlandığını ortaya koymuştur.	(Mohammadifar vd., 2025)
Laurik asit	Elektronik Cihaz	Bataryaların deşarj sürecinin deneysel analizinde biyo bazlı FDM kullanılarak maksimum batarya sıcaklığı 50°C'nin altında tutulmuş ve sıcaklık farkı 1°C'nin altına indirilerek etkili bir termal yönetim sağlanmıştır.	(Cai vd., 2024)
Kaprik asit-Stearik asit	Gıda	Geliştirilen FDM'li ambalaj filmi ile kısa ve orta vadeli sıcaklık dalgalanmalarında çikolatanın sertleşmesi geciktirilmiştir. Günlük depolama ve kısa mesafeli taşımada raf ömrünü uzatan etkili bir ikincil ambalaj potansiyeli sunmuştur.	(Zhao vd., 2025)

5. Sonuç ve Öneriler

Biyo bazlı FDM'ler düşük toksisite, düşük aşındırıcılık, sınırlı aşırı soğuma, nispeten güvenli yanıcılık profilleri ve gelişmiş enerji depolama kapasiteleri ile TES sistemleri için ilgi çekici bir malzeme grubu olarak öne çıkmaktadır. Bu malzemeler iç mekanlarda termal konforun sağlanması, ısı geri kazanımı, soğuk zincir lojistiği, güneş enerjili sistemler dahil olmak üzere çeşitli sistemlerde etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Fakat uygulamada termal döngü esnasında meydana gelen sızıntı riski, düşük termal iletkenlik, bazı malzemelerde kötü koku ve maliyet gibi zorluklar hala önemli sınırlılıklar arasında yer almaktadır. Kimyasal kararlılığı artır-

mak için koruyucu kaplamalar, kapsülleme yaklaşımları, uyumlu çekirdeklenme ajanlarının kullanımı gibi stratejiler uygulanmaktadır. Sızıntı problemini önleyebilmek için ise gözenekli iskelet yapılar ve mikro/nano kapsülleme yöntemleri ile çevre dostu ve uygun maliyetleri yaklaşımlara odaklanılmaktadır. Öte yandan termal iletkenliğin iyileştirilmesi için iletken nano katkı maddelerinin ilave edilmesi ile ısı transfer hızı artmakta ve dolayısıyla da şarj/deşarj süreci hızlandırılarak sistem performansı iyileştirilmektedir.

Döngüsel ekonomi perspektifinden bakıldığında, atıklardan elde edilen ham maddeler hem maliyetleri azaltmakta hem de gıda sektörüyle oluşabilecek rekabet riskini ortadan kaldırmaktadır. Bu durum biyo bazlı FDM'leri çevre dostu ve stratejik alternatifler haline getirmektedir. Bu kapsamda özellikle ötektik biyo bazlı FDM'lerin ayarlanabilir faz değişim sıcaklıkları ve uygulamaya özgü optimize edilebilir özellikleri sayesinde öne çıktığı görülmektedir. Bununla birlikte, düşük termal iletkenlik, sızıntı ve aşırı soğuma gibi FDM'lere özgü temel sınırlılıklar, bu malzemelerin ticarileşme potansiyelini hala kısıtlamaktadır. Araştırmacıların ortak test prosedürleri ve standartlaştırılmış performans kriterleri geliştirmesi, çalışmalar arası karşılaştırılabilirliği artırarak malzemelerin belirli bir kalite standardında olgunlaşmasına olanak sağlayacak ve ticarileşme sürecine de hız kazandıracaktır.

Kaynakça

- Aftab, W., Usman, A., Shi, J., Yuan, K., Qin, M., Zou, R. (2021). Phase change material-integrated latent heat storage systems for sustainable energy solutions. *Energy & Environmental Science*, 14(8), 4268–4291.
- Alva, G., Lin, Y., Fang, G. (2018). An overview of thermal energy storage systems. *Energy*, 144, 341–378.
- Anand, A., Mansor, M., Sharma, K., Shukla, A., Sharma, A., Siddiqui, M. I. H., ... Twala, B. (2025). A comprehensive review on eutectic phase change materials: Development, thermophysical properties, thermal stability, reliability, and applications. *Alexandria Engineering Journal*, 112, 254–280.
- Ao, C., Yan, S., Zhao, L., Zhao, X., Wu, Y. (2023). Design of a stearic acid/boron nitride/expanded graphite multifiller synergistic composite phase change material for thermal energy storage. *Energy and Built Environment*, 4(5), 557–567.
- Benhorma, A., Bensenouci, A., Teggat, M., Ismail, K. A. R., Arıcı, M., Mezaache, E., ... Lino, F. A. M. (2024). Prospects and challenges of bio-based phase change materials: An up to date review. *Journal of Energy Storage*, 90, 111713.
- Boussaba, L., Makhoul, S., Foufa, A., Lefebvre, G., Royon, L. (2019). Vegetable fat: A low-cost bio-based phase change material for thermal energy storage in buildings. *Journal of Building Engineering*, 21, 222–229.
- C N, D., Behura, A. K. (2024). Thermophysical characterization and reliability analysis of binary composite nano doping on stearic acid-acetamide eutectic PCM. *Materials Today Sustainability*, 26, 100804.
- Cai, S., Ji, J., Zhang, X., Zhang, C., Pan, Z., Zhang, C., Zhao, Y. (2024). Development of bio-based flexible phase change materials utilizing lauric acid for battery thermal management systems. *Journal of Energy Storage*, 86, 111382.
- Costa, S. C., Kenisarin, M. (2022). A review of metallic materials for latent heat thermal energy storage: Thermophysical properties, applications, and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 154, 111812.
- Ding, C., Liu, L., Ma, F., Chen, F., Zhang, S., Sun, T. (2021). Enhancing the Heat Storage Performance of a Na₂HPO₄·12H₂O System via Introducing Multiwalled Carbon Nanotubes. *ACS Omega*, 6(43), 29091–29099.
- Duquesne, M., Mailhé, C., Doppiu, S., Dauvergne, J. L., Santos-Moreno, S., Godin, A., ... Del Barrio, E. P. (2021). Characterization of Fatty Acids as Biobased Organic Materials for Latent Heat Storage. *Materials* 2021, Vol. 14, Page 4707, 14(16), 4707.
- El Hadi Attia, M., Sathyamurthy, R., Arunkumar, T., Ramasamy, N., Prabhu, B. (2026). Bio-based sustainable organic eutectic PCMs for thermal energy systems: Comprehensive assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 226, 116397.

- Feldman, D., Shapiro, M. M., Banu, D., Fuks, C. J. (1989). Fatty acids and their mixtures as phase-change materials for thermal energy storage. *Solar Energy Materials*, 18(3–4), 201–216.
- Ghani, S. A. A., Jamari, S. S., Abidin, S. Z. (2021). Waste materials as the potential phase change material substitute in thermal energy storage system: a review. *Chemical Engineering Communications*, 208(5), 687–707.
- Guo, J., Ding, H., Xie, J., Wang, S., Huang, Q., Liu, C., Nie, B. (2025). Bio-based, flexible, and electrically insulating phase change materials for advanced battery thermal management. *Journal of Energy Storage*, 111, 115405.
- Hekimoğlu, G., Sarı, A., Kar, T., Keleş, S., Kaygusuz, K., Tyagi, V. V., ... Saleh, T. A. (2021). Walnut shell derived bio-carbon/methyl palmitate as novel composite phase change material with enhanced thermal energy storage properties. *Journal of Energy Storage*, 35, 102288.
- Hong, Y., Xin-shi, G. (2000). Preparation of polyethylene–paraffin compound as a form-stable solid-liquid phase change material. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 64(1), 37–44.
- Ilangovan, A., Hamdane, S., Silva, P. D., Gaspar, P. D., Pires, L. (2022). Promising and Potential Applications of Phase Change Materials in the Cold Chain: A Systematic Review. *Energies* 2022, Vol. 15, Page 7683, 15(20), 7683.
- Inoue, T., Hisatsugu, Y., Suzuki, M., Wang, Z. N., Zheng, L. Q. (2004). Solid–liquid phase behavior of binary fatty acid mixtures: 3. Mixtures of oleic acid with capric acid (decanoic acid) and caprylic acid (octanoic acid). *Chemistry and Physics of Lipids*, 132(2), 225–234.
- Junaid, M. F., Rehman, Z. ur, Ijaz, N., Čekon, M., Čurpek, J., Babeker Elhag, A. (2022). Biobased phase change materials from a perspective of recycling, resources conservation and green buildings. *Energy and Buildings*, 270, 112280.
- Kahwaji, S., White, M. A. (2019). Edible Oils as Practical Phase Change Materials for Thermal Energy Storage. *Applied Sciences* 2019, Vol. 9, Page 1627, 9(8), 1627.
- Kalidasan, B., Pandey, A. K., Saidur, R., Kothari, R., Sharma, K., Tyagi, V. V. (2023). Eco-friendly coconut shell biochar based nano-inclusion for sustainable energy storage of binary eutectic salt hydrate phase change materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 262, 112534.
- Khan, A., Ali, M., Yaqub, S., Khalid, H. A., Khan, R. R. U., Mushtaq, K., ... Said, Z. (2024). Hybrid thermal management of Li-ion battery pack: An experimental study with eutectic PCM-embedded heat transfer fluid. *Journal of Energy Storage*, 77, 109929.
- Li, A., Yang, Y., Ren, Y., Wan, Y., Wu, W., Zhang, H. (2024). Bio-based composite phase change material utilizing wood fiber and coconut oil for thermal management in building envelopes. *Journal of Cleaner Production*, 469, 143177.
- Li, D., Lenfant, T., Landry, V., Rodrigue, D., Kaboorani, A., Wang, X. (Alice). (2024). Development and investigation of biobased binary eutectic

- phase change materials for low-temperature building applications: 1-Hexadecanol/1-Dodecanol and 1-Octadecanol/1-Dodecanol. *Journal of Energy Storage*, 103, 114345.
- Majó, M., Sánchez, R., Barcelona, P., García, J., Fernández, A. I., Barreneche, C. (2021). Degradation of Fatty Acid Phase-Change Materials (PCM): New Approach for Its Characterization. *Molecules* 2021, Vol. 26, Page 982, 26(4), 982.
- Malode, S. J., Shetti, N. P. (2025). Thermal energy storage systems using bio-based phase change materials: A comprehensive review for building energy efficiency. *Journal of Energy Storage*, 105, 114709.
- Mehrizi, A. A., Karimi-Maleh, H., Naddafi, M., Karimi, F. (2023). Application of bio-based phase change materials for effective heat management. *Journal of Energy Storage*, 61, 106859.
- Mert, H. H., Eslek, A., Mert, E. H., Mert, M. S. (2022). Preparation and characterization of shape-stable bio-based composite phase change materials for thermal energy storage: coconut oil / activated carbon from cherry stones doped composites. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 44(2), 5381–5397.
- Mohammadifar, A., Rahimi, M., Azimi, N. (2025). Enhancing solar panel efficiency with bio-based PCMs with multiple melting points incorporating wood charcoals powder: an experimental study. *Energy*, 337, 138699.
- Nalla, B. T., Subbiah, G., K, D., Das, S. N., M, S. K., Swarnkar, S. K., ... K, K. P. (2025). Bio-based phase-change materials for thermal energy storage: Recent advances, challenges, and outlook. *Results in Engineering*, 28, 107087.
- Okogeri, O., Stathopoulos, V. N. (2021). What about greener phase change materials? A review on biobased phase change materials for thermal energy storage applications. *International Journal of Thermofluids*, 10, 100081.
- Prajapati, D. G., Kandasubramanian, B. (2019). Biodegradable Polymeric Solid Framework-Based Organic Phase-Change Materials for Thermal Energy Storage. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 58(25), 10652–10677.
- Rashid, F. L., Al-Obaidi, M. A., Dhaidan, N. S., Hussein, A. K., Ali, B., Ben Hamida, M. B., Younis, O. (2023). Bio-based phase change materials for thermal energy storage and release: A review. *Journal of Energy Storage*, 73, 109219.
- Rashid, F. L., Al-Obaidi, M. A., Dulaimi, A., Bahlol, H. Y., Hasan, A. (2023). Recent Advances, Development, and Impact of Using Phase Change Materials as Thermal Energy Storage in Different Solar Energy Systems: A Review. *Designs* 2023, Vol. 7, Page 66, 7(3), 66.
- Ravotti, R., Fellmann, O., Lardon, N., Fischer, L. J., Stamatiou, A., Worlitschek, J. (2019). Analysis of Bio-Based Fatty Esters PCM's Thermal Properties and Investigation of Trends in Relation to Chemical Structures. *Applied Sciences* 2019, Vol. 9, Page 225, 9(2), 225.

- Sarı, A., Kaygusuz, K. (2001). Thermal performance of myristic acid as a phase change material for energy storage application. *Renewable Energy*, 24(2), 303–317.
- Sharma, A., Singh, P. K., Makki, E., Giri, J., Sathish, T. (2024). A comprehensive review of critical analysis of biodegradable waste PCM for thermal energy storage systems using machine learning and deep learning to predict dynamic behavior. *Heliyon*, 10(3), e25800.
- Singh, P., Sharma, R. K., Ansu, A. K., Goyal, R., Sarı, A., Tyagi, V. V. (2021). A comprehensive review on development of eutectic organic phase change materials and their composites for low and medium range thermal energy storage applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 223, 110955.
- Singh, R., Sadeghi, S., Shabani, B. (2018). Thermal Conductivity Enhancement of Phase Change Materials for Low-Temperature Thermal Energy Storage Applications. *Energies* 2019, Vol. 12, Page 75, 12(1), 75.
- Srivastav, D., Patil, N. D., Shukla, P. C. (2025). Bio-based phase change materials for battery thermal management: A numerical investigation for a single Li-ion cell. *Applied Thermal Engineering*, 278, 127346.
- Su, Y., Shen, J., Chen, X., Xu, X., Shi, S., Wang, X., ... Huang, X. (2024). Bio-based eutectic composite phase change materials with enhanced thermal conductivity and excellent shape stabilization for battery thermal management. *Journal of Energy Storage*, 100, 113712.
- Sun, M., Liu, T. T., Sha, H., Li, M., Liu, T. T., Wang, X., ... Jiang, D. (2023). A review on thermal energy storage with eutectic phase change materials: Fundamentals and applications. *Journal of Energy Storage*, 68, 107713.
- Taj, S. A., Khalid, W., Nazir, H., Khan, A., Sajid, M., Waqas, A., ... Zaki, S. A. (2024). Experimental investigation of eutectic PCM incorporated clay brick for thermal management of building envelope. *Journal of Energy Storage*, 84, 110838.
- Togun, H., Basem, · Ali, Muhsin, ·, Jweeg, J., Hayder, ·, Mohammed, I., ... Anqi, A. E. (2025). Development and innovation using PCM in PV cooling systems: passive and active approaches. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 2025 150:14, 150(14), 10725–10760.
- Tyagi, V. V., Chopra, K., Sharma, R. K., Pandey, A. K., Tyagi, S. K., Ahmad, M. S., ... Kothari, R. (2022). A comprehensive review on phase change materials for heat storage applications: Development, characterization, thermal and chemical stability. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 234, 111392.
- Zadshir, M., Kim, B. W., Yin, H. (2024). Bio-Based Phase Change Materials for Sustainable Development. *Materials* 2024, Vol. 17, Page 4816, 17(19), 4816.
- Zhang, N., Yuan, Y., Cao, X., Du, Y., Zhang, Z., Gui, Y. (2018). Latent Heat Thermal Energy Storage Systems with Solid–Liquid Phase Change Materials: A Review. *Advanced Engineering Materials*, 20(6), 1700753.
- Zhao, Q., Wong, S. Y., Zhang, Y., Lim, P. C., Sivaraja, V. K., Ngo, A. C. Y., ... Li, X. (2025). Biobased phase change material packaging for dark chocolate: Enhanced thermal management against temperature fluctuations. *Food Packaging and Shelf Life*, 52, 101632.

Bölüm 7

NANOPARTİKÜL KATKILI YAKIT TEKNOLOJİLERİ: STABİLİTE, PERFORMANS, YANMA VE EMİSYON KARAKTERİSTİKLERİ

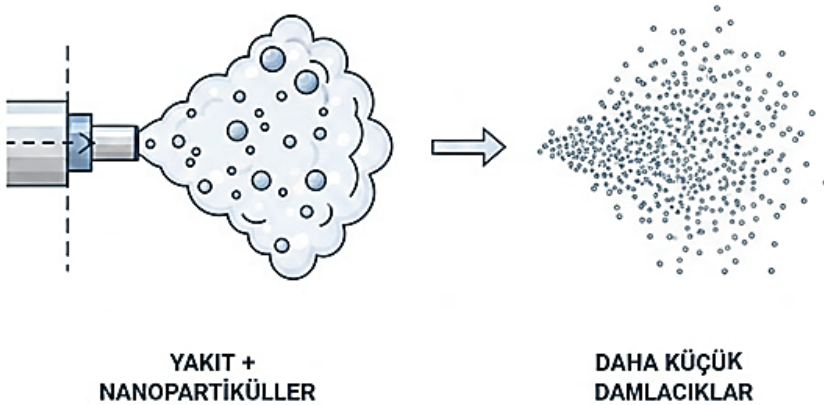
Gürkan KARA¹, Hakan ÖZCAN²

1 (Arş.Gör.) Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, gurkan.kara@omu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-0365-3827

2 (Prof.Dr.) Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, ozcanh@omu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-7848-3650

1. GİRİŞ

Mevcut durumdaki küresel bazlı teknolojik, çevresel, politik ve ekonomik projeksiyonlar bir arada değerlendirildiğinde içten yanmalı motorlarda kullanılan yakıtların yanma verimliliğini artırmak, artık sadece ekonomik bir tercih olmaktan çıkmakla birlikte daha temiz bir çevre için uygulanan uluslararası emisyon standartlarına uyumluluk ve son yıllarda önemi iyice artan enerji bağımsızlığı için bir zorunluluk haline gelmiştir (Parmar & Patel, 2025). Geleneksel yakıtlar, heterojen yanma süreçlerinde sınırlı difüzyon özellikleri ve düşük ısı transfer katsayıları sergilemektedir. Son yıllarda nanoyakıt teknolojideki artan araştırma trendleri ile keşfedilmiş olan yeni gelişmeler, yakıtın viskozite, ısıl iletkenlik, kütle difüzyonu gibi termofiziksel özelliklerini iyileştirerek bu sınırları aşmayı mümkün hale getirmiştir (Lv et al., 2022). Nanoyakıt konsepti; dizel, biyodizel, benzin gibi baz yakıtlar içerisinde 1-100 nm boyutundaki katı partiküllerin kararlı bir şekilde dağıtılmasıyla elde edilen koloidal sıvılara verilen genel addır. Nanopartiküller, bir takım karmaşık fiziksel ve kimyasal mekanizmalar ile yakıtın yanma özelliklerini iyileştirmektedir. Bu mekanizmalar arasında en önemlisi ve yanma karakteristiklerinin iyileştirilmesindeki katkı oranı en yüksek olanı, yanma sırasında aktivasyon enerjisini düşürerek reaksiyon hızını artıran “yüzer katalizörler” olarak işlev görmeleri ve Şekil 1.’de gösterildiği gibi yakıt enjeksiyonu sırasında ikincil atomizasyon mekanizması yaratarak daha küçük yakıt damlacıkları oluşmasını ve silindir içindeki türbülans ile bu damlacıkların yanma odası içerisine daha homojen yayılmasını sağlamalarıdır (Lv et al., 2022; Mahgoub, 2023).



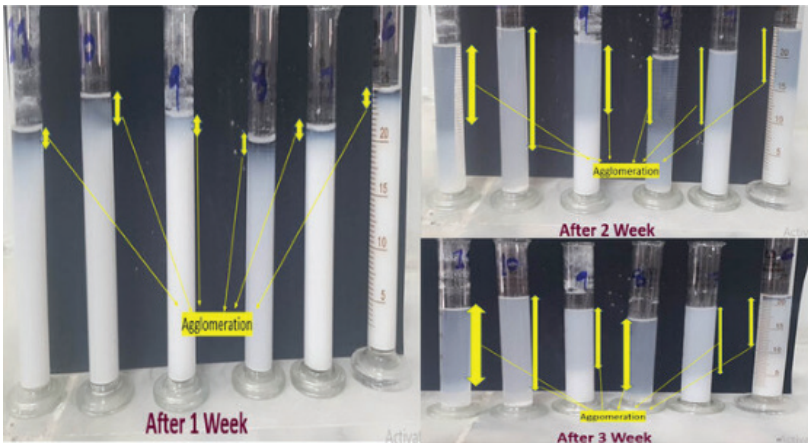
Şekil 1. Nanopartiküllerin Yakıt Atomizasyonuna Etkisinin Şematik Gösterimi

Literatürde yapılmış olan nanoyakıt konseptli çalışmalar incelendiğinde, baz yakıt içerisine farklı türlerde, farklı şekillerde ve farklı boyutlarda nanopartiküller katıldığı ve bunların motor performans, yanma ve egzoz emisyon karakteristiklerine olan etkilerinin incelendiği görülmektedir (Anbarsooz, 2023; Mahgoub, 2023; Wang et al., 2020). Nanoyakıtların, stabiliteleri, enjeksiyon özellikleri ve eklenen nanopartiküllerin çevresel etkileri ise görece olarak daha sınırlı düzeyde çalışılmıştır.

Bu çalışmada, içten yanmalı motorlar gibi yakma sistemlerinde kullanılmakta olan konvansiyonel yakıtların yanma performanslarını ve verimlerini artırmak amacıyla entegre edilen nanopartiküllerin (metalik, metal oksit ve karbon bazlı) etkileri incelenmiştir. Nanopartiküllerin sahip oldukları yüksek yüzey alanı/hacim oranları ve yanma reaksiyonları üzerindeki katalitik etkileri, yanma kinetiğini hızlandırarak motorun ısı verimi artırmakta ve buna bağlı olarak kirletici emisyonları azaltmaktadır (Modi et al., 2024; Mofijur et al., 2024). Bu kapsamda, nanoyakıt hazırlama teknikleri, karışım stabilize mekanizmaları ve bu katkıların motor performans, yanma ve egzoz emisyon karakteristikleri üzerindeki etkileri ele alınmıştır.

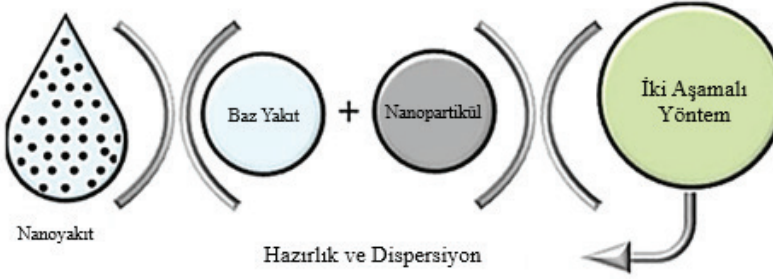
2. NANOYAKITLARIN HAZIRLANMASI VE KARIŞIM STABİLİTELERİ

Nanoyakıtların, motorda ve yakıt sistemlerinde tıkanıklığa yol açmaması ve pozitif etkilerinin devamlılığı için uzun süreli stabilizeye sahip olmaları oldukça kritik öneme sahiptir. Çünkü nanopartiküller, yerçekimi ve Van der Waals kuvvetleri etkisiyle zamanla Şekil 2.'de gösterildiği gibi birleşerek daha büyük partiküller oluşturma ve dibe çökme eğilimindedir (Saxena et al., 2017).



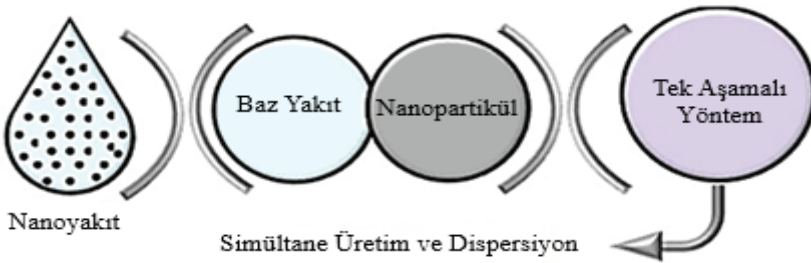
Şekil 2. Nanopartikül Katkılı Sıvılarda Zamanla Gerçekleşen Sedimentasyon (Ahmed Memon et al., 2024)

Nanoyakıtların hazırlanması sırasında uygulanan yöntemler, bahsedilen sedimentasyon süresi parametresi de göz önünde bulundurularak geliştirilmeye çalışılmaktadır. Nanoyakıt hazırlanmasında yaygın kullanımda iki üretim tekniği ön plana çıkmaktadır. Bunlardan birisi iki aşamalı yöntem olarak adlandırılan yöntemdir. Bu yöntemde, nanopartiküller Şekil 3.'de görüleceği gibi toz formda üretilip ardından yakıtla karıştırılmaktadır. Ekonomik olması nedeniyle ticari uygulamalarda tercih edilir(Saxena et al., 2017).



Şekil 3. Nanoyakıt Hazırlamada İki Aşamalı Yöntem(Ahmed Memon et al., 2024)

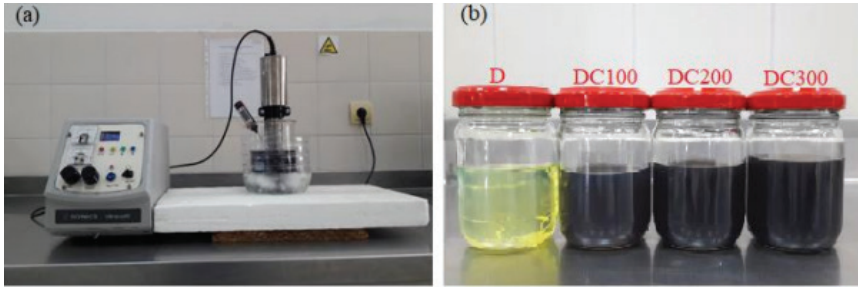
Diğer yöntem ise, tek adımlı yöntemdir. Bu yöntemde ise, Şekil 4.'de görüleceği gibi partikül sentezi ve yakıtla dağıtma işlemi eş zamanlı yapılmaktadır. Bu sayede karışım içerisindeki nanopartiküllerde oluşabilecek topaklanma iki aşamalı yöntemle göre daha minimal düzeye indirgenmektedir(Saxena et al., 2017).



Şekil 4. Nanoyakıt Hazırlamada Tek Aşamalı Yöntem(Ahmed Memon et al., 2024)

Nanoyakıtlarda stabiliteyi sağlamak için Van der Waals çekim kuvvetlerine karşı elektrostatik veya sterik itme kuvvetleri oluşturulmalıdır.

Bu amaçla karışımların hazırlık aşamasında farklı karakteristiklere sahip (anyonik, katyonik, polar, apolar, hidrofilik, lipofilik vb.) sürfaktanların (yüzey aktif maddelerin) kullanımı yaygındır (Chen et al., 2018; Nouri et al., 2021; Pullagura et al., 2024). En yaygın kullanılan sürfaktanlar ise Span 80, Tween 80, DARWAN CN veya CTAB gibi maddelerdir. Bu maddeler, karışım içerisinde partikül yüzeylerini sararak yüzey yüklerini değiştirir ve bu sayede çökelmeyi engeller veya yavaşlatır. Nanopartiküllerin baz yakıt içerisine homojen olarak dağıtılabilmesi için, birbirine yapışık olan partikülleri birbirinden ayırma konusunda en etkili yöntem olan ultrasonik homojenizatörler kullanılır (Nouri et al., 2021; Parmar & Patel, 2025; Soudagar et al., 2019). Şekil 5.'de, örnek olarak farklı oranlarda kömür nanopartikülleri kullanılarak hazırlanan nanoyakıtlar ve bu nano yakıtların ısı kontrollü şekilde ultrasonik homojenizasyon süreci gösterilmiştir (Çakmak & Özcan, 2026).



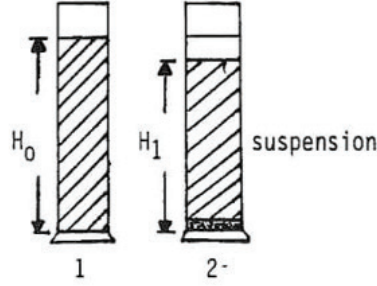
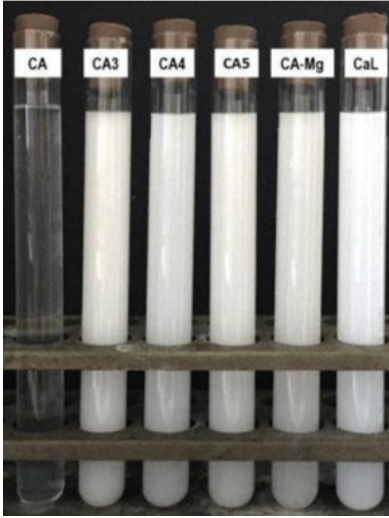
Şekil 5. a) Kömür Nanopartiküllerinin Dizel Yakıt İçerisinde Sıcaklık Kontrollü Ultrasonik Homojenizasyonu. b) Farklı Oranlarda Kömür Nanopartikülleri kullanılarak Hazırlanan Nanoyakıtlar (Çakmak & Özcan, 2026)

Ultrasonik kavitasyon yani ultrasonik homojenizatörün oluşturduğu yüksek yoğunluklu ses dalgaları, yakıt karışımı içerisinde oluşmuş olan partikül kümelenmelerini parçalayarak homojen bir dağılım sağlar ve bu durum stabilize sürelerinde önemli artışlar elde edilmesine olanak tanır.

Nanoakışkanlarda süspansiyonun kararlılığının belirlenmesinde zeta potansiyeli ölçümleri sıklıkla tercih edilir. Ancak zeta potansiyeli ölçümleri genellikle su temelli nanoakışkanların stabilitelerini tespit etmede daha etkin bir yöntemdir (Pochapski et al., 2021). Nanoyakıtlar gibi su dışındaki baz akışkanlara sahip nanoakışkanların stabilitelerinin belirlenmesinde görsel sedimentasyon testleri daha uygun bir yöntemdir ve yapılan bilimsel çalışmalarda yaygın olarak kullanılırlar (Parmar & Patel, 2025; Wang et al., 2020). Görsel sedimentasyon testi, hazırlanan nano-yakıt karışımının ne kadar süre homojen kaldığını gözlemleyerek stabilitesinin belirlenmesi temeline dayanır. Testler sırasında araştırmacılar, genellikle nanoyakıt dolu deney tüplerinin Şekil 6.'da gösterildiği gibi fo-

toğraflarını çekerek bilgisayar ortamında veya tüplerdeki seviyeleri gözle ölçerek veya Foto-Sedimentasyon (UV-Vis Spektrofotometre) cihazları kullanılır. Tüpün belirli bir noktasından ışık gönderilir. Partiküller çöktükçe ışık geçirgenliği artar. Zamanla değişen absorbans (ışık emilimi) değerleri grafik haline getirilir. Stabil bir nanoyakıtta absorbans değeri uzun süre sabit kalmalıdır) ile Denklem 1’de verilmiş olan formülü kullanarak Sedimentasyon Oranını (S_r) hesaplar(Ghadimi et al., 2011; Saxena et al., 2017).

$$S_r = \frac{H_o}{H_i} \quad (\text{Denklem 1})$$



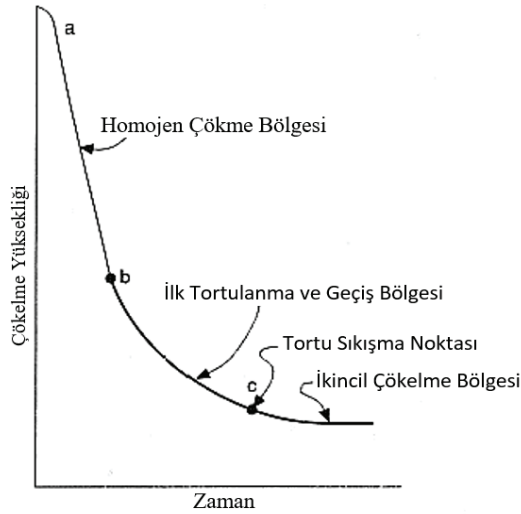
Şekil 6. Nanoyakıtlarda Örnek Sedimentasyon Testi Numuneleri(Kroftová et al., 2017)

Kararlı Süspansiyon; nanopartiküllerin yakıt içerisinde homojen olarak dağıldığı ve zaman geçse de deney tüpünün üst kısmında berraklaşma görülmediği durumdur. Kısmi Çökme; görece daha zayıf stabiliteye sahip numunelerde, partiküllerin aglomerasyona (topaklanma) uğrayarak deney tüpünün alt kısmına doğru hareket etmesi ve deney tüpünün üst kısmına doğru şeffaflaşarak giden bir faz bölgesi oluşmasıdır. Tam Çökme ise, tüm katı fazın deney tüpünün tabanında biriktiği ve üst fazın renginin tamamen baz yakıt rengine (dizel, biyodizel vb.) döndüğü aşamadır(Ghadimi et al., 2011; Phan & Haes, 2019). Bu durum, söz konusu yakıtın kullanılmasının motor sistemleri için risk teşkil ettiğini gös-

termektedir. Şekil 7.'de sedimentasyon süreci ve sedimentasyon testinde oluşan fazların tanımları şematik olarak verilmiştir.



Şekil 7. Sedimentasyon Testinde a) Test sonunda oluşan faz bölgeleri b) Test sırasında gözlemlenen faz bölgeleri

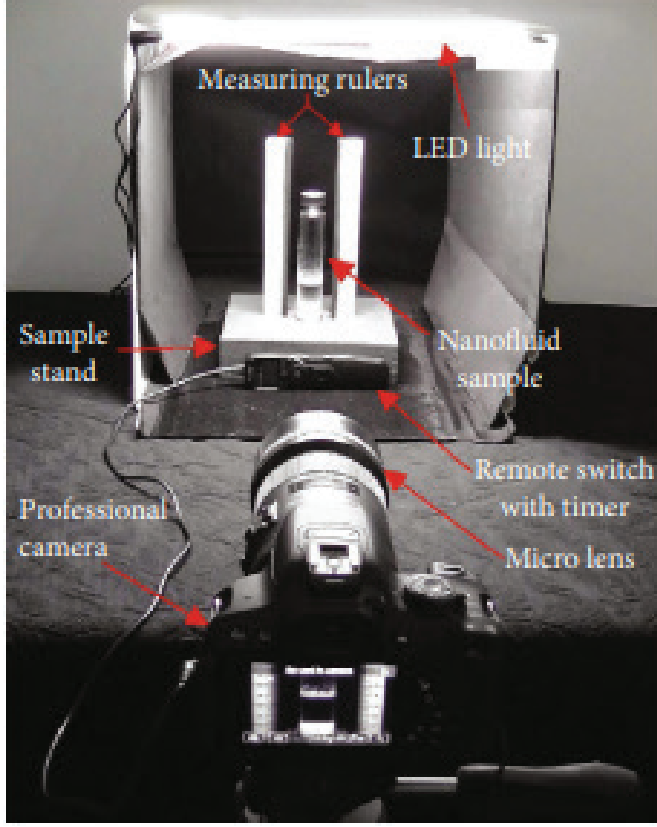


Şekil 8. Sedimentasyon Testinde Çökeltme Yüksekliği – Zaman Grafiği

Zeta potansiyeli, bir nanopartikülün yüzeyini çevreleyen elektriksel çift tabakanın dış sınırındaki (kayma düzlemi) elektrostatik potansiyel olarak tanımlanmaktadır. Literatürdeki nanoakışkan konseptli çalışmadaki yaygın kaniya göre, bir süspansiyonun mutlak Zeta potansiyeli değerinin yaklaşık 30 mV'den yüksek olması, nanopartiküller arasındaki elektrostatik itme kuvvetinin baskın olduğunu ve sistemin kararlı (stabil) olduğunu gösterir. Zeta Potansiyeli değerinin 0 mV'a yaklaşması ise, par-

tiküllerin birbirini itmediğini, bu sebeple Van der Waals kuvvetlerinin etkisi ile aglomerasyona uğrayarak çökeceğini (stabil değil) gösterir. Ancak, dizel ve benzin gibi yakıtlar polar olmayan (apolar) sıvılardır ve dielektrik sabitleri oldukça düşüktür. Standart zeta potansiyeli ölçüm cihazları genellikle su bazlı (polar) sıvılarda zeta potansiyeli ölçümü için tasarlandığından, yakıt içindeki çok zayıf elektrik sinyallerini ölçmekte zorlanırlar(Pochapski et al., 2021). Diğer yandan dizel ve benzin gibi yakıtların elektriksel iletkenliği çok düşüktür. Bu durum, ölçüm sırasında partiküllere hareket kazandıracak elektrik alanının uygulanmasını ve elektroforetik mobilite olarak adlandırılan partikül hızının tespit edilmesini güçleştirir. Ayrıca, karışım stabilitelerini artırmak için eklenen sürfaktanlar, partikül yüzeyindeki yük dağılımını değiştirdiğinden ölçüm sonuçlarını yanıltabilir veya zeta potansiyelini yapay olarak düşük gösterebilir. Ölçüm yapılan ortamın sıcaklığı da yakıtın viskozitesini ve dolayısıyla partikül hareketliliğini yüksek oranda değiştirebileceğinden, zeta potansiyeli ölçümü ile nanoyakıt stabilite tayin yöntemi sağlıklı bir ölçüm yöntemi olarak görülmemektedir(Chen et al., 2018; Soudagar et al., 2019).

Dolayısıyla pratik yaklaşımda nanoyakıtların stabilitelerinin belirlenmesinde en etkin yol sedimantasyon testi olarak görülmektedir. Ancak, temel akışkanın renginde ve ışık geçirgenliğinde çok önemli değişikliklere neden olma potansiyelinde sahip CuO gibi nanopartiküller kullanılarak üretilmiş olan nanoyakıtların stabilitelerini, görsel sedimantasyon testleri ile net olarak belirlemek oldukça güçtür(Manigandan et al., 2020). Bundan dolayı son yıllarda, görsel sedimantasyon testi yerine, Şekil 9'da gösterilen görüntü işleme yöntemi veya daha opak karışımlar için bölgesel renk ölçümü ile çökeltme tayini gibi alternatif yöntemler başarılı bir şekilde uygulanmaktadır.



Şekil 9. Görüntü İşleme ile Sedimentasyon Ölçümü (Ali et al., 2019)

3. NANOYAKITLARDA YAYGIN OLARAK KULLANILAN NANOPARTİKÜL ÇEŞİTLERİ

Literatür incelendiğinde, dizel, biyodizel ve benzin gibi konvansiyonel yakıtlara nanopartikül ilavesine yönelik çalışmaların büyük ölçüde metal ve metal oksit nanopartiküller üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Bu durumun temel nedeni, söz konusu nanopartiküllerin yüksek katalitik aktiviteye, oksijen taşıma/depoma kabiliyetine ve yanma kinetiğini iyileştirici özelliklere sahip olmalarıdır. Bu özellikler, yanma veriminin artırılması ve egzoz emisyonlarının azaltılması açısından önemli avantajlar sunmaktadır (Mahgoub, 2023; Parmar & Patel, 2025).

Literatürde yer alan nanoyakıt konsepti üzerine yapılan çalışmalarda en yaygın olarak kullanılan nanopartiküllerden biri seryum oksit (CeO_2) nanopartikülleridir. CeO_2 nanopartikülleri, $\text{Ce}^{3+}/\text{Ce}^{4+}$ redoks çifti sayesinde yüksek bir oksijen depolama ve salma kapasitesine sahiptir. Bu özellikleri nedeniyle yanma odasında gerçekleşen patlama anında yakıt

zerrecikleri içerisindeki CeO_2 nanopartikülleri bir tür oksijen destekleyici kaynak gibi davranarak, oksijenin yanma için yetersiz kaldığı bölgelerde bölgesel oksijen eksikliğinin giderilmesine katkı sağlar. Sonuç olarak, yanmanın homojenliğini ve verimini iyileştirmesinin yanında özellikle eksik yanmanın ürünleri olan karbon monoksit (CO) ve yanmamış hidrokarbon (HC) emisyonları başta olmak üzere kirlетici emisyonların azalmasında etkili olduğu birçok çalışmada rapor edilmiştir. Ayrıca, is oluşumunu katalitik olarak baskılaması sayesinde duman opaklığında azalma sağladığı da belirtilmektedir (Kumbhar et al., 2023; Lahane et al., 2025; Manigandan et al., 2020).

Oldukça küçük boyutlara indirilebilme kabiliyetleri ile nanoyakıt çalışmalarında yaygın olarak kullanılan bir diğer yaygın metal oksit nanopartikül olan alüminyum oksit (Al_2O_3) nanopartikülleri, doğrudan katalitik bir oksidasyon ajanı olmaktan ziyade, yakıtın efektif ısıl iletkenliğini artırması, küçük boyutları ile atomizasyon sırasında daha küçük damlacıklar oluşmasını sağlaması ve yanma bölgesindeki ısı transferini iyileştirmesi özellikleri ile ön plana çıkmaktadır. Al_2O_3 nanopartiküllerinin, özellikle dizel ve biyodizel yakıtlarında yakıtın daha iyi atomize olmasını sağlayarak tutuşma gecikmesini kısaltıp daha kararlı bir yanma süreci sağladığı ve bunun sonucunda fren ısı veriminde artışa katkıda bulunduğu bildirilmektedir (Ampah et al., 2022; Lahane et al., 2025; Manigandan et al., 2020).

Titanyum oksit (TiO_2) nanopartikülleri ise çoğunlukla fotokatalitik özellikleri nedeniyle nanoyakıt ile alakalı bilimsel literatürde yer bulmaktadır. Ancak içten yanmalı motorlar açısından TiO_2 'nin temel etkisi, fotokatalizden ziyade oksidatif yüzey reaksiyonları ve yanma kinetiği üzerindeki dolaylı katalitik etkileridir. Bazı çalışmalarda TiO_2 katkısının NO_x emisyonlarında düşük miktarlarda da olsa azalma sağlayabildiği, ancak bu etkinin nanoyakıtın kullanıldığı motorun çalışma koşullarına ve yakıt muhteviyatındaki nanopartikül konsantrasyonuna güçlü biçimde bağlı olduğu vurgulanmaktadır (Çalhan & Kaskun Ergani, 2023; Manigandan et al., 2020; Sungur et al., 2016).

Çinko oksit (ZnO) ve bakır oksit (CuO) nanopartikülleri ise daha çok yanma hızını artırıcı ve alev gelişimini hızlandırıcı etkileriyle bilinmektedir. Bu nanopartiküllerin ilavesiyle birlikte ısı salım oranının arttığı, dolayısıyla fren ısı veriminin (BTE) iyileştiği birçok deneysel çalışmada rapor edilmiştir. Bununla birlikte, CuO gibi yüksek katalitik aktiviteye sahip nanopartiküllerin yanma sıcaklığını artırabilmesi nedeniyle NO_x emisyonlarında artış riski taşıdığı da literatürde belirtilmektedir (Hussain et al., 2020; Jokubynienė & Slavinskas, 2025; Khidr et al., 2023).

Saf metal nanopartiküller (Al, B, Fe, Cu vb.) çok yüksek enerji yoğunluklarına ve yanma entalpilerine sahip olmaları nedeniyle yakıtla ve edildiklerinde, yakıtın birim kütle başına ürettiği toplam ısı enerjisi artırma potansiyeline sahiptir. Özellikle alüminyum ve bor nanopartikülleri, askeri ve havacılık uygulamalarında uzun süredir enerjetik katkı maddeleri olarak incelenmektedir. Ancak içten yanmalı motor uygulamalarında bu tür nanopartiküllerin oksitlenme kalıntıları, aşındırıcı etkileri ve filtre/enjektör tıkanması riski nedeniyle kullanımının daha sınırlı olduğu ve dikkatli tasarım gerektirdiği ifade edilmektedir.

Son yıllarda literatürde karbon bazlı nanopartiküllere yönelik ilginin belirgin şekilde arttığı görülmektedir. Bu gruptaki nanopartiküller, yüksek özgül yüzey alanları, mükemmel termal ve elektriksel iletkenlikleri ile dikkat çekmektedir. Karbon nanotüpler (CNT), tek cidarlı (SWCNT) ve çok cidarlı (MWCNT) formlarıyla yakıt atomizasyonunu iyileştirdiği, püskürtme sonrası damlacık boyutunu azalttığı ve yanma hızını artırdığı rapor edilen nanopartiküller arasındadır. Bu sayede, özellikle düşük yük koşullarında yanma kararlılığının arttığı belirtilmektedir. Grafen ve grafen oksit (GO) nanopartikülleri ise yakıt damlacıkları içerisinde mikro-patlama (micro-explosion) mekanizmasını tetikleyerek, yakıtın hava ile daha etkin karışmasını sağlamaktadır. Bu etki, çok bileşenli yakıt sistemlerinde (örneğin biyodizel-dizel karışımları) daha belirgin olup, yanma verimini artırıcı bir rol oynamaktadır (Arul Mozhi Selvan et al., 2014; Kegl et al., 2021; Parveg & Ratner, 2025).

Güncel çalışmalarda, iki veya daha fazla nanopartikülün avantajlarını birleştiren hibrit nanopartikül yapıları öne çıkmaktadır. Örneğin gümüş katkılı grafen yapıları, grafenin yüksek iletkenliğini gümüşün katalitik aktivitesi ile birleştirerek hem yanma hızını hem de emisyon karakteristiklerini iyileştirmeyi amaçlamaktadır (Çalhan & Kaskun Ergani, 2023).

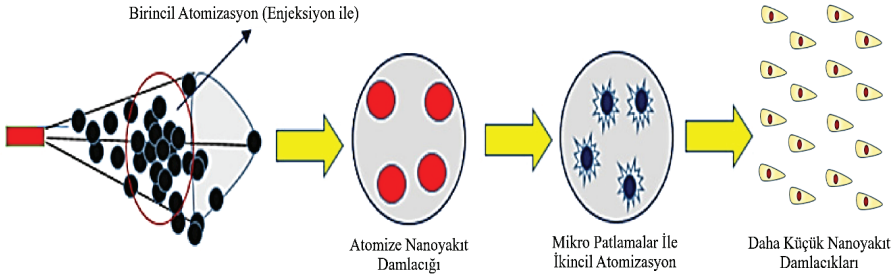
Bunun yanı sıra, manyetik nanopartiküller (Fe_3O_4) yakıtın kimyasal bileşiminden ziyade, yakıt hattı üzerinde uygulanan manyetik alanlar aracılığıyla akış, atomizasyon ve püskürtme karakteristiklerini kontrol etmek amacıyla incelenmektedir. Bu yaklaşım, özellikle yakıtın fiziksel özelliklerinin pasif olarak iyileştirilmesini hedefleyen yenilikçi bir yöntem olarak değerlendirilmektedir.

4. MOTOR PERFORMANS VE YANMA KARAKTERİSTİKLERİ

Nanopartikül ilavesinin motor performansı ve yanma karakteristikleri üzerindeki etkileri; mikro-patlama (micro-explosion), iyileştirilmiş atomizasyon, hızlandırılmış yanma kinetiği ve artan ısı transferi mekanizmaları çerçevesinde açıklanmaktadır. Bu etkiler, içten yanmalı motor-

larda yanma verimini doğrudan etkileyen hava–yakıt karışımı kalitesi, tutuşma gecikmesi, ısı salım oranı ve basınç gelişimi gibi parametreler üzerinde belirgin değişimlere yol açmaktadır (ul Haq et al., 2024).

Nanopartikül içeren yakıt damlacıklarında gözlenen mikro-patlama olgusu, damlacık içerisindeki fazlar arasında oluşan yerel sıcaklık gradyanları ve farklı buharlaşma hızları ile ilişkilidir. Nanopartiküller, yüksek termal iletkenlikleri ve yüzey enerjileri sayesinde yakıt damlacığı içerisinde yerel yüksek sıcaklık noktalarının oluşmasına neden olmaktadır. Bu durum, yakıt henüz kaynama sıcaklığına ulaşmadan Şekil 10.’da şematik görünümü verilen mekanizma ile nanopartiküllerin bulunduğu noktalarda ani ve lokal buharlaşma meydana getirmekte ve damlacığın ikincil atomizasyonu ile birlikte daha küçük yakıt damlacıkları oluşmasını sağlamaktadır (Parveg & Ratner, 2025; ul Haq et al., 2024).



Şekil 10. Nanoyakıt Enjeksiyonu Sırasında Oluşan İkincil Atomizasyon Mekanizması

Mikro-patlamalar sonucu oluşan daha küçük ikincil damlacıklar, yakıt–hava temas yüzeyini artırarak karışım homojenliğini ve karışımın ortamdaki ısı çekerek verimli yanma koşullarına gelme özelliklerini iyileştirir. Bu mekanizma özellikle biyodizel gibi yüksek viskoziteli yakıtlarda daha belirgin olup, püskürtme sonrası damlacık çaplarının küçülmesiyle yanma veriminde artış sağlamaktadır. Sonuç olarak, yanma odasında daha homojen bir karışım oluşmakta ve eksik yanma eğilimi azalmaktadır (Lv et al., 2022; Mofijur et al., 2024).

Nanopartiküllerin yanma sürecine katkısı yalnızca fiziksel atomizasyonla sınırlı olmayıp, aynı zamanda yanma kinetiğinin hızlanması ile de ilişkilidir. Metal ve metal oksit nanopartiküller, yanma sırasında katalitik yüzeyler oluşturarak yakıt moleküllerinin oksidasyon reaksiyonlarını hızlandırmaktadır. Bu etki, silindir içerisindeki net ısı yayılımının artmasını ve yanma süresinin kısılmasını sağlamaktadır. Nanopartiküllerin yüksek termal difüziviteye sahip olması, yakıtın buharlaşma hızını

artırarak tutuşma gecikmesinin (ignition delay) kısılmasına katkı sağlamaktadır. Özellikle dizel ve biyodizel yakıtlarında, tutuşma gecikmesinin azalması, ön-karışım fazının daha kontrollü gerçekleşmesine ve basınç artış hızının daha dengeli olmasına yardımcı olmaktadır. Bu durum, motor titreşimi ve gürültü seviyeleri açısından da olumlu sonuçlar doğurabilmektedir(Ağbulut et al., 2020; Pullagura et al., 2024).

Yüksek enerjili metal nanopartiküller (Al, B gibi) yakıt içerisine ilave edildiğinde, teorik olarak yakıtın birim kütle başına açığa çıkarabileceği toplam enerji miktarının da artması bilinen bir etkidir. Bazı çalışmalarda bu tür nanopartiküllerin alt ısı değeri artırdığı rapor edilmiştir. Ancak literatür genelinde bu konuda tam bir görüş birliği bulunmamaktadır. Bunun temel nedeni, metal nanopartikül oksitlenmesinin yanma süresi içinde ne ölçüde tamamlandığının motor çalışma koşullarına güçlü biçimde bağlı olmasıdır. Dolayısıyla, enerji yoğunluğundaki artışın her koşulda motorun fren gücüne doğrudan yansımadağı vurgulanmaktadır(-Çalhan & Kaskun Ergani, 2023).

Son yıllarda çalışılmakta olan kömür nanopartikül katkılı yakıtlar, karbon bazlı olmaları, kolaylıkla küçük boyutlara öğütülebilmeleri ve yanma reaksiyonuna doğrudan katılabilmeleri ile öne çıkmaktadır.Kömür nanopartikül (CNP) katkılı nanoyakıtlar üzerine yapılan çalışmalar, kömür nanopartiküllerinin yanma sürecine doğrudan katılarak performans parametrelerini iyileştirdiğini göstermektedir. Bununla birlikte özgül yakıt sarfiyatı ve efektif verim değerlerinde de kayda değer artış gözlenmektedir. Kömür nanopartikül bazlı nanoyakıtların gösterdiği bu iyileşme, kömür nanopartiküllerin yüksek özgül yüzey alanı sayesinde yakıt-hava karışımını homojenleştirmesi ve yanma hızını artırmasıyla ilişkilendirilmektedir. Silindir basıncı ve net ısı salım oranı analizleri, CNP'lerin yanma fazını daha erken krank açısına kaydardığını ve toplam yanma süresini kısalttığını ortaya koymaktadır. Ayrıca basınç artış oranlarının güvenli sınırlar içinde kalması, CNP kullanımının vuruntu veya motor dayanımı açısından olumsuz bir etki oluşturmadığını göstermektedir(Çakmak & Özcan, 2026).

Nanoyakıtların motor performansına etkileri genellikle basınç-hacim (P-V) diyagramları, silindir içi basınç-krank açısı eğrileri ve frensel performans parametreleri üzerinden değerlendirilmektedir. Literatürde, nanopartikül katkılarının:

- Maksimum silindir basıncını hafifçe artırdığı,
- Yanma süresini kısalttığı,
- Egzozla atılan enerji kayıplarını azalttığı

rapor edilmiştir (Anbarsooz, 2023; Hamzah et al., 2024). Bu etkilerin birleşimi sonucunda, fren ısı veriminde artış gözlenmektedir. Ayrıca, nanopartiküllerin katalitik etkisi sayesinde yanma odasında karbonun oksidasyonunun daha etkin gerçekleştiği, bunun da CO ve HC oluşumunu azaltırken, daha yüksek bir enerji dönüşüm verimliliği sağladığı belirtilmektedir. Yakıtın efektif enerji kullanımındaki bu iyileşme, aynı güç çıktısı için gereken yakıt debisinin azalmasına ve dolayısıyla özgül yakıt tüketiminde (BSFC) düşüşe yol açmaktadır (Modi et al., 2024; Parmar & Patel, 2025).

5. EMİSYON KARAKTERİSTİKLERİ VE ÇEVRESEL ETKİ

Nanoyakıtların en güçlü yönlerinden biri, içten yanmalı motorların egzoz emisyon karakteristiklerinde sağladıkları belirgin iyileşmelerdir. Literatürde yapılan çok sayıda deneysel çalışmada, nanopartikül katkılı yakıtların özellikle karbon monoksit (CO), yanmamış hidrokarbonlar (HC) ve partikül madde (PM) emisyonlarını önemli ölçüde azalttığı rapor edilmiştir. Bu iyileşmeler, nanopartiküllerin hem kimyasal (katalitik) hem de fiziksel (atomizasyon ve ısı transferi) etkilerinin bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Özellikle oksijen içerikli metal oksit nanopartiküller (CeO_2 , TiO_2 , ZnO , Fe_3O_4 gibi), sahip oldukları ilave bölgesel oksijen kaynağı olma ve yüksek özgül yüzey alanları sayesinde yanma odasında oksidasyon reaksiyonlarını hızlandırıcı bir rol üstlenmektedir. Bu nanopartiküller, yanma sürecinde CO'nun CO_2 'ye dönüşümünü katalize ederek, lokal oksijen eksikliğinin görüldüğü bölgelerde daha verimli bir yanma gerçekleşmesini sağlamaktadır. Bu durum, özellikle düşük yük ve kısmi yanma koşullarında CO ve HC emisyonlarında belirgin azalmalarla sonuçlanmaktadır (Lv et al., 2022; Mahgoub, 2023; Wang et al., 2020).

Nanopartikül katkısı ile yanma veriminin artması, yanma odasında daha yüksek ve daha homojen sıcaklık alanlarının oluşmasına yol açabilmektedir. Teorik olarak bu durum, termal NOx oluşum mekanizması nedeniyle azot oksit (NOx) emisyonlarında artış eğilimi yaratmaktadır. Ancak literatürde, bu artışın nanopartikül türüne bağlı olarak her zaman kaçınılmaz olmadığı gösterilmiştir. Özellikle seryum oksit (CeO_2) nanopartiküllerinin sahip olduğu oksijen depolama kapasitesi, NOx oluşumunu dengeleyici bir etki ortaya koymaktadır. CeO_2 nanopartikülleri, yanma sırasında Ce^{3+} ve Ce^{4+} oksidasyon durumları arasında geçiş yapabilmekte ve bu redoks mekanizması sayesinde fazla oksijeni geçici olarak depolayarak yanma bölgesindeki oksijen aktivitesini düzenleyebilmektedir. Bu özellik, yanma sıcaklığının yükselmesine rağmen NOx oluşum hızının sınırlandırılmasına olanak tanımakta; bazı çalışmalarda ise nanopartikül katkılı yakıtlarda NOx emisyonlarının değişmediği veya sınırlı düzeyde azaldığı rapor edilmektedir. Bu durum, CeO_2 na-

nopartiküllerinin yalnızca CO ve HC emisyonlarını azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda NO_x-PM ödünleşimini (trade-off) kısmen dengeleyebildiğini göstermektedir. Buna ek olarak, nanopartikül katkısı ile is ve partikül madde oluşumunun azalması, egzoz gazı içindeki yanmamış karbon fraksiyonunun düşmesine yol açmaktadır. Bu etki, özellikle CeO₂ ve Fe₃O₄ gibi katalitik nanopartiküllerin, karbon partiküllerinin oksidasyonunu hızlandırmasıyla ilişkilendirilmektedir. Partikül madde miktarındaki azalma, hem egzoz gazı bulanıklığının düşmesine hem de yanma odasında daha temiz bir yanma ortamının oluşmasına katkı sağlamaktadır. Genel olarak değerlendirildiğinde, nanopartikül katkılı yakıtların emisyon karakteristikleri üzerindeki olumlu etkileri; daha tamamlanmış yanma, geliştirilmiş oksidasyon reaksiyonları ve katalitik yüzey etkileri ile açıklanabilir. Bununla birlikte, NO_x emisyonlarındaki değişimin nanopartikül türü, konsantrasyonu ve motor çalışma koşullarına son derece duyarlı olduğu; bu nedenle nanopartikül katkılarının optimum konsantrasyonlarda ve uygun motor ayarlarıyla birlikte değerlendirilmesi gerektiği literatürde sıklıkla vurgulanmaktadır (Ampah et al., 2022; Hamzah et al., 2024; Kegl et al., 2021).

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu bölümde, nano-katkılı yakıt teknolojilerinin stabilite, motor performansı, yanma mekanizmaları ve emisyon karakteristikleri üzerindeki etkileri bütüncül bir bakış açısıyla değerlendirilmekte ve literatürde elde edilen bulgular ışığında genel sonuçlar ortaya konulmaktadır. İncelenen çalışmalar, uygun nanopartikül türü ve konsantrasyonu ile formüle edilen nanoyakıtların, yanma sürecini optimize ederek frensel performans parametrelerinde iyileşmeler sağladığını ve özellikle eksik yanma kaynaklı emisyonları belirgin şekilde azalttığını göstermektedir. Bununla birlikte, bu teknolojilerin gerçek motor uygulamalarında sürdürülebilir ve güvenilir bir şekilde kullanılabilmesi; dispersiyon stabilitesi, uzun süreli motor dayanımı, emisyon-performans ödünleşimi ve çevresel/sağlık etkilerinin birlikte ele alınmasını zorunlu kılmaktadır. Bu çerçevede, mevcut kazanımların ötesine geçebilmek için, deneysel ve sayısal çalışmaların sonuçları sentezlenerek geleceğe yönelik araştırma ihtiyaçları ve uygulama odaklı öneriler aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

1. Nanopartikül katkılarının motor performansı ve yanma karakteristikleri üzerindeki etkisi; nanopartikül türü, boyutu, konsantrasyonu, dispersiyon kalitesi ve motor çalışma koşullarına güçlü biçimde bağlıdır. Literatürde bildirilen olumlu etkilerin sürdürülebilir ve güvenli biçimde uygulanabilmesi için, stabilite, uzun dönem motor aşınması ve emisyon sonrası etkilerin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

2. Genel olarak nanopartikül katkılı yakıtlar, yanma sürecinin hem fiziksel hem de kimyasal yönlerini iyileştirerek motor performansını olumlu yönde etkilemektedir. Bununla birlikte, bu etkilerin büyüklüğü; nanopartikül türü, boyutu, konsantrasyonu, dispersiyon kalitesi ve motor çalışma koşullarına doğrudan bağlıdır. Aşırı nanopartikül yüklemeleri ise agregasyon, düzensiz yanma ve potansiyel mekanik sorunlar nedeniyle performans kazanımlarını sınırlandırabilmektedir. Bu nedenle literatürde, optimum nanopartikül konsantrasyonunun belirlenmesi kritik bir araştırma konusu olarak öne çıkmaktadır.
3. Nanopartikül katkılı yakıtların emisyon karakteristikleri üzerindeki etkileri genel olarak değerlendirildiğinde, bu yaklaşımın içten yanmalı motorların çevresel performansını iyileştirme açısından yüksek bir potansiyele sahip olduğu görülmektedir. Literatürdeki deneysel bulgular, nanopartikül ilavesinin yanma sürecini hem fiziksel hem de kimyasal açıdan optimize ederek, özellikle eksik yanma kaynaklı emisyonları önemli ölçüde azalttığını ortaya koymaktadır.
4. Oksijen içerikli metal oksit nanopartiküllerinin sağladığı ilave oksijen ve katalitik yüzey etkisi sayesinde, CO ve HC emisyonlarının düşürülmesi mümkün olmakta; bu durum yanmanın daha tamamlanmış bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir. Aynı zamanda, karbon oksidasyonunun hızlanmasıyla is ve partikül madde (PM) oluşumu baskılanmakta, böylece egzoz gazı opaklığı ve partikül yükü azaltılmaktadır. Bu iyileşmeler, özellikle dizel ve biyodizel motorlar için kritik öneme sahiptir.
5. Bununla birlikte, yanma verimindeki artışa bağlı olarak silindir içi sıcaklıkların yükselmesi, NO_x emisyonlarında artış eğilimini beraberinde getirebilmektedir. Ancak literatür, bu olumsuz etkinin nanopartikül türüne bağlı olarak kontrol altına alınabileceğini göstermektedir. Özellikle CeO₂ gibi yüksek oksijen depolama kapasitesine sahip nanopartiküllerin, yanma ortamındaki oksijen aktivitesini düzenleyerek NO_x oluşumunu sınırlandırabildiği ve NO_x-PM ödüneşimini dengeleyici bir rol üstlendiği rapor edilmektedir. Bu durum, uygun nanopartikül seçiminin emisyon optimizasyonunda belirleyici bir faktör olduğunu ortaya koymaktadır.
6. Genel olarak, nanopartikül katkılı yakıtlar, daha temiz yanma, düşük karbon bazlı emisyonlar ve iyileştirilmiş enerji dönüşüm verimliliği sunmaktadır. Ancak bu kazanımların sürdürülebilir

ve güvenilir bir şekilde elde edilebilmesi için; nanopartikül türü, boyutu, konsantrasyonu, dispersiyon stabilitesi ve motor çalışma koşullarının birlikte optimize edilmesi gerekmektedir. Aşırı nanopartikül ilavesi veya yetersiz dispersiyon, emisyon ve performans üzerindeki olumlu etkileri sınırlayabileceği gibi, uzun dönem motor dayanımı açısından da risk oluşturabilmektedir.

7. Sonuç olarak, nanopartikül katkılı yakıtlar, içten yanmalı motorlarda emisyon azaltımına yönelik gelecek vadeden bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, bu teknolojinin geniş ölçekli uygulamalara aktarılabilmesi için, uzun süreli motor testleri, toksikolojik değerlendirmeler ve emisyon sonrası etkilerin bütüncül bir bakış açısıyla ele alındığı ileri araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır.
8. Nanopartikül katkılı yakıtlar, düşük emisyonlu ve yüksek verimli bir enerji geleceği için kritik bir araçtır. Ancak, Partiküllerin motor silindir yüzeylerindeki aşındırıcı etkisi yeteri kadar incelenmemiştir. Yine, enjeksiyon karakteristikleri üzerine sınırlı sayıda çalışma yapılmıştır. Benzer şekilde, eklenen nanopartiküllerin motor performans, yanma ve egzoz emisyon karakteristikleri üzerinde olumlu etkilerine rağmen, nanoboyutlu egzoz çıktılarının çevre ve insan sağlığı üzerine etkileri ise neredeyse hiç çalışma yapılmamıştır.
9. Nanoyakıt üretiminde kullanılan, özellikle metalik ve metaloksit bazı nanopartiküller toksik metal salımı ve çevresel birikim riski taşımaktadır. Bu durum, bu nanopartiküllerin kullanılabilirliğini sınırlamaktadır. Metal ve metal oksit nanopartiküller yerine kömür veya karbon tabanlı nanopartikül kullanımı metal içerikli nanopartiküller gibi ekstra kirletici riski taşımadığından sürdürülebilirlik açısından daha iyi bir alternatif sunmaktadır.
10. Kömür türevi nanopartiküllerin nanoyakıt katkısı olarak metal oksit nanopartiküllere uygulanabilir bir alternatif olabileceği görülmüştür. Nanokömürler, düşük maliyet, yüksek bulunabilirlik ve görece düşük toksisite avantajları ile birlikte, motor performansı ve emisyonlar üzerinde anlamlı iyileştirmeler sağlamaktadır. Ancak artan is emisyonları ve uzun dönem motor/aftartreatment sistemleri üzerindeki etkiler, gelecekte detaylı şekilde araştırılmalıdır.

KAYNAKÇA

- Ağbulut, Ü., Karagöz, M., Sarıdemir, S., & Öztürk, A. (2020). Impact of various metal-oxide based nanoparticles and biodiesel blends on the combustion, performance, emission, vibration and noise characteristics of a CI engine. *Fuel*, 270, 117521. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2020.117521>
- Ahmed Memon, A., Kumar, L., Ghafoor Memon, A., Harijan, K., & Said, Z. (2024). Stability enhancement of Al₂O₃, ZnO, and TiO₂ binary nanofluids for heat transfer applications. *Open Physics*, 22(1). <https://doi.org/10.1515/PHYS-2023-0199>
- Ali, N., Teixeira, J. A., & Addali, A. (2019). Aluminium Nanofluids Stability: A Comparison between the Conventional Two-Step Fabrication Approach and the Controlled Sonication Bath Temperature Method. *Journal of Nanomaterials*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/3930572>
- Ampah, J. D., Yusuf, A. A., Agyekum, E. B., Afrane, S., Jin, C., Liu, H., Fattah, I. M. R., Show, P. L., Shouran, M., Habil, M., & Kamel, S. (2022). Progress and Recent Trends in the Application of Nanoparticles as Low Carbon Fuel Additives—A State of the Art Review. *Nanomaterials* 2022, Vol. 12, Page 1515, 12(9), 1515. <https://doi.org/10.3390/NANO12091515>
- Anbarsooz, M. (2023). Combustion characteristics of nanofuels: A comprehensive review on diesel/biodiesel-based nanofuels. *Fuel*, 337, 126834. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2022.126834>
- Arul Mozhi Selvan, V., Anand, R. B., & Udayakumar, M. (2014). Effect of Cerium Oxide Nanoparticles and Carbon Nanotubes as fuel-borne additives in Diesterol blends on the performance, combustion and emission characteristics of a variable compression ratio engine. *Fuel*, 130, 160–167. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2014.04.034>
- Çakmak, A., & Özcan, H. (2026). Coal-derived nanoparticles as nanofuel additives in combustion engines: Synthesis, characterization, and engine test. *Journal of the Energy Institute*, 125, 102418. <https://doi.org/10.1016/J.JOEI.2025.102418>
- Çalhan, R., & Kaskun Ergani, S. (2023). The impacts of nano fuels containing Fe-Ni-TiO₂/activated carbon nanoparticles on diesel engine performance and emission characteristics. *Biofuels*, 14(7), 661–671. <https://doi.org/10.1080/17597269.2023.2221881>
- Chen, A. F., Akmal Adzmi, M., Adam, A., Othman, M. F., Kamaruzzaman, M. K., & Mrwan, A. G. (2018). Combustion characteristics, engine performances and emissions of a diesel engine using nanoparticle-diesel fuel blends with aluminium oxide, carbon nanotubes and silicon oxide. *Energy Conversion and Management*, 171, 461–477. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2018.06.004>
- Ghadimi, A., Saidur, R., & Metselaar, H. S. C. (2011). A review of nanofluid stability properties and characterization in stationary conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(17–18), 4051–4068. <https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2011.04.014>

- Hamzah, A. H., Akroot, A., Abdul Wahhab, H. A., Ghazal, R. M., Alhamd, A. E. J., & Bdaiwi, M. (2024). Effects of nano-additives in developing alternative fuel strategy for CI engines: A critical review with a focus on the performance and emission characteristics. *Results in Engineering*, 22, 102248. <https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2024.102248>
- Hussain, F., Soudagar, M. E. M., Afzal, A., Mujtaba, M. A., Rizwanul Fattah, I. M., Naik, B., Mulla, M. H., Badruddin, I. A., Yunus Khan, T. M., Raju, V. D., Gavhane, R. S., & Ashrafur Rahman, S. M. (2020). Enhancement in Combustion, Performance, and Emission Characteristics of a Diesel Engine Fueled with Ce-ZnO Nanoparticle Additive Added to Soybean Biodiesel Blends. *Energies* 2020, Vol. 13, Page 4578, 13(17), 4578. <https://doi.org/10.3390/EN13174578>
- Jokubynienė, V., & Slavinskas, S. (2025). The Effect of ZnO and CNT Nanoparticles on the Combustion Characteristics and Emission Performance of a Common Rail Diesel Engine Fueled with Diesel and Biodiesel. *Energies* 2025, Vol. 18, Page 2564, 18(10), 2564. <https://doi.org/10.3390/EN18102564>
- Kegl, T., Kovač Kralj, A., Kegl, B., & Kegl, M. (2021). Nanomaterials as fuel additives in diesel engines: A review of current state, opportunities, and challenges. *Progress in Energy and Combustion Science*, 83, 100897. <https://doi.org/10.1016/J.PECS.2020.100897>
- Khidr, M. E., Megahed, T. F., Ookawara, S., & Elwardany, A. E. (2023). Effects of aluminum and copper oxides nanoparticles as fuel additives on diesel engine operating characteristics. *Atmospheric Pollution Research*, 14(4), 101721. <https://doi.org/10.1016/J.APR.2023.101721>
- Kroftová, K., Šmidtová, M., Kuřitka, I., & Škoda, D. (2017). Comparison of Selected Physical Properties of Tested Nanosuspensions – The Results of the Experimental Research of the Degree of Sedimentation and the Depth of Penetration in Reference Materials in Laboratory Conditions. *Stavební Obzor - Civil Engineering Journal*, 26(3). <https://doi.org/10.14311/CEJ.2017.03.0025>
- Kumbhar, V., Pandey, A., Sonawane, C. R., Panchal, H., & Ağbulut, Ü. (2023). Numerical and experimental investigation of the influence of various metal-oxide-based nanoparticles on performance, combustion, and emissions of CI engine fuelled with tamarind seed oil methyl ester. *Energy*, 265, 126258. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2022.126258>
- Lahane, S., Deshmukh, P. W., & Sapkal, Y. (2025). Effect of nanoparticles (Al₂O₃ and CeO₂) blended with biodiesel on combustion, performance, and emissions of a diesel engine. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 239(3), 1378–1387. https://doi.org/10.1177/09544089231207426/SUPPL_FILE/SJ-DOCX-1-PIE-10.1177_09544089231207426.DOCX
- Lv, J., Wang, S., & Meng, B. (2022). The Effects of Nano-Additives Added to Diesel-Biodiesel Fuel Blends on Combustion and Emission Characteristics

- of Diesel Engine: A Review. *Energies* 2022, Vol. 15, Page 1032, 15(3), 1032. <https://doi.org/10.3390/EN15031032>
- Mahgoub, B. K. M. (2023). Effect of nano-biodiesel blends on CI engine performance, emissions and combustion characteristics – Review. *Heliyon*, 9(11), e21367. <https://doi.org/10.1016/J.HELİYON.2023.E21367/ASSET/352CF502-A82A-487E-B62E-FD2290A52840/MAIN.ASSETS/GR11.JPG>
- Manigandan, S., Sarweswaran, R., Booma Devi, P., Sohret, Y., Kondratiev, A., Venkatesh, S., Rakesh Vimal, M., & Jensin Joshua, J. (2020). Comparative study of nanoadditives TiO₂, CNT, Al₂O₃, CuO and CeO₂ on reduction of diesel engine emission operating on hydrogen fuel blends. *Fuel*, 262, 116336. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2019.116336>
- Modi, V., Rampure, P. B., Babbar, A., Kumar, R., Nagaral, M., Bhowmik, A., Pandey, S., Hasnain, S. M. M., Ali, M. M., & Bashir, M. N. (2024). Nanoparticle-enhanced biodiesel blends: A comprehensive review on improving engine performance and emissions. *Materials Science for Energy Technologies*, 7, 257–273. <https://doi.org/10.1016/J.MSET.2024.02.001>
- Mofijur, M., Ahmed, S. F., Ahmed, B., Mehnaz, T., Mehejabin, F., Shome, S., Almomani, F., Chowdhury, A. A., Kalam, M. A., Badruddin, I. A., & Kamangar, S. (2024). Impact of nanoparticle-based fuel additives on biodiesel combustion: An analysis of fuel properties, engine performance, emissions, and combustion characteristics. *Energy Conversion and Management: X*, 21, 100515. <https://doi.org/10.1016/J.ECMX.2023.100515>
- Nouri, M., Isfahani, A. H. M., & Shirneshan, A. (2021). Effects of Fe₂O₃ and Al₂O₃ nanoparticle-diesel fuel blends on the combustion, performance and emission characteristics of a diesel engine. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 23(8), 2265–2284. <https://doi.org/10.1007/S10098-021-02134-8/TABLES/6>
- Parmar, Nimesh. B., & Patel, Jignesh. J. (2025). The Role of Nanoparticles as Additives in Diesel/Biodiesel: A Review on Performance and Emission Enhancements. *Journal of Scientific Research and Reports*, 31(6), 561–574. <https://doi.org/10.9734/JSRR/2025/V31I63152>
- Parveg, A. S. M. S., & Ratner, A. (2025). A comprehensive review of liquid fuel droplet evaporation and combustion behavior with carbon-based nanoparticles. *Progress in Energy and Combustion Science*, 106, 101198. <https://doi.org/10.1016/J.PECS.2024.101198>
- Phan, H. T., & Haes, A. J. (2019). What Does Nanoparticle Stability Mean? *Journal of Physical Chemistry C*, 123(27), 16495–16507. https://doi.org/10.1021/ACS.JPCC.9B00913/ASSET/IMAGES/MEDIUM/JP-2019-00913G_0008.GIF
- Pochapski, D. J., Carvalho Dos Santos, C., Leite, G. W., Pulcinelli, S. H., & Santilli, C. V. (2021). Zeta Potential and Colloidal Stability Predictions for Inorganic Nanoparticle Dispersions: Effects of Experimental Conditions and Electrokinetic Models on the Interpretation of Results. *Langmuir*,

37(45), 13379–13389. https://doi.org/10.1021/ACS.LANGMUIR.1C02056/SUPPL_FILE/LA1C02056_SI_001.PDF

- Pullagura, G., Bikkavolu, J. R., Vadapalli, S., Siva Prasad, V. V., Rao Chebattina, K. R., Barik, D., & Dennison, M. S. (2024). Performance, combustion and emission reduction characteristics of Metal-based silicon dioxide nanoparticle additives included in ternary fuel (diesel-SMME-iso butanol) on diesel engine. *Heliyon*, 10(4), e26519. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26519>
- Saxena, V., Kumar, N., & Saxena, V. K. (2017). A comprehensive review on combustion and stability aspects of metal nanoparticles and its additive effect on diesel and biodiesel fuelled C.I. engine. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 563–588. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2016.11.067>
- Soudagar, M. E. M., Nik-Ghazali, N. N., Kalam, M. A., Badruddin, I. A., Banapurmath, N. R., Yunus Khan, T. M., Bashir, M. N., Akram, N., Farade, R., & Afzal, A. (2019). The effects of graphene oxide nanoparticle additive stably dispersed in dairy scum oil biodiesel-diesel fuel blend on CI engine: performance, emission and combustion characteristics. *Fuel*, 257, 116015. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2019.116015>
- Sungur, B., Topaloglu, B., & Ozcan, H. (2016). Effects of nanoparticle additives to diesel on the combustion performance and emissions of a flame tube boiler. *Energy*, 113, 44–51. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2016.07.040>
- ul Haq, M., Turab Jafry, A., Ali, M., Ajab, H., Abbas, N., Sajjad, U., & Hamid, K. (2024). Influence of nano additives on Diesel-Biodiesel fuel blends in diesel engine: A spray, performance, and emissions study. *Energy Conversion and Management: X*, 23, 100574. <https://doi.org/10.1016/J.ECMX.2024.100574>
- Wang, X., Zhang, J., MA, Y., Wang, G., Han, J. P., Dai, M., & Sun, Z. Y. (2020). A comprehensive review on the properties of nanofluid fuel and its additive effects to compression ignition engines. *Applied Surface Science*, 504, 144581. <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2019.144581>

Bölüm 8

EKLEMELİ İMALAT TEKNOLOJİLERİNİN TARİHSEL GELİŞİMİ VE ENDÜSTRİYEL DÖNÜŞÜMÜ

Arif BALCI¹, Fatih ALİBEYOĞLU²

1 Dr. Öğretim Üyesi, Kafkas Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü

e-posta: arifbalci@kafkas.edu.tr

Orcid: 0000-0002-4932-9654

2 Dr. Öğretim Üyesi, Kafkas Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü

e-posta: falibeyoglu@kafkas.edu.tr

Orcid: 0000-0002-0323-3630

Giriş

Eklemeli imalat (Additive Manufacturing, AM), malzemenin katmanlar hâlinde biriktirilmesi yoluyla parça üretimini mümkün kılan ve tasarım–imalat ilişkisini temelden dönüştüren bir üretim paradigmasıdır. Klasik üretim yöntemleri çoğu zaman “şekillendirme” (döküm, dövme, ekstrüzyon) veya “eksiltme” (talaşlı imalat) mantığı üzerine kuruludur. Bu yaklaşımlar yüksek tekrarlanabilirlik ve seri üretim verimliliği sağlasa da takım erişimi, kalıp gereksinimi, iç boşlukların üretilebilirliği ve geometrik kısıtlar nedeniyle tasarım özgürlüğünü sınırlar. Eklemeli imalat ise dijital model verisini katmanlı bir üretim yoluna dönüştürerek, geleneksel yöntemlerle ya üretilmeyen ya da yüksek maliyet ve uzun süre gerektiren karmaşık geometrilerin üretimini rutin hâle getirmiştir. Bu yönüyle AM, yalnızca yeni bir “üretim yöntemi” olmayıp ürün tasarımı, malzeme kullanımı, tedarik zinciri ve ürün yaşam döngüsünün birlikte yeniden kurgulandığı bütüncül bir dönüşüm alanı olarak değerlendirilmektedir (Rosen, 2007; Holmström, Partanen, Tuomi & Walter, 2010).

Eklemeli imalatın sanayi üzerindeki etkisinin doğru biçimde değerlendirilebilmesi için konuya iki eş zamanlı pencereden bakmak gerekir: (i) tarihsel gelişim ve (ii) endüstriyel dönüşüm. Tarihsel perspektif, katmanlı üretim fikrinin yalnızca 1980’lerde ortaya çıkmadığını ve daha erken dönemlerde geliştirilen kesitsel yeniden inşa ve hacimsel modelleme yaklaşımlarının, teknolojik altyapı olgunlaştığında modern AM sistemlerine evrildiğini göstermektedir (Blather, 1892; Willème, 1860; Munz, 1951). Modern eklemeli imalatın doğuşu ise bilgisayar destekli tasarım, sayısal kontrol sistemleri ve lazer ya da ışık tabanlı enerji kaynaklarının eş zamanlı gelişimiyle mümkün olan stereolitografi (SLA), seçici lazer sinterleme (SLS) ve malzeme ekstrüzyonu (FDM) gibi temel süreçler bu dönemde tanımlanmıştır (Hull, 1986; Deckard & Beaman, 1988; Crump, 1989). Bu süreçler, günümüzde kabul gören AM sınıflandırmasının çekirdek ailesini oluşturmuştur. Daha sonraki teknolojik dallanmalar ise bu temel mekanizmaların farklı malzeme türleri ve enerji kaynaklarıyla yeniden uyarlanması şeklinde gelişmiştir.

Tarihsel süreç, eklemeli imalatın özünde kontrollü bir ergitme–katılaştırma ve/veya bağlanma problemi olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle metal eklemeli imalat süreçleri, ısı enerjisiyle metalin lokal olarak ergitilmesi, ergime havuzunun kararlı biçimde korunması ve yüksek soğuma hızları altında mikroyapının oluşumu gibi metalurjik açıdan karmaşık fenomenleri içermektedir (Rosenthal, 1946; Sher, 1998; Kou, 2003). Bu nedenle metal AM, yalnızca geometrik doğruluk veya üretkenlik açısından değil ısı transferi, katılma dinamikleri, mikroyapı evrimi ve nihai mekanik özellikler arasındaki ilişki zinciri üzerinden

değerlendirilmelidir (DeRoy et al., 2018). Alandaki erken çalışmalar, metal tozların lazer enerjisiyle birleştirilebileceğini göstererek sürecin teknik olarak mümkün olduğunu ortaya koyarak (Anriquez-Frayre & Bourell, 1990) süreci izleyen tam eğitime dayalı toz yatağı süreçleri ve doğrudan enerji yığma yaklaşımları, yoğun ve yapısal bütünlüğü yüksek parçaların üretimini mümkün kılarak endüstriyel uygulamaların önünü açmaktadır (Kruth et al., 2005; Kruth et al., 2007; Mazumder et al., 1997). Bu bağlamda AM süreçlerinin teknik sınıflandırılması, yalnızca terminolojik bir ayrım olmayıp her bir sınıfın kendine özgü ısı kaynağı, besleme formu ve bağlanma mekanizması nedeniyle farklı süreç fiziği ve kalite kontrol gereksinimlerine sahip olduğunu gösteren bir çerçeve sunmaktadır.

Endüstriyel dönüşüm ise eklemeli imalatın üretim sistemlerini nasıl yeniden yapılandırdığını açıklamayı amaçlamaktadır. Dijital tasarım dosyasının doğrudan üretim girdisi hâline gelmesi, “tasarımdan üretime dijital süreklilik” yaklaşımını güçlendirerek kalıp ve takım bağımlılığını azaltmıştır. Ayrıca düşük hacimli ve yüksek çeşitlilik gerektiren üretim senaryolarında AM’yi rekabetçi bir seçenek hâline getirmiştir (Rosen, 2007). Buna ek olarak, doğrudan dijital üretim ve dağıtık üretim yaklaşımları, yedek parçaların fiziksel stoklar yerine dijital envanterler aracılığıyla yönetilebilmesini mümkün kılarak tedarik zinciri maliyetlerini düşürme potansiyeli sunmaktadır (Holmström et al., 2010; Gibson, Rosen & Stucker, 2010). Havacılık sektöründe parça konsolidasyonu yoluyla montaj adımlarının azaltılması ve ağırlık düşüşü sağlanması (Thompson et al., 2016) ile biyomedikal alanda hasta-özü implantların üretimi sayesinde kişiselleştirilmiş çözümlerin yaygınlaşması (Murr et al., 2012) bu dönüşümün öne çıkan örnekleri arasında yer almaktadır. Paralel olarak, süreç izleme ve kapalı çevrim kontrol sistemlerinin metal eklemeli imalata uyarlanması (Craeghs et al., 2011) ve eğime havuzu ile sensör verilerinin yapay zekâ tabanlı yöntemlerle analiz edilmesi (Everton et al., 2016), tekrarlanabilirlik ve kalite güvencesini artırarak AM’nin seri üretimde daha etkin rol üstlenmesini desteklemektedir.

1. Tarihsel Gelişim

Katmanlı Üretim Fikrinin Tarihsel Kökenleri (1860–1950)

Eklemeli imalat teknolojilerinin kavramsal temeli, modern bilgisayar, sayısal kontrol ve lazer teknolojilerinin ortaya çıkışından çok daha önceye dayanmaktadır. Üç boyutlu nesnelerin ardışık kesitler aracılığıyla yeniden inşa edilmesi fikri, 19. yüzyılın ortalarından itibaren farklı disiplinlerde geliştirilen deneysel yaklaşımlarla şekillenmiştir. Bu erken dö-

nem çalışmalar, doğrudan endüstriyel üretimi hedeflemese de, katmanlı üretim mantığının geometrik ve zihinsel altyapısını oluşturmuştur.

Bu bağlamda en erken örneklerden biri, François Willème tarafından 1860'lı yıllarda geliştirilen fotoskulptür tekniğidir. Willème'in yöntemi, bir nesnenin farklı açılardan çekilmiş fotoğraflarının kullanılmasıyla üç boyutlu formunun yeniden oluşturulmasına dayanmaktadır (Willème, 1860). Mekanik ve manuel sınırlamalara sahip olmasına rağmen bu yaklaşım, bir nesnenin hacimsel bilgisinin kesitsel verilerden türetilileceğini göstermesi bakımından önemlidir. Fotoskulptür, günümüz dijital modelleme ve tersine mühendislik yaklaşımlarının kavramsal öncüllerinden biri olarak kabul edilmektedir.

Katmanlı düşüncenin mühendislik bağlamında daha sistematik bir biçimde ele alınması ise Blather tarafından 1892 yılında geliştirilen topografik modelleme yöntemiyle gerçekleşmiştir. Blather'in çalışmasında, topografik harita verileri temel alınarak, farklı yükseklik seviyelerini temsil eden levhaların üst üste yerleştirilmesiyle üç boyutlu arazi modelleri oluşturulmuştur (Blather, 1892). Bu yöntem, hacimsel bir geometrinin ardışık katmanlar yoluyla inşa edilebileceğini açık biçimde ortaya koyan ilk sistematik yaklaşımlardan biri olarak değerlendirilmektedir.

Yirminci yüzyılın ilk yarısında ise foto-duyarlı malzemelerin geliştirilmesi, katmanlı üretim fikrinin daha teknik bir boyut kazanmasına olanak sağlamıştır. Munz tarafından 1951 yılında patentlenen "photo-glyph recording" yöntemi, saydam bir foto-emülsiyonun katmanlar hâlinde seçici olarak pozlanmasına dayanmaktadır (Munz, 1951). Bu yaklaşım, günümüzde kullanılan vat-fotopolimerizasyon süreçleriyle dikkat çekici benzerlikler taşımakta ve stereolitografi teknolojisinin kavramsal öncüsü olarak kabul edilmektedir.

Bu erken dönem çalışmalar, doğrudan üretim teknolojileri olarak uygulanabilir olmasa da, katmanlı üretimin temel geometrik prensiplerini tanımlamış ve modern eklemeli imalat teknolojilerinin gelişimi için gerekli olan kavramsal zemini oluşturmuştur.

Modern Eklemeli İmalatın Doğuşu (1980–1995)

Eklemeli imalatın modern anlamda ortaya çıkışı, 1980'li yıllarda bilgisayar destekli tasarım (CAD), sayısal kontrol sistemleri ve lazer teknolojilerindeki hızlı ilerlemelerle mümkün olmuştur. Bu dönemde özellikle savunma, havacılık ve yüksek katma değerli mühendislik alanlarında, tasarım verisinin kısa sürede fiziksel prototiplere dönüştürülebilmesini sağlayacak esnek üretim yöntemlerine duyulan ihtiyaç giderek artmıştır.

Bu gereksinim, kalıpsız ve dijital temelli üretim yaklaşımlarının önünü açmıştır.

Modern eklemeli imalatın ilk somut örneği, Charles W. Hull tarafından geliştirilen stereolitografi (SLA) yöntemi olmuştur. Hull, sıvı fotopolimer reçinenin ultraviyole ışıkla seçici olarak sertleştirilmesine dayanan bu yöntemi 1984 yılında tanımlamış ve 1986 yılında patentlemiştir (Hull, 1986). Stereolitografi, bilgisayar ortamında dilimlenmiş kesitlerin ardışık olarak katılaştırılması prensibine dayanmakta ve bu yönüyle dijital modelden doğrudan fiziksel nesne üretimini mümkün kılan ilk gerçek katmanlı üretim sistemi olarak kabul edilmektedir.

Stereolitografinin ardından eklemeli imalat alanındaki ikinci büyük kırılma, Carl Deckard tarafından geliştirilen seçici lazer sinterleme (Selective Laser Sintering, SLS) yöntemiyle gerçekleşmiştir. Deckard ve Beaman, 1988 yılında yayımladıkları çalışmalarda, toz hâlindeki malzemelerin lazer enerjisiyle seçici olarak birleştirilmesini önermiş ve bu yaklaşımı patentlemiştir (Deckard & Beaman, 1988). SLS yöntemi, sıvı reçinelere bağımlı olmaması ve farklı toz malzemelerin kullanılabilmesi sayesinde, eklemeli imalatın malzeme çeşitliliğini önemli ölçüde artırmıştır.

Bu dönemde geliştirilen üçüncü temel yaklaşım ise malzeme ekstrüzyonuna dayanmaktadır. Scott Crump tarafından 1989 yılında geliştirilen ve daha sonra “Fused Deposition Modeling” (FDM) olarak adlandırılan bu yöntem, termoplastik bir filamentin ısıtılarak nozuldan ekstrüde edilmesi ve katmanlar hâlinde biriktirilmesi prensibine dayanmaktadır (Crump, 1989). Görece basit mekanik yapısı ve düşük maliyeti sayesinde FDM, eklemeli imalat teknolojilerinin laboratuvar dışına taşarak daha geniş kullanıcı kitlelerine ulaşmasında belirleyici bir rol oynamıştır.

Stereolitografi, seçici lazer sinterleme ve malzeme ekstrüzyonu gibi bu üç temel teknoloji, eklemeli imalatın modern sınıflandırmasının çekirdek süreçlerini oluşturarak sonraki yıllarda geliştirilen tüm yöntemler bu temel mekanizmaların farklı enerji kaynakları ve malzeme formlarıyla uyarlanması şeklinde evrilmiştir. 1990’lı yılların ortalarına gelindiğinde eklemeli imalat, yalnızca hızlı prototipleme amacıyla kullanılan bir araç olmaktan çıkarak endüstriyel üretimin geleceğini şekillendirecek stratejik bir teknoloji olarak konumlanmaya başlamıştır.

Metal Eklemeli İmalatın Ortaya Çıkışı ve Evrimi (1990–2005)

Eklemeli imalat teknolojilerinin endüstriyel üretim sistemlerine gerçek anlamda entegre olabilmesi, metal malzemelerin güvenilir ve tekrarlanabilir biçimde işlenebilmesiyle mümkün olmuştur. Metal eklemeli imalatın kökenleri, 1990’lı yılların başında seçici lazer sinterleme (Sele-

ctive Laser Sintering, SLS) süreçlerinin metal tozlara uygulanmasına yönelik deneysel çalışmalara dayanmaktadır. Bu alandaki ilk somut adımlardan biri, Manriquez-Frayre ve Bourell tarafından gerçekleştirilmiş olup araştırmacılar bakır ve kalay esaslı metal tozlarının lazer enerjisiyle birleştirilebileceğini göstererek metal bazlı katmanlı üretimin mümkün olduğunu ortaya koymuştur (Manriquez-Frayre & Bourell, 1990).

Bu erken dönem metal SLS uygulamalarında bağlanma mekanizması çoğunlukla kısmi ergime ve katı-katı boyun oluşumu üzerinden gerçekleşmiş, bu durum yüksek porozite ve sınırlı mekanik özelliklerle sonuçlanmıştır. Bununla birlikte söz konusu çalışmalar, metal toz yatağının lazerle seçici olarak işlenebileceğini göstermesi bakımından kritik bir dönüm noktasıdır. 1990'lı yılların ortalarından itibaren lazer gücü, tarama stratejileri ve toz kalitesi alanındaki ilerlemeler sayesinde tam ergitmeye dayalı süreçler geliştirilmeye başlanmış ve bu yaklaşım literatürde seçici lazer ergitme (Selective Laser Melting, SLM) olarak tanımlanmıştır (Kruth et al., 2007).

SLM'nin temel farkı, metal tozlarının tamamen ergitilerek yüksek yoğunluklu ve daha homojen bir mikroyapının elde edilmesidir. Kruth ve çalışma arkadaşları, lazer-malzeme etkileşimini ayrıntılı biçimde inceleyerek ergime havuzu stabilitesinin enerji yoğunluğu, tarama hızı ve katman stratejileriyle doğrudan ilişkili olduğunu göstermiştir (Kruth et al., 2005). Bu bulgular, metal eklemeli imalatın yalnızca geometrik doğruluğa dayalı bir üretim yöntemi olmadığına ek olarak karmaşık ısı ve metalurjik mekanizmalar tarafından belirlenen bir süreç olduğunu açık biçimde ortaya koymuştur.

Aynı dönemde, toz yatağına alternatif bir yaklaşım olarak geliştirilen doğrudan enerji yığılma (Direct Energy Deposition, DED) yöntemleri de metal eklemeli imalatın evriminde önemli bir rol oynamıştır. Kaynak teknolojilerinden türeyen bu sistemlerde metal tel veya metal toz, bir besleme mekanizması aracılığıyla ergime havuzuna doğrudan aktarılmakta ve katmanlar bu şekilde inşa edilmektedir (Mazumder et al., 1997). Bu yaklaşım, özellikle büyük ölçekli parçaların üretimi ve hasarlı bileşenlerin onarımı için yeni uygulama alanları açmıştır.

Eklemleri İmalatta Sayısallaşma, Yazılım ve Veri Merkezli Dönüşüm (2005–Günümüz)

2000'li yılların ortalarından itibaren eklemeli imalat teknolojilerinin gelişimi, yalnızca donanım ve malzeme alanındaki ilerlemelerle sınırlı kalmayarak üretim süreçlerinin giderek daha fazla sayısallaşması ve veri temelli hâle gelmesiyle yeni bir evreye girmiştir. Bu dönem, eklemeli ima-

latin erken yıllardaki makine merkezli karakterinden uzaklaşarak, yazılım, süreç kontrolü ve veri analitiği ekseninde yeniden tanımlandığı kritik bir kırılma noktası olarak değerlendirilmektedir (Kruth et al., 2004; Kruth et al., 2007).

Bu dönüşümün temel bileşenlerinden biri, bilgisayar destekli tasarım yazılımlarının ve sayısal modelleme araçlarının yeteneklerinin önemli ölçüde artmasıdır. Parametrik tasarım ve topoloji optimizasyonu gibi yaklaşımlar, tasarım sürecini klasik geometrik kısıtlardan büyük ölçüde bağımsız hâle getirmiştir. Bu gelişmeler, özellikle “eklemeli imalat için tasarım” (Design for Additive Manufacturing, DfAM) kavramının literatürde yerleşmesini sağlamış ve tasarımın artık üretim süreciyle eş zamanlı olarak ele alınması gerektiğini ortaya koymuştur (Gäumann et al., 2001; Kruth et al., 2004).

Aynı dönemde dilimleme (slicing) yazılımlarının gelişimi, eklemeli imalatın fiilî üretim kalitesi üzerinde belirleyici bir rol oynamaya başlamıştır. Katman kalınlığı, tarama stratejileri, destek yapılarının konfigürasyonu ve enerji girdisi gibi kritik parametrelerin yazılım aracılığıyla kontrol edilebilir hâle gelmesi, süreç tekrar edilebilirliğini artırmış ve operatör bağımlılığını azaltmıştır. Bu durum, eklemeli imalat teknolojilerinin endüstriyel üretim ortamlarına entegrasyonunu hızlandıran temel etkenlerden biri olarak değerlendirilmektedir (Kruth et al., 2007; Carter et al., 2014).

2010’lu yıllarla birlikte sensör teknolojilerinin ve veri toplama altyapılarının eklemeli imalat sistemlerine entegre edilmesi, gerçek zamanlı süreç izleme kavramını ön plana çıkarmıştır. Özellikle metal eklemeli imalatta ergime havuzunun optik ve termal yöntemlerle izlenmesi, süreç sırasında oluşabilecek sapmaların anlık olarak tespit edilmesini mümkün kılmıştır. Craeghs ve çalışma arkadaşları, çevrim içi izleme sistemlerinin süreç kararlılığı ve kalite güvencesi açısından kritik bir rol oynadığını göstermiştir (Craeghs et al., 2011). Benzer biçimde, termografik ölçüm tekniklerinin elektron ışıını ergitme gibi süreçlere uygulanması, süreç dinamiklerinin daha ayrıntılı biçimde analiz edilebilmesine olanak sağlamıştır (Dinwiddie et al., 2013).

Bu veri yoğun üretim ortamı, yapay zekâ ve makine öğrenmesi tabanlı yöntemlerin eklemeli imalata entegrasyonunu da beraberinde getirmiştir. Süreç parametreleri, ergime havuzu davranışı ve ortaya çıkan mikro-yapı arasındaki karmaşık ilişkiler, klasik analitik modellerle tam olarak açıklanamayıp veri temelli yaklaşımlar bu ilişkilerin modellenenebilir ve öngörülebilir hâle getirilmesini mümkün kılmaktadır. Süreç izleme ve-rilerinin modellenmesi ve geri besleme kontrolü yoluyla hataların erken

aşamada tespit edilebileceği, deneysel çalışmalarla açık biçimde ortaya konmuştur (Mireles et al., 2013; Prabhakar et al., 2015).

Günümüzde eklemeli imalat, yalnızca tekil makinelerden oluşan bir üretim yöntemi olmaktan çıkarak dijital tasarım, süreç simülasyonu, gerçek zamanlı izleme ve veri analitiğini kapsayan bütünleşik bir üretim sistemi olarak ele alınmaktadır. Bu bağlamda eklemeli imalatın tarihsel gelişimi, artık yalnızca teknolojik kilometre taşları üzerinden olmayıp, üretim süreçlerinin nasıl sayısallaştığı ve akıllı hâle geldiği perspektifiyle de değerlendirilmektedir (Kruth et al., 2010; Spears & Gold, 2016).

Bu evre, eklemeli imalatın endüstriyel uygunluk seviyesine yaklaştığı ve klasik üretim sistemleriyle karşılaştırılabilir bir mühendislik disiplini olarak konumlandığı bir aşamayı temsil etmektedir. Yazılım, veri ve süreç biliminin bütünleştiği bu yeni dönem, eklemeli imalatın gelecekteki yönünü belirleyen temel dinamiklerden biri olarak kabul edilmektedir.

2. Endüstriyel dönüşüm

Eklemeli İmalatta Terminoloji ve Standartlar

Eklemeli imalat alanının hızlı ve çok yönlü gelişimi, süreçlerin ve kavramların farklı adlandırmalarla anılmasına yol açmıştır. Bu durum özellikle akademik literatürde ve endüstriyel uygulamalarda terminoloji karmaşası yaratmıştır. Teknolojinin erken dönemlerinde “Rapid Prototyping”, “Layered Manufacturing” ve “Solid Freeform Fabrication” gibi terimler yaygın biçimde kullanılmıştır. Bu adlandırmalar eklemeli imalatın ağırlıklı olarak prototipleme odaklı kullanımını yansıtmıştır (Gibson, Rosen, & Stucker, 2010). Ancak eklemeli imalatın fonksiyonel ve yapısal parçaların üretiminde kullanılmaya başlanmasıyla birlikte, daha kapsayıcı ve standart bir terminoloji ihtiyacı ortaya çıkmıştır.

Bu ihtiyaca yanıt olarak ASTM tarafından kurulan F42 Teknik Komitesi ve ISO bünyesindeki ilgili çalışma grupları, eklemeli imalat teknolojileri için ortak bir terminoloji geliştirmiştir. ISO/ASTM 52900 standardı, eklemeli imalatı “malzemenin katmanlar hâlinde birleştirilmesi yoluyla parça üretimi” olarak tanımlamakta ve süreci kullanılan enerji kaynağı ya da malzeme türünden bağımsız, kavramsal bir çerçeveye oturtmaktadır (ISO/ASTM 52900, 2015). Bu standart ile birlikte, teknolojilerin tarihsel veya ticari isimlerinden ziyade süreç mekanizmasını esas alan bir sınıflandırma yaklaşımı benimsenmiştir.

Standartlarda tanımlanan temel süreç sınıfları ise vat-fotopolimerizasyon, toz yatağı füzyonu, malzeme ekstrüzyonu, bağlayıcı püskürtme, doğrudan enerji yığıma ve sac katmanlama başlıkları altında toplanmak-

tadır. Bu sınıflandırma yalnızca terminolojik bir düzenleme sağlamakla kalmamakta, aynı zamanda her bir süreç sınıfının kendine özgü ısı transferi, bağlanma mekanizması ve kalite kontrol gereksinimlerine işaret eden bir çerçeve sunmaktadır (Gibson et al., 2010). Özellikle metal eklemeli imalat, toz yatağı füzyonu ve doğrudan enerji yığıma süreçleri aynı “metal AM” üst başlığı altında yer alsa da, kaynak fiziği ve katılma davranışı açısından belirgin farklılıklar göstermektedir (DebRoy et al., 2018).

Eklemeli İmalatın Endüstriyel Uygulama Alanları

Eklemeli imalat teknolojilerinin endüstriyel uygulamaları, teknolojinin olgunlaşmasıyla birlikte hızlı prototiplemenin ötesine geçerek doğrudan üretim, onarım ve fonksiyonel parça imalatı alanlarına yayılmıştır. Karmaşık geometrilerin üretilebilirliği ve tasarım özgürlüğü, eklemeli imalatı belirli sektörlerde stratejik bir üretim yöntemi hâline getirmiştir (Rosen, 2007).

Havacılık ve uzay sanayi, eklemeli imalatın en erken ve en yoğun kullanıldığı sektörlerden biridir. Bu alanda eklemeli imalatın temel avantajı, parça konsolidasyonu yoluyla montaj adımlarının azaltılması ve yapısal ağırlığın düşürülmesidir. Thompson ve çalışma arkadaşları, eklemeli imalat tabanlı tasarım yaklaşımlarının çok parçalı montajların tek parça hâlinde üretilebilmesine olanak tanıyıp üretim süresi, bakım maliyetleri ve operasyonel güvenilirlik açısından önemli kazanımlar sağladığını göstermiştir (Thompson et al., 2016).

Biyomedikal alanda eklemeli imalat, hasta-özü çözümler sunması açısından önemli bir dönüşüm yaratmıştır. Özellikle ortopedik implantlar ve dental uygulamalarda, hastaya ait anatomik verilerden elde edilen üç boyutlu modeller kullanılarak kişiye özel implantlar üretilebilmektedir. Gözenekli ve kafes yapıları implant tasarımları, kemik dokusu ile mekanik uyumu artırmakta ve biyolojik entegrasyonu desteklemektedir (Murr et al., 2012).

Enerji ve ağır sanayi uygulamalarında ise eklemeli imalat çoğunlukla onarım ve kaplama amaçlı kullanılmaktadır. Doğrudan enerji yığıma süreçleri sayesinde, yüksek maliyetli ve uzun tedarik sürelerine sahip bileşenler yerinde onarılabilir. Bu durum parça değiştirme maliyetlerini ve sistem duruş sürelerini önemli ölçüde azaltmaktadır (Mazumder et al., 1997). Savunma sanayinde ise dijital envanter yaklaşımı sayesinde yedek parça üretiminin sahada veya talep üzerine yapılabilmesi, lojistik bağımlılığı azaltarak operasyonel esneklik sağlamaktadır (Holmström, Partanen, Tuomi, & Walter, 2010).

Endüstriyel Dönüşüm ve Üretim Paradigmasının Değişimi

Eklemeli imalatın endüstriyel sistemler üzerindeki etkisi, yalnızca yeni bir üretim yöntemi sunmasıyla sınırlı değildir. Bu teknoloji, tasarım yaklaşımlarını, tedarik zinciri yapılarını ve ürün yaşam döngüsü kavramlarını köklü biçimde yeniden tanımlamıştır. Özellikle “tasarımdan üretime dijital süreklilik” (digital thread) yaklaşımı, bilgisayar destekli tasarım verisinin doğrudan üretim girdisi hâline gelmesini sağlamış ve geleneksel kalıp-takım bağımlılığını azaltmıştır (Rosen, 2007).

Havacılık sektöründe gerçekleştirilen erken uygulamalar, eklemeli imalatın parça konsolidasyonu yoluyla montaj adımlarını azalttığını ve yapısal ağırlıkta önemli düşüşler sağladığını ortaya koymuştur. Bu gelişme, klasik çok parçalı montaj anlayışından fonksiyonel olarak bütünleşik tek parça tasarım yaklaşımına geçişi hızlandırmıştır (Thompson et al., 2016). Benzer biçimde biyomedikal alanda, hasta-özü implant üretimi sayesinde standart seri üretim paradigmasının dışına çıkmış olup bireysel anatomiye uyumlu, kişiselleştirilmiş tıbbi çözümler mümkün hâle gelmiştir (Murr et al., 2012).

Endüstriyel dönüşümün bir diğer önemli boyutu, tedarik zincirlerinin sadeleşmesidir. Dijital tasarım dosyalarının fiziksel stokların yerini alabilmesi, üretimin talep üzerine ve yerinde yapılmasını mümkün kılmaktadır. Bu yaklaşım, özellikle yedek parça üretiminde lojistik maliyetlerin düşürülmesi ve tedarik sürelerinin kısaltılması açısından stratejik avantajlar sunmaktadır (Holmström, Partanen, Tuomi, & Walter, 2010).

Endüstriyel ve Toplumsal Dönüşüm: Yeni Üretim Paradigması

Eklemeli imalatın yaygınlaşması, üretimin yalnızca teknik boyutu ile sınırlı kalmayıp endüstriyel organizasyon yapısını, iş modellerini ve değer zincirlerini de köklü biçimde dönüştürmektedir. Geleneksel üretim sistemlerinde merkezi fabrikalar ve uzun tedarik zincirleri baskınken, eklemeli imalat dijital tasarım dosyasına dayalı, dağıtık üretim anlayışını mümkün kılmaktadır. Bu yaklaşım, literatürde “doğrudan dijital üretim” (Direct Digital Manufacturing) olarak tanımlanmakta ve üretimin zamansal ve mekânsal kısıtlarını önemli ölçüde azaltmaktadır (Gibson, Rosen, & Stucker, 2010).

Savunma ve havacılık sektörlerinde gerçekleştirilen uygulamalar, kritik parçaların sahada veya talep üzerine üretilebilmesini mümkün kılarak lojistik bağımlılığı azaltmıştır. Bu durum, yalnızca maliyet avantajı sağlamakla kalmayıp aynı zamanda stratejik esneklik ve operasyonel sürdürülebilirlik açısından da önemli kazanımlar sunmuştur (Atzeni & Salmi, 2012). Benzer biçimde enerji ve ulaştırma sektörlerinde, yedek parça

üretimine dijital envanterler üzerinden yönetilmesi, stok maliyetlerini düşürmekte ve sistem sürekliliğini artırmaktadır.

Toplumsal ölçekte değerlendirildiğinde ise eklemeli imalat, tasarım ve üretim arasındaki sınırları bulanıklaştırarak bireylerin yalnızca “tüketici” değil, aynı zamanda “üretici-tasarımcı” rolünü üstlenmesini teşvik etmektedir. Bu dönüşüm, masaüstü yazıcıların yaygınlaşmasıyla başlayan ve daha sonra “maker hareketi” olarak adlandırılan sürecin endüstriyel ölçeğe taşınması olarak yorumlanabilir (Anderson, 2012). Böylece üretim bilgisi ve kapasitesi, büyük ölçekli sanayi kuruluşlarının tekeline çıkarak daha geniş bir kullanıcı kitlesine yayılmaktadır.

3. Eklemeli İmalatın Gelecek Perspektifi: Süreç Entegrasyonu ve Akıllı Üretim

Eklemeli imalat teknolojilerinin gelişimi, yalnızca mevcut süreçlerin kademeli olarak iyileştirilmesiyle sınırlı değildir. Aynı zamanda üretim sistemlerinin bütüncül biçimde yeniden yapılandırılmasını da beraberinde getirmektedir. Özellikle son yıllarda eklemeli imalat süreçlerinin sayısal simülasyon, gerçek zamanlı izleme ve kapalı çevrim kontrol sistemleriyle entegrasyonu, bu teknolojinin endüstriyel olgunluğa ulaşmasında belirleyici bir rol oynamaktadır. Kaynak mühendisliği literatüründe uzun süredir kullanılan süreç izleme yaklaşımlarının metal eklemeli imalata uyarlanmasıyla, ergime havuzu dinamiklerinin üretim sırasında izlenebileceği ve kontrol edilebileceği gösterilmiştir (Craeghs et al., 2011).

Gelecekte eklemeli imalatın en kritik gelişim alanlarından biri, süreç-mikroyapı-özellik ilişkilerinin öngörülebilir hâle getirilmesidir. Katılma teorisi ve faz dönüşüm kinetiği alanındaki klasik çalışmalar, bu yöndeki araştırmalar için güçlü bir teorik temel sunmaktadır (Kurz, Giovanola, & Trivedi, 1986). Bu bağlamda eklemeli imalat süreçlerinin sayısal olarak modellenmesi ve bu modellerin deneysel verilerle doğrulanması, deneme-yanılmaya dayalı yaklaşımın yerini bilimsel temelli süreç tasarımına bırakmasını sağlayacaktır.

Bir diğer önemli eğilim, eklemeli imalatın çok eksenli ve hibrit üretim sistemleriyle bütünleştirilmesidir. Eklemeli ve talaşlı imalat süreçlerinin tek bir platformda birleştirilmesi, hem geometrik doğruluğun artırılmasına hem de yüzey kalitesinin iyileştirilmesine olanak tanımaktadır (Karunakaran et al., 2010). Bu hibrit yaklaşım, eklemeli imalatın klasik “net-shape” üretim anlayışından, “near-net-shape + akıllı son işlem” paradigmasına doğru evrilmesini desteklemektedir.

Buna ek olarak yapay zekâ ve makine öğrenmesi tabanlı yöntemlerin süreç parametrelerinin optimizasyonunda kullanılmaya başlanması, ek-

lemeli imalatın geleceğinde önemli bir kırılma noktası oluşturmaktadır. Ergitme havuzu görüntülerinin ve çoklu sensör verilerinin analiz edilmesiyle, süreç sapmalarının gerçek zamanlı olarak tespit edilip düzeltilebileceği gösterilmiştir (Everton et al., 2016). Bu yaklaşım, özellikle metal eklemeli imalatıta tekrarlanabilirliğin artırılması ve kalite güvencesinin sağlanması açısından kritik öneme sahiptir.

KAYNAKÇA

- Anderson, C. (2012). *Makers: The new industrial revolution*. New York, NY: Crown Business.
- Atzeni, E., & Salmi, A. (2012). Economics of additive manufacturing for end-usable metal parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 62(9–12), 1147–1155. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3878-1>
- Blanthier, J. (1892). *Topographical model making* (U.S. Patent No. 473,901). Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Carter, L. N., Martin, C., Withers, P. J., & Attallah, M. M. (2014). The influence of the laser scan strategy on grain structure and cracking behaviour in SLM powder-bed fabricated nickel superalloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 615, 338–347. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.06.172>
- Craeghs, T., Clijsters, S., Yasa, E., & Kruth, J.-P. (2011). Online quality control of selective laser melting. In *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium* (pp. 212–226).
- Crump, S. S. (1989). *Apparatus and method for creating three-dimensional objects* (U.S. Patent No. 5,121,329). Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- DebRoy, T., Wei, H. L., Zuback, J. S., Mukherjee, T., Elmer, J. W., Milewski, J. O., ... Zhang, W. (2018). Additive manufacturing of metallic components: Process, structure and properties. *Progress in Materials Science*, 92, 112–224. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>
- Deckard, C., & Beaman, J. (1988). *Selective laser sintering of powders* (U.S. Patent No. 4,863,538). Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Dinwiddie, R. B., Dehoff, R. R., Lloyd, P. D., Lowe, L. E., & Ulrich, J. B. (2013). Thermographic in-situ process monitoring of the electron beam melting technology used in additive manufacturing. In *Proceedings of SPIE: Thermosense XXXV* (Vol. 8705). <https://doi.org/10.1117/12.2018412>
- Everton, S. K., Hirsch, M., Stravroulakis, P., Leach, R. K., & Clare, A. T. (2016). Review of in-situ process monitoring and metrology for metal additive manufacturing. *Materials & Design*, 95, 431–445. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.01.099>
- Gäumann, M., Bezençon, C., Canalis, P., & Kurz, W. (2001). Single-crystal laser deposition of superalloys: Processing–microstructure maps. *Acta Materialia*, 49, 1051–1062.
- Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2010). *Additive manufacturing technologies: Rapid prototyping to direct digital manufacturing*. New York, NY: Springer.
- Holmström, J., Partanen, J., Tuomi, J., & Walter, M. (2010). Rapid manufacturing in the spare parts supply chain. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 21(6), 687–697. <https://doi.org/10.1108/17410381011063996>

- Hull, C. W. (1986). *Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography* (U.S. Patent No. 4,575,330). Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- ISO/ASTM 52900. (2015). *Standard terminology for additive manufacturing technologies*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Karunakaran, K. P., Suryakumar, S., Pushpa, V., & Akula, S. (2010). Low cost integration of additive and subtractive processes for hybrid layered manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 26(5), 490–499. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2010.03.008>
- Kou, S. (2003). *Welding metallurgy* (2nd ed.). Hoboken, NJ: Wiley-Interscience.
- Kruth, J.-P., Badrossamay, M., Yasa, E., Deckers, J., Thijs, L., & Van Humbeeck, J. (2010). Part and material properties in selective laser melting of metals. In *Proceedings of ISEM XVI* (pp. 3–14).
- Kruth, J.-P., Froyen, L., Van Vaerenbergh, J., Mercelis, P., Rombouts, M., & Lauwers, B. (2004). Selective laser melting of iron-based powder. *Journal of Materials Processing Technology*, 149, 616–622.
- Kruth, J.-P., Levy, G., Klocke, F., & Childs, T. H. C. (2007). Consolidation phenomena in laser- and powder-bed-based layered manufacturing. *CIRP Annals*, 56(2), 730–759. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2007.10.004>
- Kruth, J.-P., Mercelis, P., Van Vaerenbergh, J., Froyen, L., & Rombouts, M. (2005). Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*, 11(1), 26–36. <https://doi.org/10.1108/13552540510573365>
- Kurz, W., & Fisher, D. J. (1998). *Fundamentals of solidification* (4th ed.). Aedermannsdorf, Switzerland: Trans Tech Publications.
- Kurz, W., Giovanola, B., & Trivedi, R. (1986). Theory of microstructural development during rapid solidification. *Acta Metallurgica*, 34(5), 823–830. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(86\)90056-2](https://doi.org/10.1016/0001-6160(86)90056-2)
- Manriquez-Frayre, J., & Bourell, D. L. (1990). Selective laser sintering of metal powders. In *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium* (pp. 117–123).
- Mazumder, J., Dutta, D., Kikuchi, N., & Ghosh, A. (2000). Closed loop direct metal deposition: Art to part. *Optics and Lasers in Engineering*, 34(4–6), 397–414. [https://doi.org/10.1016/S0143-8166\(00\)00072-5](https://doi.org/10.1016/S0143-8166(00)00072-5)
- Mireles, J., Terrazas, C., Medina, F., & Wicker, R. (2013). Automatic feedback control in electron beam melting using infrared tomography. In *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*.
- Munz, O. J. (1951). *Photo-glyph recording* (U.S. Patent No. 2,775,758). Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Murr, L. E., Gaytan, S. M., Medina, F., Lopez, H., Martinez, E., Machado, B. I., ... Wicker, R. B. (2010). Next-generation biomedical implants using additive manufacturing of complex, cellular and functional mesh arrays. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical*

and Engineering Sciences, 368(1917), 1999–2032. <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0010>

- Prabhakar, P., Sames, W. J., Smith, R., Dehoff, R. R., & Babu, S. S. (2015). Computational modeling of residual stress formation during the electron beam melting process for Inconel 718. *Additive Manufacturing*, 7, 83–91. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2015.06.001>
- Rosen, D. W. (2007). Design for additive manufacturing: A method to explore unexplored regions of the design space. In *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium* (pp. 402–415).
- Rosenthal, D. (1946). The theory of moving sources of heat and its application to metal treatments. *Transactions of the ASME*, 68, 849–866.
- Spears, T. G., & Gold, S. A. (2016). In-process sensing in selective laser melting additive manufacturing. *Integrated Materials and Manufacturing Innovation*, 5, 16–40. <https://doi.org/10.1186/s40192-016-0045-4>
- Thompson, M. K., Moroni, G., Vaneker, T., Fadel, G., Campbell, R. I., Gibson, I., ... Martina, F. (2016). Design for additive manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. *CIRP Annals*, 65(2), 737–760. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.05.004>
- Willème, F. (1860). *Photosculpture*. Paris: Goupil & Cie.

Bölüm 9

ENDÜSTRİDE BAKIM STRATEJİLERİ: SINIFLANDIRMA, UYGULAMA ALANLARI VE KARŞILAŞTIRMALI ANALİZ

Özkan KIZMAZ¹, Ramazan KÖSE²

¹ Kütahya Porselen, ORCID: 0009-0005-3835-1441

² Prof. Dr., Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, ORCID: 0000-0001-6041-6591

Giriş

Endüstriyel tesislerde üretim sürekliliğinin sağlanması, ekipman güvenilirliğinin artırılması ve işletme maliyetlerinin kontrol altında tutulması bakım faaliyetlerinin etkinliğine doğrudan bağlıdır. Günümüzde bakım, yalnızca arızalara müdahale edilen yardımcı bir faaliyet olmaktan çıkarak; üretim verimliliğini, iş güvenliğini ve rekabet gücünü belirleyen stratejik bir yönetim unsuru hâline gelmiştir. Özellikle otomasyon düzeyi yüksek, karmaşık ve sermaye yoğun üretim sistemlerinde plansız duruşların neden olduğu kayıplar, bakım stratejilerinin sistematik ve bilimsel bir yaklaşımla ele alınmasını zorunlu kılmaktadır (Mobley, 2002).

Bu bölümde, endüstride yaygın olarak kullanılan bakım stratejileri sınıflandırılmakta, söz konusu stratejilerin uygulama alanları açıklanmakta ve teknik, ekonomik ve yönetsel kriterler çerçevesinde karşılaştırmalı bir analiz sunulmaktadır. Her bir bakım yaklaşımı, teknik altyapı, işletme koşulları, maliyet yapısı ve risk seviyesi açısından farklı avantaj ve sınırlılıklar sunmaktadır. Bu bölümün amacı, endüstride yaygın olarak kullanılan bakım stratejilerini sınıflandırmak, uygulama alanlarını incelemek ve söz konusu stratejileri karşılaştırmalı olarak analiz etmektir.

1. Bakım Kavramı ve Endüstrideki Önemi

Bakım; bir sistemin, ekipmanın veya tesisin tasarlanan işlevlerini güvenli, verimli ve sürdürülebilir bir biçimde yerine getirebilmesi için gerekli olan teknik, idari ve yönetsel faaliyetlerin tümünü kapsamaktadır. Endüstriyel işletmelerde bakım faaliyetleri; plansız duruşların azaltılması, ekipman ömrünün uzatılması, üretim kayıplarının azaltılması, ürün kalitesinin sürekliliğinin sağlanması ve iş güvenliği açısından kritik bir rol oynamaktadır. Etkin bir bakım yönetimi, yalnızca arıza maliyetlerini değil, aynı zamanda dolaylı üretim kayıplarını ve iş güvenliği risklerini de önemli ölçüde azaltmaktadır.

Geleneksel bakım anlayışında arıza sonrası müdahale esas alınırken, modern endüstride bakım faaliyetleri proaktif ve öngörücü yaklaşımlar doğrultusunda planlanmaktadır. Bu dönüşüm, bakımın yalnızca teknik bir faaliyet değil, aynı zamanda işletme stratejileriyle bütünleşmesini ve karar süreçlerinin veri temelli hâle gelmesini sağlamıştır.

2. Bakım Stratejilerinin Sınıflandırılması

Endüstriyel tesislerde bakım yönetimi, ekipman güvenilirliğinin artırılması, plansız duruşların azaltılması ve bakım maliyetlerinin optimize edilmesi açısından kritik bir rol oynamaktadır. Bakım yönetimi literatüründe yer alan farklı bakım türleri, temel olarak benzer amaçlara hizmet

etseler de uygulama biçimleri, zamanlama kriterleri ve organizasyonel yaklaşımları açısından önemli farklılıklar göstermektedir. Bu nedenle bakım türlerinin bütüncül bir yaklaşımla sınıflandırılması, işletmelerin bakım stratejilerini doğru konumlandırabilmesi açısından önem taşımaktadır. Literatürde bakım türleri genel olarak üç ana kategori altında ele alınmaktadır (EN 13306; ISO 14224).

Birinci ana kategori olan **düzeltilici bakım**, arıza meydana geldikten sonra gerçekleştirilen reaktif müdahaleleri ve arızanın giderilmesine yönelik planlı veya plansız onarım faaliyetlerini kapsamaktadır. İkinci ana kategori olan *koruyucu bakım* ise arıza oluşmadan önce önlem almaya yönelik planlı bakım, duruma bağlı bakım, kestirimci bakım ve kök neden odaklı proaktif bakım yaklaşımlarını içermektedir. Üçüncü ana kategori olan *stratejik ve sistem odaklı bakım yaklaşımları* ise bakım faaliyetlerini tüm üretim sistemiyle bütünleştiren Toplam Verimli Bakım (TPM), kritik ekipmanlara sistematik olarak odaklanan Güvenilirlik Merkezli Bakım (RCM), yalın bakım, risk temelli bakım, tasarım kaynaklı bakım ve Endüstri 4.0 tabanlı modern bakım uygulamaları gibi bütünsel yaklaşımları içermektedir.

Bu yaklaşım sayesinde bakım türleri, fonksiyonel özellikleri ve endüstriyel uygulama derinliklerine göre sistematik bir biçimde düzenlenmiş; böylece işletmeler açısından karşılaştırılabilir ve uygulanabilir bir bakım yönetimi çerçevesi oluşturulmuştur. Endüstriyel bakım türlerinin kapsamlı sınıflandırması, bakım hiyerarşisi çerçevesinde incelenmiş olup, Grafik 1'de sunulan bakım piramidiyle her üç katmandaki bakım türleri detaylı biçimde açıklanmaktadır.

Endüstriyel bakım türlerinin kapsamlı sınıflandırılması sonucunda ortaya konulan bakım hiyerarşisi üç temel katmandan oluşmaktadır. Grafikte en üst katman koyu mavi, orta katman yeşil ve alt katman sarı renk ile gösterilmiştir. Her bir katman, bakım yönetimi literatüründe tanımlanan farklı yaklaşım ve uygulama düzeylerini temsil etmektedir. Katmanlarda yer alan bakım türleri aşağıda akademik literatür doğrultusunda ayrıntılı şekilde açıklanmıştır (Kızmaz, 2025).



Grafik 1. Endüstriyel Bakım Türlerinin Hiyerarşik Sınıflandırılması

Endüstriyel bakım türlerinin kapsamlı sınıflandırılması sonucunda oluşturulan bakım hiyerarşisi üç temel katmandan oluşmaktadır. Şekilde en üst katman koyu mavi, orta katman yeşil ve alt katman sarı renk ile gösterilmiştir. Her katman, bakım yönetimi literatüründe tanımlanan farklı yaklaşım ve uygulama düzeylerini temsil etmektedir. Katmanlarda yer alan bakım türleri, akademik literatür doğrultusunda aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Grafik 1, bakım uygulamalarının öncelik, strateji ve kapsam açısından sistematik bir şekilde sınıflandırılmasını ve yönetilmesini görsel olarak sunmaktadır. Grafikten de görülebileceği gibi endüstriyel bakım hiyerarşisi üç temel katmanda görselleştirilmektedir. En üst katman (koyu mavi), strateji ve sistem odaklı yaklaşımları, özellikle Toplam Verimli Bakım (TPM) ve Güvenilirlik Merkezli Bakım (RCM) modellerini içermektedir; bu katman, bakım faaliyetlerinin kurumsal düzeyde sistematik ve bütünsel bir çerçevede yürütülmesini temsil eder. Orta katman (yeşil), arızaların önlenmesine, ekipman ömrünün uzatılmasına ve sistem performansının artırılmasına yönelik koruyucu ve proaktif bakım türlerini kapsamaktadır. Bu katmanda literatürde proaktif bakım kapsamında sınıflandırılan CBM, Predictive Maintenance, Otonom Bakım, Risk Odaklı Bakım, Akıllı/Dijital Bakım gibi çeşitli yaklaşımlar yer almaktadır (Mobley, 2002). Alt katman (sarı) ise arızanın gerçekleşmesinin ardından

uygulanan düzeltici bakım faaliyetlerini temsil eder ve Reaktif Bakım ile Planlı/Plansız Düzeltici Bakımı içermektedir. Bu hiyerarşi,

2.1 Reaktif Bakım (Arıza Sonrası Bakım)

Reaktif bakım, ekipman veya sistemde meydana gelen bir arıza sonrasında gerçekleştirilen bakım faaliyetlerini ifade etmektedir (Mobley, 2002). Bu stratejide bakım müdahalesi, arıza meydana geldikten sonra yapılmakta olup planlama ihtiyacı sınırlıdır. Başlangıç maliyeti düşüktür ve uygulaması basittir; ancak üretim duruşları ve yüksek onarım maliyeti dezavantajlarıdır. Düşük kritik seviyeye sahip ekipmanlarda ve yedekleme imkânının bulunduğu sistemlerde tercih edilmektedir. Küçük ölçekli metal işleme atölyelerinde, reaktif bakım uygulaması sonucunda ortalama üretim kaybı %12, bakım maliyeti toplam üretim maliyetinin %5'i olarak gerçekleşmiştir (Wireman, 2004). Düşük öncelikli ekipmanlarda uygun bir strateji olmakla birlikte, kritik makinelerde risk büyüktür. Ancak plansız duruş sürelerinin uzunluğu ve beklenmeyen maliyetler, bu yaklaşımın temel dezavantajlarıdır.

2.2 Planlı Bakım (Preventive Maintenance)

Önleyici bakım, ekipmanların belirli zaman aralıklarında veya kullanım çevrimlerine bağlı olarak planlı bir şekilde bakıma alınmasını esas almaktadır (Mobley, 2002). Bu strateji, arızaların meydana gelmeden önce önlenmesini amaçlamakta ve plansız duruşları azaltmaktadır. Ancak gereğinden fazla bakım yapılması durumunda maliyetlerin artması olasıdır. Termik enerji santrallerinde türbin ve pompalar üzerinde uygulanan zaman bazlı bakım, arızalardan kaynaklanan üretim kesintilerini %30 oranında azaltmış ve bakım maliyetlerini öngörülebilir hâle getirmiştir (Wireman, 2004). Kritik ekipmanlarda avantaj sağlamakla birlikte, gereksiz bakım maliyetlerini artırabilmektedir.

2.3 Durum Bazlı Bakım (Condition-Based Maintenance - CBM)

Durum bazlı bakım, ekipmanların anlık durumuna bağlı olarak bakım kararlarının alınmasını esas almaktadır (Jardine, Lin & Banjevic, 2006). Sensörler ve izleme sistemleri aracılığıyla elde edilen veriler, ekipman performansındaki bozulmaların erken aşamada tespit edilmesine olanak tanımaktadır. Petrol rafinerisinde pompaların titreşim ve sıcaklık sensörleri ile izlenmesi sonucunda üretim kesintisi %40 azalmış ve bakım maliyetleri optimize edilmiştir (Lee et al., 2014). Başlangıç maliyeti yüksek olmasına rağmen uzun vadede yatırımın geri dönüşü yüksektir.

2.4 Proaktif Bakım / Güvenilirlik Merkezli Bakım (RCM)

Güvenilirlik merkezli bakım, sistematik bir analiz yaklaşımıyla ekipmanların fonksiyonlarını, arıza türlerini ve bu arızaların etkilerini inceleyerek en uygun bakım stratejisinin belirlenmesini amaçlamaktadır (Smith & Hinchcliffe, 2003; Moubray, 1997). Özellikle güvenlik ve süreklilik açısından kritik sistemlerde etkin bir yöntemdir. Nükleer enerji santrallerinde uygulandığında, sistem güvenilirliği %99,7'ye yükselmiş ve kritik arızalar minimize edilmiştir. Yüksek başlangıç maliyeti gerektirse de, kritik tesislerde yatırımın geri dönüşü güvenlik ve üretim sürekliliği açısından yüksektir.

2.5 Hibrit Yaklaşımlar

Hibrit stratejiler, farklı bakım yaklaşımlarının kombinasyonu ile karmaşık tesislerde optimum maliyet ve güvenilirlik sağlar (Smith & Hinchcliffe, 2003). Otomotiv üretim hattında robotik montaj hatları CBM ile izlenirken, destek ekipmanları planlı bakım ile yönetilmiştir. Sonuç olarak, üretim kesintileri minimize edilmiş ve bakım maliyetleri optimize edilmiştir.

2.6 Toplam Verimli Bakım (TPM)

Toplam verimli bakım, bakım faaliyetlerine tüm çalışanların katılımını esas alan bütüncül bir yaklaşımdır. TPM uygulamaları, ekipman etkinliğini artırmayı ve sıfır arıza hedefini desteklemeyi amaçlamaktadır.

3. Bakım Stratejilerinin Karşılaştırılması

Endüstriyel işletmelerde bakım yöntemi seçimi, yalnızca teknik gereksinimlere değil, aynı zamanda ekipmanın kritikliği, arıza sonuçları, veri erişilebilirliği ve ekonomik kısıtlar gibi çok sayıda stratejik kriterlere dayanmaktadır (Mobley, 2002; Smith & Hinchcliffe, 2003). Bakım stratejilerinin etkin bir şekilde uygulanabilmesi, doğru karar kriterlerinin belirlenmesine bağlıdır. Bu kriterler genellikle şunları içerir:

- **Ekipman Kritikliği:** Üretim duruşu, güvenlik ve kalite üzerindeki etkiler dikkate alınarak belirlenir.
- **Risk Düzeyi:** Güvenlik ve çevresel risklerin yüksek olduğu durumlarda RCM tercih edilir.
- **Veri Erişilebilirliği:** Sensör ve izleme verisi yoksa zaman tabanlı önleyici bakım uygulanır.

- **Analitik Olgunluk:** Gelişmiş veri analitiği mevcutsa kestirimci bakım en uygun seçenektir.
- **Kültürel Uyum:** Çalışan katılımının yüksek olduğu işletmelerde TPM, diğer stratejilerle entegre edilebilir.
- **Maliyet:** Başlangıç ve uzun vadeli bakım maliyetleri, ekipman ömrü ve üretim kayıpları açısından değerlendirilir.
- **Üretim Kesinti Süresi:** Bakım stratejisinin üretim üzerindeki olası etkisi ve arıza süresince oluşacak kayıplar.
- **Ekipman Kritikliği:** Kritik sistemlerde yüksek güvenilirlik, kritik olmayan ekipmanlarda maliyet etkinliği ön plandadır.
- **Teknoloji ve Veri Altyapısı:** CBM ve RCM gibi stratejilerde sensör, veri toplama ve analiz altyapısı gerekliliği.
- **Sistem Güvenilirliği:** Bakım stratejisinin sistem performansını ve sürekliliğini nasıl etkilediği.

Bakım stratejileri; maliyet, arıza riski, veri ihtiyacı ve uygulama zorluğu gibi kriterler açısından karşılaştırılmaktadır. Düzeltici bakım düşük başlangıç maliyetine sahipken yüksek arıza riski taşımaktadır. Kestirimci ve koşula dayalı bakım stratejileri ise yüksek yatırım gereksinimine rağmen uzun vadede daha düşük toplam maliyet sunabilmektedir. Tek bir bakım yaklaşımının tüm sistemler için uygun olmadığını; bakım stratejisinin, ekipman özellikleri ve işletme koşulları dikkate alınarak hibrit biçimde seçilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.



Grafik 2. Bakım stratejileri süreci

Grafik 2’de gösterilen bakım stratejileri süreci, endüstriyel bakım faaliyetlerinin sistematik bir akış içinde nasıl planlandığını ve uygulandığını görsel olarak sunmaktadır (Mobley, 2002). Süreç beş aşamadan oluşur: gözlem, analiz, planlama, uygulama ve değerlendirme. Gözlem aşamasında ekipman performans göstergeleri ve sensör verileri izlenir; reaktif bakımda arıza oluşması beklenirken, durum bazlı ve proaktif stratejilerde arızaların önceden tespiti ön plandadır. Analiz aşamasında toplanan veriler, olası arızaların risklerini belirlemek için değerlendirilir ve CBM/RCM gibi yöntemlerle desteklenir. Planlama aşamasında bakım faaliyetleri organize edilir ve kritik ekipmanlar için zamanlama ile kaynak tahsisi optimize edilir. Uygulama aşaması, stratejiye göre saha müdahalelerini kapsar; reaktif bakım anlık müdahaleyi içerirken, planlı ve CBM/RCM stratejileri önceden belirlenmiş takvime dayanır. Değerlendirme aşamasında ise bakım etkinliği, üretim sürekliliği, maliyet ve risk yönetimi açısından analiz edilerek sonraki döngülerin iyileştirilmesi sağlanır (Lee vd, 2014).

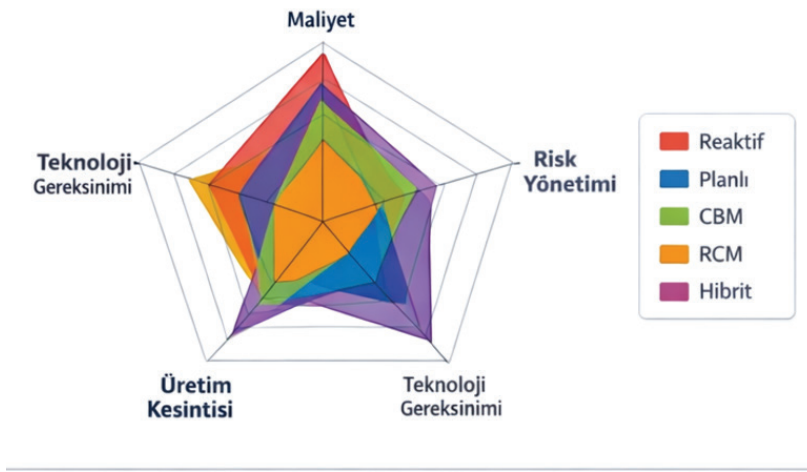
Endüstri 4.0 uygulamaları ve sensör teknolojileri, özellikle gözlem ve analiz aşamalarını güçlendirerek bakım faaliyetlerini daha öngörülebilir ve maliyet etkin hâle getirmektedir. Dijital ikizler ve sensör tabanlı izleme sistemleri, bakım stratejilerini daha esnek ve maliyet etkin yapmaktadır. Ayrıca sürdürülebilirlik ve enerji verimliliği de bakım planlamasında giderek kritik bir kriter haline gelmektedir.

Toplam Verimli Bakım (TPM), doğrudan bir bakım stratejisi olmasa da, tüm bakım türlerini kapsayan ve ekipman güvenilirliği ile üretim verimliliğini artırmayı amaçlayan bütünsel bir yaklaşım olarak, beş temel bakım stratejisinin karşılaştırıldığı Tablo 1 ile Grafik 1’de üst düzey bir yönetim çerçevesi işlevi görür. Tablo ve grafikte gösterilen beş temel strateji bakımın uygulanma yöntemlerini ifade ederken, TPM bakımının yönetim ve organizasyon biçimini temsil eder; bu çerçevede reaktif, planlı veya CBM gibi stratejiler TPM felsefesi altında uygulanabilir. TPM, operatör bakımını, planlı ve durum bazlı bakımı, sürekli iyileştirmeyi ve ekipman eğitimlerini bir araya getirerek bakım faaliyetlerinin bütüncül yönetimini sağlar.

Tablo 1. Bakım Stratejilerinin Karşılaştırılması

Bakım Stratejisi	Maliyet	Üretim Kesinti Süresi	Ekipman Kritikliği	Risk Yönetimi	Teknoloji / Veri Gereksinimi	Sistem Güvenilirliği
Reaktif	Düşük	Yüksek	Düşük	Yüksek	Düşük	Düşük
Planlı	Orta	Orta	Orta	Orta	Orta	Orta
CBM	Yüksek	Düşük	Yüksek	Düşük	Yüksek	Yüksek
RCM	Yüksek	Düşük	Yüksek	Düşük	Yüksek	Yüksek
Hibrit	Orta-Yüksek	Düşük-Orta	Yüksek	Orta-Düşük	Orta-Yüksek	Yüksek

Tablo 1, bakım stratejilerinin maliyet, üretim kesintisi, teknoloji gereksinimi ve risk yönetimi kriterleri açısından karşılaştırmalı analizini sunmaktadır (Mobley, 2002; Smith & Hinchcliffe, 2003). Reaktif bakım, düşük başlangıç maliyeti ve uygulama kolaylığı ile avantaj sağlarken, arızaların öngörülememesi nedeniyle üretim kesintilerini artırmakta ve risk yönetimi açısından sınırlı kalmakta olup uzun vadede dezavantajlıdır. Planlı bakım, üretim kesintilerini öngörülebilir hâle getirerek riskleri azaltmakta birlikte gereksiz bakım faaliyetleri nedeniyle maliyetleri orta düzeyde tutmaktadır. Durum bazlı bakım (CBM) ve Güvenilir merkezli bakım (RCM) stratejileri ise sensör ve veri tabanlı izleme sistemleri ile arızaları önceden tespit ederek maliyet ve risk optimizasyonu sağlamakta böylece, üretim kesintilerini minimize ederek risk yönetimini maksimum düzeye çıkarmaktadır. Sistemin yüksek teknoloji ve veri analitiği altyapısı gerektirmesi dezavantajlıdır (Jardine, Lin & Banjevic, 2006; Lee et al., 2014). Hibrit bakım stratejileri ise farklı yöntemleri bir araya getirerek maliyet, güvenilirlik ve üretim sürekliliği arasında optimum bir denge sunmaktadır. Radar grafiği, stratejilerin güçlü ve zayıf yönlerini görsel olarak özetlerken, çubuk grafik uzun vadeli maliyet ve üretim kesintilerini karşılaştırmalı olarak göstermektedir. Bu analiz, bakım stratejilerinin seçiminde maliyet etkinliği, üretim sürekliliği ve sistem güvenilirliği açısından bilinçli karar alınmasına olanak tanımaktadır (Mobley, 2002; Pintelon & Gelders, 2006).



Grafik 3. Bakım stratejilerinin karşılaştırılması

Radar grafiği olarak da adlandırılan Grafik 3; beş temel bakım stratejisinin maliyet, üretim kesintisi, teknoloji gereksinimi ve risk yönetimi açısından karşılaştırmasını sunmaktadır. Grafiğin analizi, bakım stratejilerinin seçiminde, maliyet etkinliği, üretim sürekliliği ve sistem güvenilirliği açısından bilinçli kararlar alınmasına olanak tanımaktadır. Grafikte yer alan kriterler şu şekilde yorumlanabilir:

1. Maliyet:

- Reaktif bakım, düşük başlangıç maliyeti ile öne çıkarken, RCM ve hibrit stratejiler yüksek yatırım gerektirir.
- Uzun vadeli çubuk grafiği, CBM ve RCM'in başlangıç maliyetlerinin yüksek olmasına rağmen, üretim kesintilerini azaltarak toplam maliyet etkinliğini artırdığını göstermektedir.

2. Üretim Kesintisi:

- Reaktif bakım, arızaların öngörülememesi nedeniyle en yüksek üretim kaybına yol açar.
- RCM, planlı ve durum bazlı bakım stratejileri, üretim kesintilerini minimuma indirir.

3. Teknoloji Gereksinimi:

- Reaktif ve planlı bakım düşük teknoloji gerektirirken, CBM ve RCM yüksek teknoloji ve veri analitiği altyapısı gerektirir.

- Hibrit stratejiler, farklı ekipman tiplerine göre teknoloji gereksinimini dengeler.

4. Risk Yönetimi:

- RCM ve CBM, kritik ekipmanlarda risk yönetimini maksimum seviyeye çıkarır.
- Reaktif bakım, risk yönetimi açısından sınırlıdır ve kritik ekipmanlar için uygun değildir.

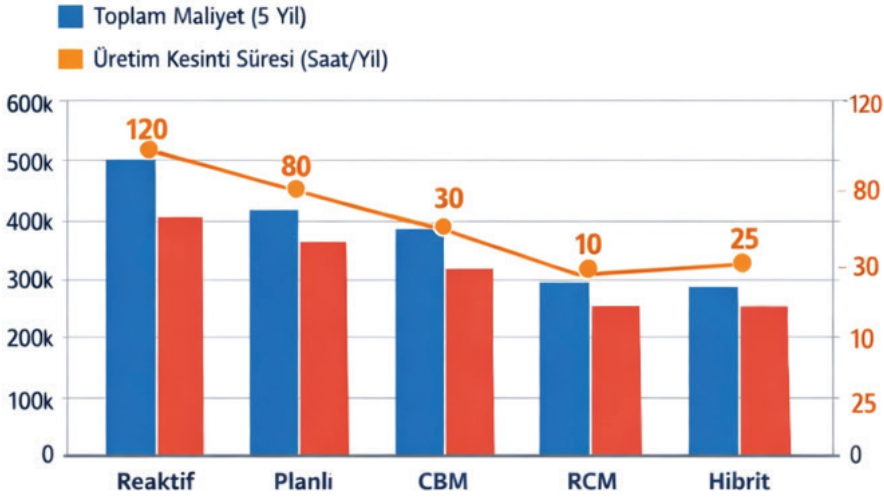
5. Genel Yorum:

- Radar grafiği, her stratejinin güçlü ve zayıf yönlerini görsel olarak özetler.
- Çubuk grafik, maliyet ve üretim kayıplarının uzun vadeli etkilerini net biçimde gösterir.
- Bu kombinasyon, bakım stratejilerinin seçiminde maliyet, güvenilirlik ve üretim sürekliliği açısından bilinçli karar alınmasını sağlar.

Radar grafiği, her stratejinin güçlü ve zayıf yönlerini görsel olarak özetlerken, çubuk grafik uzun vadeli maliyet ve üretim kesintilerini karşılaştırmalı olarak göstermektedir. Bu analiz, bakım stratejilerinin seçiminde, maliyet etkinliği, üretim sürekliliği ve sistem güvenilirliği açısından bilinçli kararlar alınmasına olanak tanımaktadır.

Tablo 2: Stratejilerin Uzun Vadeli Maliyet ve Üretim Etkinliği

Strateji	1 Yıl Maliyet (TL)	5 Yıl Maliyet (TL)	Üretim Kesinti Süresi (saat/yıl)	Yatırım Geri Dönüşü
Reaktif	50.000	300.000	120	Düşük
Planlı	80.000	350.000	80	Orta
CBM	120.000	400.000	30	Yüksek
RCM	200.000	500.000	10	Çok yüksek
Hibrit	150.000	450.000	25	Yüksek



Grafik 4. Bakım stratejilerinin maliyet ve üretim etkinliği

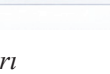
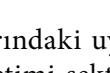
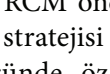
Tablo 2, farklı bakım stratejilerinin hem kısa hem de uzun vadeli maliyetleri ile üretim kesintisi sürelerini karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. Bu analiz, bakım stratejilerinin seçiminde maliyet etkinliği, üretim sürekliliği ve sistem güvenilirliği açısından bilinçli kararlar alınmasına olanak tanımaktadır. Bakım stratejilerinin maliyet ve üretim etkinliğinin verildiği Grafik 4’de ise reaktif bakım düşük başlangıç maliyetine sahip olmasına rağmen, üretim kesintileri ve uzun vadeli maliyetleri yüksek düzeyde gerçekleşmektedir. Planlı bakım, başlangıç maliyeti orta seviyede olmakla birlikte, arıza kaynaklı üretim duruşlarını azaltarak uzun vadede daha dengeli bir maliyet-etkinlik profili sunmaktadır. Durum bazlı bakım (CBM) ve güvenilirlik merkezli bakım (RCM), yüksek başlangıç maliyetine rağmen üretim kesintilerini minimize etmekte ve yatırımın geri dönüşünü uzun vadede artırmaktadır. Hibrit bakım stratejileri, farklı ekipman türlerine uygun yaklaşımları birleştirerek maliyet ve üretim etkinliği arasında optimum denge sağlamaktadır. Bu grafik, bakım stratejilerinin uzun vadeli maliyet ve üretim kesinti performansını görsel olarak özetlemekte ve bakım planlamasında bilinçli, veri destekli karar alınmasına olanak tanımaktadır.

4. Bakım Stratejilerinin Uygulama Alanları

Endüstride bakım stratejileri, üretim sistemlerinin güvenilirliğini artırmak, arıza kaynaklı kayıpları minimize etmek ve maliyet etkinliğini sağlamak amacıyla uygulanmaktadır. Bakım stratejilerinin seçimi; sektör, ekipman kritikliği, üretim tipi ve maliyet yapısına bağlı olarak

değişkenlik göstermektedir. Üretim tesisleri, enerji santralleri, ulaşım sistemleri ve bina yönetimi gibi alanlarda farklı bakım yaklaşımları uygulanmaktadır.

Reaktif bakım, ekipman arızalandığında müdahale edilmesini ifade eder ve düşük başlangıç maliyetiyle avantaj sağlarken, üretim kesintileri ve uzun vadeli maliyetler açısından dezavantajlıdır. Planlı bakım, belirli zaman aralıkları veya kullanım ölçütlerine göre düzenlenen periyodik müdahaleleri kapsar; üretim sürekliliğini artırmakla birlikte gereksiz bakım maliyetlerini artırabilir. Durum Bazlı Bakım (CBM), ekipmanın performans göstergeleri ve sensör verileri ile izlenmesine dayanır ve arızaların önceden tespit edilmesini sağlayarak uzun vadede maliyet etkinliği sunar. Güvenilirlik Merkezli Bakım (RCM), kritik ekipmanlarda arızaların nedenlerini analiz ederek en uygun bakım stratejilerini belirler ve yüksek güvenilirlik sağlar. Hibrit bakım stratejileri ise farklı bakım yöntemlerinin kombinasyonu ile karmaşık tesislerde maliyet, güvenilirlik ve üretim sürekliliği açısından optimum dengeyi hedefler. Bu stratejiler, tesisin türüne, ekipman kritikliğine ve ekonomik önceliklere göre seçilmekte ve işletmelerin bakım performansını artırmada temel bir rol oynamaktadır.

Endüstri	Uygulanan Bakım Stratejileri
Otomotiv ve Makine Üretimi	- Durum Bazlı Bakım (CBM), RCM - Planlı Bakım 
Enerji Sektörü	Planlı Bakım, Durum Bazlı Bakım (CBM) 
Kimya ve Petrokimya	- Durum Bazlı Bakım (CBM), RCM - Durum Bazlı Bakım 
Gıda ve İlaç Endüstrisi	Planlı Bakım 
Binalar ve Tesis Yönetimi	Planlı Bakım 
	Planlı Bakım 

Görsel 5. Bakım stratejilerinin uygulama alanları

Görsel 5, bakım stratejilerinin farklı endüstri alanlarındaki uygulama biçimlerini özetlemektedir. Otomotiv ve makine üretimi sektöründe, kritik ekipmanlarda Durum Bazlı Bakım (CBM) ve RCM öncelikli olarak uygulanırken, destek ekipmanlarda planlı bakım stratejisi tercih edilmektedir (Smith & Hinchcliffe, 2003). Enerji sektöründe, özellikle rüzgar türbini ve pompalar gibi kritik sistemlerde planlı bakım ve CBM stratejileri yaygın olarak kullanılmaktadır (Moblely, 2002). Kimya ve pet-

rokimya tesislerinde, hem CBM hem de RCM stratejileri, üretim güvenliği ve süreç sürekliliği açısından önceliklidir. Gıda ve ilaç endüstrisi ile binalar ve tesis yönetiminde ise planlı bakım stratejileri, düzenli periyodik kontrol ve bakım faaliyetlerini sağlamak amacıyla uygulanmaktadır (Jardine, Lin & Banjevic, 2006). Bakım stratejilerinin sektörel gereksinimlere göre nasıl farklılık gösterdiğini ve her stratejinin hangi uygulama alanlarında öncelikli olarak tercih edildiğini görsel olarak sunmaktadır.

Tablo 3, Bakım stratejilerinin farklı endüstri alanlarındaki uygulama biçimlerini

Bakım Stratejisi	Uygulama Alanı	Ekipman Türleri	Endüstriyel Örnekler
Reaktif Bakım	Kritik olmayan sistemler	Aydınlatma, yardımcı ekipmanlar	Ofis binaları, küçük atölyeler
Planlı Bakım	Zaman bazlı bakım gerektiren sistemler	Konveyörler, filtreler, fanlar	Gıda, tekstil, ambalaj sanayi
Durum Bazlı Bakım	Durum izleme yapılabilen sistemler	Pompalar, motorlar, rulmanlar	Kimya, enerji, proses endüstrisi
Kestirimci Bakım (PdM)	Yüksek kritik ekipmanlar	Türbinler, kompresörler, CNC tezgâhlar	Enerji santralleri, otomotiv
Proaktif (RCM)	Güvenlik ve çevre kritik sistemler	Basınçlı kaplar, acil durum sistemleri	Havacılık, savunma, petrol-gaz
Toplam Bakım	Verimli Operatör katılımının yüksek olduğu tesisler	Seri üretim makineleri	Otomotiv, beyaz eşya

Tablo 4, bakım stratejilerinin sektör, ekipman kritikliği ve işletme hedeflerine göre farklılık gösterdiğini ve uygulamada sıklıkla hibrit yaklaşımların benimsendiğini ortaya koymaktadır.

Tablo 4. Bakım Stratejilerinin Sektör ve Ekipman Bazlı Uygulamaları

Bakım Stratejisi	Tercih Edilen Sektörler	Tipik Ekipmanlar	Tercih Nedeni
Düzeltilici Bakım (CM)	Hizmet sektörü, küçük ölçekli imalat	Aydınlatma sistemleri, basit mekanik ekipmanlar	Düşük kritik seviye, düşük ilk maliyet
Önleyici Bakım (PM)	Gıda, tekstil, ambalaj	Konveyörler, fanlar, filtreler	Planlı bakım ile arıza riskinin azaltılması
Koşula Dayalı Bakım (CBM)	Kimya, enerji, proses endüstrisi	Pompalar, motorlar, rulmanlar	Durum izleme ile bakım optimizasyonu
Kestirimci Bakım (PdM)	Enerji santralleri, otomotiv	Türbinler, kompresörler, CNC tezgâhlar	Arızaların önceden tahmin edilmesi
Güvenilirlik Merkezli Bakım (RCM)	Havacılık, savunma, petrol-gaz	Basınçlı kaplar, güvenlik sistemleri	Güvenlik ve çevresel risklerin azaltılması
Toplam Üretken Bakım (TPM)	Otomotiv, beyaz eşya	Seri üretim makineleri	Operatör katılımı ve sürekli iyileştirme

Tablo 4'te, endüstride yaygın olarak uygulanan bakım stratejilerinin hangi sektörlerde ve hangi ekipman türlerinde tercih edildiği, bu tercihlerin temel gerekçeleriyle birlikte sunulmaktadır. Tablo, bakım stratejisi seçiminde ekipman kritikliği, üretim sürekliliği, güvenlik ve maliyet unsurlarının belirleyici rol oynadığını ortaya koymaktadır.

Düzeltilici bakım stratejisi, arıza meydana gelmesinin üretim süreci ve iş güvenliği üzerinde ciddi bir etki oluşturmadığı, düşük kritik seviyeye sahip ekipmanlarda tercih edilmektedir. Hizmet sektörü ve küçük ölçekli imalat tesislerinde kullanılan aydınlatma sistemleri ve basit mekanik donanımlar, bu yaklaşımın yaygın uygulama alanlarını oluşturmaktadır. Düşük ilk yatırım ve bakım maliyeti, bu stratejinin temel tercih nedenidir.

Önleyici bakım, üretim sürekliliğinin önemli olduğu ancak ileri düzey izleme altyapısının bulunmadığı sektörlerde yaygın olarak uygulanmaktadır. Gıda, tekstil ve ambalaj sanayinde yer alan konveyörler, fanlar ve filtreler gibi ekipmanlarda planlı bakım uygulamaları, arıza riskinin azaltılmasına ve ekipman ömrünün uzatılmasına katkı sağlamaktadır.

Koşula dayalı bakım stratejisi, ekipman durumunun izlenmesine olanak tanıyan ölçüm ve sensör sistemlerinin bulunduğu sektörlerde tercih edilmektedir. Kimya, enerji ve proses endüstrisinde kullanılan pompalar, elektrik motorları ve rulmanlar gibi döner ekipmanlar, durum izleme teknikleri sayesinde daha etkin ve optimize edilmiş bakım faaliyetlerine imkân sunmaktadır.

Kestirimci bakım, arıza maliyetinin yüksek ve ekipman kritikliğinin fazla olduğu sektörlerde uygulanmaktadır. Enerji santrallerindeki türbinler, kompresörler ve otomotiv endüstrisindeki CNC tezgâhlar, gelişmiş veri analitiği sayesinde arızaların önceden tahmin edilebildiği tipik uygulama alanlarıdır.

Güvenilirlik merkezli bakım, güvenlik ve çevresel risklerin ön planda olduğu havacılık, savunma sanayi ve petrol-gaz gibi sektörlerde kritik bir rol üstlenmektedir. Toplam üretken bakım ise operatör katılımını esas alan yaklaşımıyla otomotiv ve beyaz eşya sektörlerinde ekipman etkinliğinin artırılmasına ve sürekli iyileştirme kültürünün yerleşmesine katkı sağlamaktadır.

Endüstriyel işletmelerde bakım yöntemi seçiminde kullanılan karar kriterlerinin karşılaştırılmasının verildiği Tablo 5’de, endüstride uygulanan bakım stratejileri sınıflandırılmış, uygulama alanları açıklanmış ve karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Sonuçlar, tek bir bakım stratejisinin tüm endüstriyel sistemler için uygun olmadığını; ekipman kritikliği, maliyet yapısı ve dijital altyapı düzeyi gibi faktörlerin bakım stratejisi seçiminde belirleyici olduğunu göstermektedir. Endüstriyel işletmelerde bakım yöntemi seçiminde kullanılan karar karar kriterleri, grafikler veya tablolar ile görselleştirildiğinde, her bakım stratejisinin güçlü ve zayıf yönleri ile uygulama alanları daha anlaşılır hâle gelir. Bu karşılaştırmalı analiz, bakım stratejilerinin seçimi ve uygulanmasında sistematik ve bilinçli karar almayı mümkün kılar.

Tablo 5. Endüstriyel işletmelerde bakım yöntemi seçiminde kullanılan karar kriterlerinin karşılaştırılması

Karar Kriteri	Düzeltilici Bakım (Corrective)	Önleyici Bakım (Preventive)	Duruma Dayalı / Kestirimci Bakım (CBM / PdM)
Ekipman kritikliği	Düşük kritikli ekipmanlar	Orta-yüksek kritikli ekipmanlar	Yüksek kritikli ve darboğaz ekipmanlar
Arıza sıklığı	Düşük ve düzensiz	Orta ve öngörülebilir	Yüksek veya üretimi ciddi etkileyen
Arıza etkisi	Üretimi etkiler	sınırlı Kısa süreli duruşlara neden olur	Üretimi tamamen durdurabilir
Bakım maliyeti	Düşük bakım maliyeti, yüksek duruş riski	Orta bakım maliyeti	Yüksek ilk yatırım, düşük uzun vadeli maliyet
Sistem durdurma gereksinimi	Arıza sonrası zorunlu	Planlı duruş gerektirir	Çoğunlukla plansız duruşu önler
Veri ve sensör ihtiyacı	Gerekli değil	Sınırlı	Yüksek (sensör, veri toplama, analiz)
Bakım personeli niteliği	Temel teknik yeterlilik	Orta düzey uzmanlık	Yüksek teknik ve analitik yetkinlik
Yedek parça ve stok ihtiyacı	Arıza sonrası acil ihtiyaç	Planlı stok yönetimi	Tahmine dayalı optimize stok
Üretim stratejisi ile uyum	Esnek üretim sistemleri	Seri ve planlı üretim	Sürekli üretim ve JIT sistemleri
Uygun olduğu işletme profili	Küçük ölçekli, düşük otomasyon	Orta ölçekli sanayi işletmeleri	Büyük ölçekli, yüksek otomasyonlu tesisler

Endüstriyel işletmelerde bakım yöntemi seçimi, yalnızca arıza sıklığına değil; ekipman kritikliği, sistem duruş maliyetleri ve organizasyonel kapasite gibi çok boyutlu kriterlere bağlıdır. Bu kapsamda, bakım stratejisi seçiminde kullanılan başlıca karar kriterleri Tablo 5’de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. (Moubray, 1997; McKone et al., 1999; Zonta et al., 2020).

Endüstriyel işletmelerde bakım yöntemi seçimi, yalnızca teknik gereksinimlere değil, aynı zamanda ekonomik, operasyonel ve stratejik kriterlere dayanmaktadır. Bakım stratejilerinin etkin bir şekilde uygulanabilmesi, doğru karar kriterlerinin belirlenmesine bağlıdır (Moble, 2002; Smith & Hinchcliffe, 2003). Bu kriterler genellikle maliyet, üretim kesinti süresi, ekipman kritikliği, risk yönetimi, teknoloji ve veri altyapısı ile sistem güvenilirliği açısından değerlendirilir. Reaktif bakım, düşük başlangıç maliyeti ve basit uygulama avantajı sunarken, üretim kayıpları

ve yüksek arıza riski nedeniyle uzun vadede dezavantajlı olabilir. Planlı bakım, üretim kesintilerini öngörülebilir hâle getirerek riskleri azaltır, ancak gereksiz bakım maliyetleri oluşturabilir. Durum Bazlı Bakım (CBM) ve Güvenilirlik Merkezli Bakım (RCM) stratejileri, sensör ve veri tabanlı izleme sistemleri ile desteklendiğinde, arızaları önceden tespit ederek maliyet ve risk optimizasyonu sağlar. Hibrit bakım stratejileri ise farklı kriterleri dengeleyerek işletmeye optimum maliyet, güvenilirlik ve üretim sürekliliği sunar (Jardine, Lin & Banjevic, 2006).

Karar kriterleri, grafikler veya tablolar ile görselleştirildiğinde, her bakım stratejisinin güçlü ve zayıf yönleri ile uygulama alanları daha anlaşılır hâle gelir. Bu karşılaştırmalı analiz, bakım stratejilerinin seçimi ve uygulanmasında sistematik ve bilinçli karar almayı mümkün kılar.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, endüstride yaygın olarak uygulanan bakım stratejileri kapsamlı bir biçimde sınıflandırılmış, farklı endüstri alanlarındaki uygulama örnekleri sunulmuş ve stratejilerin maliyet, üretim kesintisi, teknoloji gereksinimi, risk yönetimi ve sistem güvenilirliği açısından karşılaştırmalı analizi yapılmıştır. Elde edilen bulgular, bakım stratejilerinin teknik, ekonomik ve operasyonel açılardan farklı avantaj ve dezavantajlar sunduğunu göstermektedir.

Reaktif bakım, düşük başlangıç maliyeti ve basit uygulama avantajına sahip olmakla birlikte, uzun vadede üretim kesintileri ve yüksek arıza riski nedeniyle maliyetli bir yöntemdir. Planlı bakım, üretim sürekliliğini artırmakta ve arıza risklerini azaltmakta etkili olsa da, gereksiz bakım faaliyetleri maliyetleri artırabilmektedir. Durum Bazlı Bakım (CBM) ve Güvenilirlik Merkezli Bakım (RCM) stratejileri, sensör ve veri analitiği ile desteklendiğinde arızaları önceden tespit ederek maliyet ve risk optimizasyonu sağlamaktadır. Hibrit bakım stratejileri, farklı yöntemlerin kombinasyonu ile maliyet, güvenilirlik ve üretim sürekliliği açısından optimum denge sunarken, TPM ve bütünsel bakım yaklaşımları, bakım faaliyetlerinin sistematik ve entegre bir çerçevede yürütülmesini sağlamaktadır.

ÖNERİLER

1. **Strateji seçimi ekipman ve sistem kritikliği temelinde yapılmalıdır:** Kritik üretim sistemlerinde CBM ve RCM gibi veri odaklı yaklaşımlar, daha düşük öncelikli ekipmanlarda planlı veya reaktif stratejiler tercih edilebilir.

2. **Hibrit bakım uygulamaları teşvik edilmelidir:** Farklı bakım yöntemlerinin kombinasyonu, maliyet, güvenilirlik ve üretim sürekliliği açısından optimum çözüm sağlar.
3. **Dijitalleşme ve sensör teknolojileri entegre edilmelidir:** Endüstri 4.0 uygulamaları, bakım süreçlerini öngörülebilir, hızlı ve maliyet etkin hâle getirmektedir.
4. **Toplam Verimli Bakım (TPM) ve bütünsel yaklaşımlar benimsenmelidir:** Operatör bakımı, sürekli iyileştirme ve ekipman eğitimlerini kapsayan bütünsel uygulamalar, bakım performansını ve üretim verimliliğini artırır.
5. **Sürekli izleme ve veri analizi yapılmalıdır:** Bakım faaliyetlerinin etkinliği, üretim kesintileri ve maliyetler düzenli olarak izlenmeli; bakım stratejileri bu verilere göre güncellenmelidir.

Bu yaklaşım, endüstriyel işletmelerin bakım yönetiminde sistematik, veri odaklı ve bütüncül kararlar almasını mümkün kılmakta, bakım faaliyetlerinin etkinliğini ve üretim verimliliğini artırmaktadır. Grafikler ve tablolarla desteklenen analizler, bakım stratejilerinin karşılaştırmalı değerlendirmesini görsel olarak sunarak uygulamaya dönük rehberlik sağlamaktadır.

KAYNAKLAR

- Ahmad, R., & Kamaruddin, S. (2012). An overview of time-based and condition-based maintenance. *Computers & Industrial Engineering*, 63(1), 135–149.
- Allahyar, A. (2018). Performance analysis of planning and scheduling, preventive maintenance & inventory management for the effectiveness of maintenance management. *Moderating Role of Quality Function Deployment*, 1(1), 15–75.
- Düzakın, E., Demircioğlu, M., & Sezen, B. (2015). Bakım stratejileri ve bekleme hattı modeli ile değerlendirilmesi. *Çukurova Üniversitesi İİBF Dergisi*, 19(1), 45–62.
- EN 13306. (2017, 3 May). *Maintenance – maintenance terminology*. Retrieved from: https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/5af77559-ca38-483a-9310-823e8c517ee7/en-13306-2017?srltid=AfmBOorOyXBzX_P94UIF7LzTamDa-Bhg-6ZxaACJ_NkPy0m_TM0eYuRq.
- ISO 14224. (2016, 13 April). *Petroleum, petrochemical and natural gas industries – Collection and Exchange of reliability and maintenance data for equipment*. Retrieved from: <https://www.iso.org/standard/64076.html>.
- Jardine, A.K.S., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). *A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance*. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(7), 1483–1510.
- Kalkan, H. ve Demir, M. (2020). Seramik sektöründe pres makinelerinde arıza analizi ve bakım planlaması. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 12(3), 410–418.
- Kızmaz, Ö. (2025). *Koruyucu Bakım Yöntemlerinin Değerlendirilmesi ve Endüstride Uygulaması*, Yüksek Lisans Tezi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi
- Lee, J., Wu, F., Zhao, W., Ghaffari, M., Liao, L., & Siegel, D. (2014). *Prognostics and health management design for rotary machinery systems—Reviews, methodology and applications*. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 42(1-2), 314–334.
- McKone, K. E., Schroeder, R. G., & Cua, K. O. (1999). Total productive maintenance: A contextual view. *Journal of Operations Management*, 17(2), 123–144.
- Mobley, R. K. (2002). *An introduction to predictive maintenance* (2nd ed.). London: Butterworth-Heinemann.
- Mobley, R. K., Higgins, L. R., & Wikoff, D. J. (2008). *Maintenance engineering handbook* (7th ed.). London: McGraw-Hill.
- Moubray, J. (1997). *Reliability centred maintenance* (2nd ed.). United Kingdom: Butterworth Heinemann.
- Nakajima, S. (1988). *Introduction to TPM: Total productive maintenance* (1st ed.). London: Productivity Press.
- Nowlan, F. S., & Heap, H. F. (1978). *Reliability-centered maintenance*. U.S. Department of Defense.

- Peng, Y., Dong, M., & Zuo, M. (2010). Current status of machine prognostics in condition-based maintenance: A review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 50, 297–313.
- Pintelon, L., & Gelders, L. (2006). *Maintenance Management: Literature Review and Directions*. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 12(3), 205–238.
- Sharma, A., Yadava, G. S., & Deshmukh, S. G. (2022). Condition-based maintenance using machine learning: A review. *Journal of Manufacturing Systems*, 62, 521–543.
- Smith, R., & Hinchcliffe, G. (2003). *RCM: Gateway to World Class Maintenance*. Elsevier.
- Zonta, T., da Costa, C. A., da Rosa Righi, R., de Lima, M. J., da Trindade, E. S., & Li, G. P. (2020). Predictive maintenance in the industry 4.0: A systematic literature review. *Computers & Industrial Engineering*, 150, 106889.
- Wireman, T. (2004). *Developing Performance Indicators for Managing Maintenance*. Industrial Press.

Bölüm 10

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ TASARIMINDA ANSYS KULLANIMI VE YAPISAL ANALİZ ÖRNEĞİ

Aysu AKILLI ARI¹, Harun YAKA²

1 Dr. Öğr. Üyesi, Amasya Üniversitesi, Merzifon MYO, Makine ve Metal Teknolojisi Bölümü, aysu.akilli@amasya.edu.tr , ORCID: 0000-0002-1252-9417.

2 Doç. Dr., Amasya Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Amasya, Türkiye, harun.yaka@amasya.edu.tr, ORCID:0000-0003-4859-9609

1. GİRİŞ

Günümüzde makine mühendisliği tasarımı, yalnızca geleneksel hesaplama yöntemlerine dayanan bir süreç olmaktan çıkarak sayısal analiz, bilgisayar destekli modelleme ve yüksek doğruluklu simülasyon teknikleriyle bütünleşmiş bir yapıya dönüşmüştür. Bu dönüşümün merkezinde yer alan ANSYS, kapsamlı analiz modülleri, geniş fizik tabanlı çözümleri ve kullanıcı dostu arayüzü sayesinde modern mühendislik uygulamalarının temel araçlarından biri hâline gelmiştir. Makine tasarımında kullanılan bileşenlerin, sistemlerin ve mekanizmaların karmaşıklığının giderek artması; güvenilirlik, verimlilik ve maliyet optimizasyonu gereksinimleri; mühendisleri daha hızlı, daha güvenli ve daha ucuz tasarım yaklaşımlarına yöneltmiştir. Bu bağlamda ANSYS, sanal prototipleme imkânı sunarak fiziksel prototip ihtiyacını azaltmakta, tasarım döngülerini hızlandırmakta ve daha doğru sonuçlara ulaşmayı mümkün kılmaktadır.

Makine mühendisliğinde malzeme davranışları, sınır koşulları, yük türleri ve geometrik karmaşıklıklar oldukça çeşitlidir. Bu çeşitlilik, tasarım kararlarının doğruluğunu doğrudan etkiler. ANSYS, sonlu elemanlar yöntemi (FEM), hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD), elektromanyetik analizler, ısı transferi simülasyonları gibi farklı çözüm tekniklerini aynı platformda bir araya getirerek tasarım sürecine bütünsel bir yaklaşım sunmaktadır. Bu sayede bir makine tasarımcısı, örneğin yalnızca bir makine elemanının statik dayanımını görmekle kalmayıp aynı bileşenin ısı etkiler altındaki davranışını, titreşim karakteristiklerini, yorulma ömrünü ve akış etkileriyle ilişkili performansını da değerlendirebilmektedir.

Bu bölümün amacı, makine mühendisliği tasarımında ANSYS kullanımının tasarım sürecine, doğruluk seviyesine, maliyet etkinliğine, optimizasyon olanaklarına ve mühendislik karar verme mekanizmalarına olan etkilerini kapsamlı bir biçimde incelemektir. Bölüm kapsamında ANSYS'in temel çalışma yaklaşımı, makine mühendisliği uygulamalarındaki rolü, modül bazlı analiz teknikleri, tasarım optimizasyonu süreçleri ve endüstriyel örnek uygulamalar detaylı biçimde ele alınmıştır. Ayrıca çalışmada örnek bir yapısal analiz uygulaması yapılmıştır. Makine mühendisliği alanında

ANSYS kullanımının sağladığı avantajların yanı sıra, bu programın sınırlılıkları, kullanıcı bağımlılığının analize etkisi ve doğrulama-doğrulama (verification & validation) süreçlerinin önemi analiz örneğiyle birlikte sunulmuştur. Böylece okuyucuya hem teknik hem de metodolojik açıdan bütünlük bir bakış açısı sağlanması hedeflenmektedir.

1.1. ANSYS'in Makine Mühendisliği Tasarımındaki Yeri

Makine mühendisliği tasarımı; malzeme bilimi, mekanik, termodinamik, akışkanlar mekaniği ve matematiksel modelleme gibi disiplinlerin üretim hedefleri çerçevesinde birleştirildiği çok yönlü bir süreçtir. Gelecekteki tasarım döngüleri genellikle uzun test periyotları, yüksek prototip maliyetleri ve tekrar eden doğrulama çalışmaları gerektirirken, CAE yazılımlarının gelişimi bu süreci önemli ölçüde dönüştürmüştür. ANSYS, bu dönüşümün merkezinde yer alarak mühendislerin gerçek çalışma koşullarını fiziksel testlere ihtiyaç duymadan simüle edebilmesine olanak tanır (Moaveni, 2020).

Sistemin karmaşıklığı arttıkça farklı fiziksel süreçlerin eş zamanlı olarak modellenmesi zorunlu hâle gelmektedir. ANSYS'in çoklu fizik (multi-physics) yaklaşımı; yapısal, termal, akışkan ve elektromanyetik süreçlerin birbirleriyle etkileşim hâlinde ele alınmasını sağlar. Bu özellik yalnızca analiz doğruluğunu artırmakla kalmaz, aynı zamanda tasarım varyasyonlarının daha hızlı değerlendirilmesini mümkün kılar. Endüstride bu yetenek özellikle otomotivde çarpışma dayanımı, savunma sanayisinde balistik davranış, havacılıkta aerodinamik yükler ve enerji sektöründe ısı transferi konularında yaygın olarak kullanılmaktadır (Cook, vd., 2018).

1.2. Yapısal Analiz ve Malzeme Davranışlarının İncelenmesi

Makine parçalarının maruz kaldıkları gerilme ve şekil değiştirmelerin doğru modellenmesi, tasarım güvenilirliğinin temelini oluşturur. ANSYS Mechanical, lineer elastisite teorisinin ötesine geçerek doğrusal olmayan malzeme davranışlarını, temas problemlerini ve büyük deformasyon içeren sistemleri karmaşık çözüm algoritmalarıyla analiz edebilir. Özellikle metal alaşımlarındaki elastik-plastik davranış, kompozit malzemelerdeki anizotropik özellikler ve kauçuk benzeri elastomer malzemelerdeki hiperelastik modeller, ANSYS'in sık kullanılan malzeme modelleri arasında yer almaktadır (ANSYS Inc., 2023).

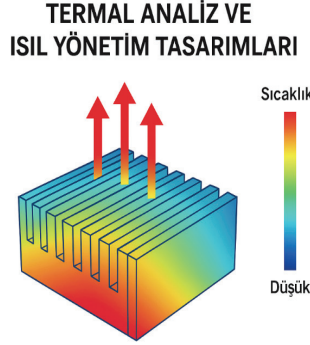
Ayrıca yorulma analizlerinin tasarım üzerindeki önemi giderek artmaktadır. Tekrarlı yüklemeye maruz kalan makine parçalarında S-N eğrileri, Goodman ve Gerber kriterleri gibi yorulma teorileri ANSYS ortamında uygulanarak parçanın ömür tahmini yapılabilir. Bu yöntem özellikle krank milleri, yaylar, dişliler ve robotik mafsallar gibi yüksek çevrimli yüklemeye altın çalışan bileşenlerde kritik öneme sahiptir (Budynas ve Nisbett, 2020).

Temas analizleri de yapı mühendisliğinin önemli bir bölümünü oluşturur. Sürtünmeli temas, yüzey pürüzlülüğü ve cıvata bağlantılarındaki

gerilme dağılımı gibi konular, geleneksel el hesap yöntemleriyle güvenilir şekilde çözümlenemeyebilir. ANSYS'in temas algoritmaları hem statik hem de dinamik temas problemlerini gerçekçi bir şekilde modelleyerek sürtünme kuvvetleri, gerilme konsantrasyonları ve potansiyel kopma bölgeleri hakkında ayrıntılı bilgiler sağlar.

1.3. Termal Analiz ve Isıl Yönetim Tasarımları

Modern makine tasarımında ısı yönetim, performans kadar emniyet açısından da belirleyici bir parametre hâline gelmiştir. Termal yüklerin artması, malzemelerin mekanik dayanımını doğrudan etkilediğinden sıcaklık dağılımının doğru tahmin edilmesi gereklidir. ANSYS'in termal çözüm modülü, iletim, taşınım ve radyasyon mekanizmalarını bir arada değerlendirebilen karmaşık enerji denklemlerini çözebilir (Incropera ve DeWitt, 2019).



Şekil 1. Termal analiz ve ısı yönetim tasarımları analizi

Örneğin enerji üretim sektöründe türbin kanatları yüksek sıcaklıklara maruz kalmakta ve bu bölgelerde ısı gerilmeler ciddi bir yorulma mekanizması oluşturmaktadır. ANSYS, bu tür uygulamalarda hem akıştan kaynaklanan konvektif ısı transferini hem de malzeme içi ısı iletimini eş zamanlı çözerek kanadın kritik bölgelerinin belirlenmesini sağlar. Benzer şekilde plastik enjeksiyon proseslerinde kalıp içi sıcaklık döngüsünün analiz edilmesi, ürün yüzey kalitesini ve döngü süresini etkilediğinden tasarım açısından büyük önem taşır.

Elektronik bileşenlerin ısı tasarımı da ANSYS'in sık kullanıldığı alanlardan biridir. Güç kartlarında, invertörlerde ve motor sürücülerinde ısınan elemanların uygun soğutma stratejileri belirlenirken malzeme ısı özellikleri, hava akımı ve geometrik yerleşim ANSYS termal analizleriyle optimize edilebilir (Yıldız, 2021).

1.4. Akışkan-Mekanik Etkileşimi (FSI) ve CFD Tabanlı Tasarım Yaklaşımları

Akışkanlar mekaniği ve katı cisimler arasındaki etkileşim, makine mühendisliğinde birçok uygulamanın temelini oluşturur. ANSYS Fluent, yüksek çözünürlüklü CFD analizleri ile türbülans modellemesi, çok fazlı akışlar, kimyasal reaksiyonlar ve ısı transferi gibi karmaşık akış problemlerini çözmek için kullanılmaktadır (ANSYS Inc., 2023).

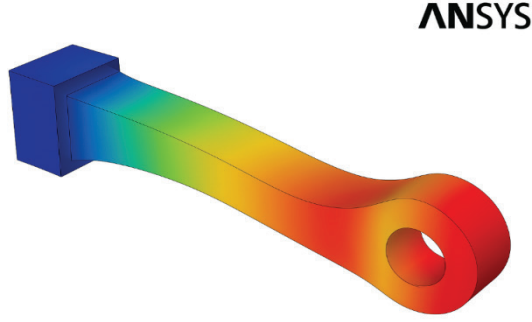
FSI analizleri, akışkanın yapı üzerinde oluşturduğu basınç ve kesme gerilmelerinin, yapının deformasyonu ile geri besleme ilişkisini kurar. Örneğin valf tasarımlarında akış, valf gövdesi üzerinde deformasyona yol açabilir; bu deformasyon da akış alanını değiştirerek sistemin kararlılığını etkileyebilir. ANSYS, bu tür çift yönlü etkileşimleri çözmek için Fluent ve Mechanical modülleri arasında veri alışverişi yaparak zaman tanımlı çözümleme gerçekleştirebilir (Versteeg ve Malalasekera, 2019).

CFD tabanlı tasarım özellikle ısı değiştirici geometrilerinin optimizasyonunda, pompalarda kavitasyon olasılığının değerlendirilmesinde, hava araçlarının kanat profili geliştirmesinde ve otomotiv aerodinamiğinde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Sınır tabaka davranışları, basınç dağılımları ve akış ayrılma bölgeleri, tasarım kararlarını doğrudan etkilediğinden ANSYS bu alanlarda yüksek doğruluk sunmaktadır.

1.5. Titreşim, Modal Analiz ve Dinamik Davranışların Belirlenmesi

Titreşim ve dinamik analizler, mekanik sistemlerin hem güvenliği hem de performansı üzerinde belirleyici rol oynar. Özellikle dönen makine elemanlarında dinamik kararsızlıklar, rezonans durumları ve gürültü problemleri önemli riskler doğurabilir. ANSYS modal analiz araçları sayesinde sistemin doğal frekansları, mod şekilleri ve sönüm karakteristikleri ayrıntılı şekilde belirlenebilir (Rao, 2021).

ANSYS, doğrusal olmayan dinamik problemlerin çözümünde de gelişmiş formülasyonlar kullanır. Büyük deformasyonlar, darbe yükleri ve zaman tanımlı değişken kuvvetler, transient structural modülü kullanılarak analiz edilebilir. Örneğin bir otomobil süspansiyonunun çukur üzerinden geçerken maruz kaldığı darbe yükü veya robotik bir kolun ani durma hareketinde oluşan atalet etkileri bu modülle yüksek doğrulukla modellenir.

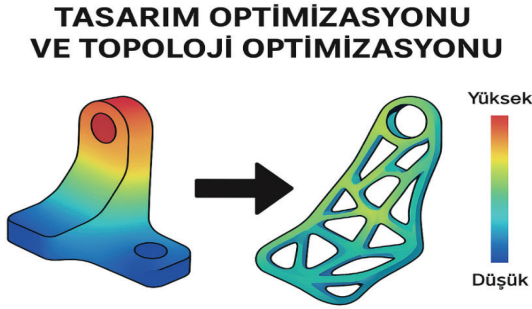


Şekil 2. Üç Boyutlu modal analiz görselleştirilmesi

Harmonik analizler ise dönen sistemlerde dengesizlik, rulman hataları veya rezonans riskleri gibi sorunları önceden tespit etmek için kullanılır. Böylece bakım planlaması kolaylaşır ve sistem verimliliği artırılır.

1.6. Tasarım Optimizasyonu ve Topoloji Optimizasyonu

Günümüz endüstrisinde tasarım yalnızca dayanım üzerine değil, aynı zamanda maliyet, ağırlık, enerji verimliliği ve üretilebilirlik gibi faktörler üzerine kurgulanmaktadır. ANSYS'in parametrik optimizasyon araçları, tasarım değişkenleri ile performans çıktıları arasındaki ilişkiyi analiz ederek en uygun tasarım sonuçlarını elde etmeyi sağlar. Yanıt yüzeyi yöntemi (RSM), genetik algoritmalar ve gradyan tabanlı yaklaşımlar bu süreçte kullanılan temel yöntemler arasındadır (Haftka ve Gürdal, 2012).



Şekil 3. Topoloji optimizasyonu

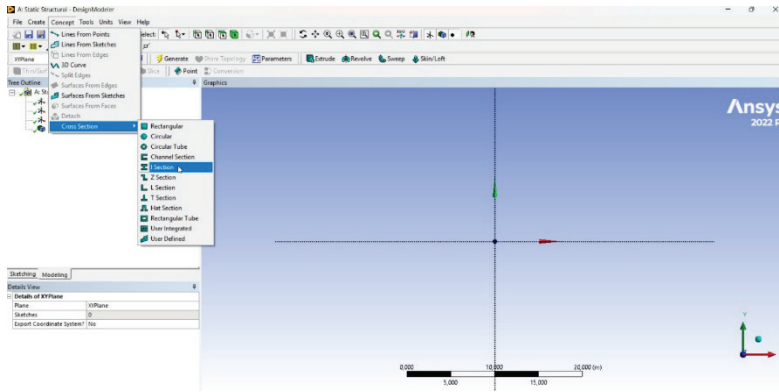
Topoloji optimizasyonu ise daha ileri bir tasarım yaklaşımı sunar. Bu yöntemde mühendis parçanın çalışma koşullarını tanımlar, ANSYS ise belirli bir hacim içinde dayanımı en yüksek, malzeme kullanımını en az yapacak geometriyi üretir. Havacılıkta hafifletilmiş destek yapıları, oto-

motivde çarpışma bölgelerinde dayanımı artırılmış taşıyıcı elemanlar ve medikal alanda biyomekanik implant tasarımları topoloji optimizasyonunun önemli uygulama alanlarıdır (Bendsoe ve Sigmund, 2019).

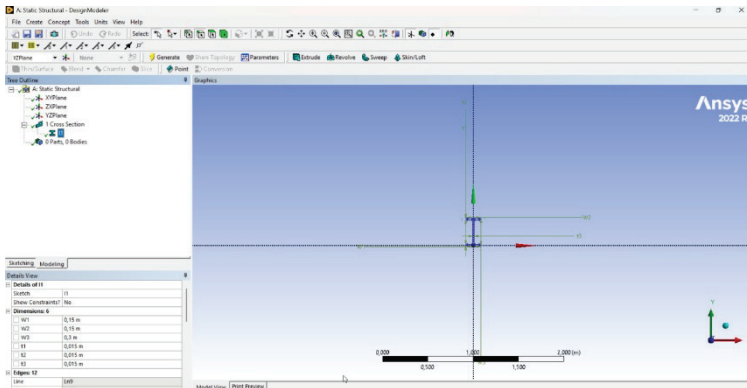
Optimizasyon sürecinin üretim teknolojileriyle entegrasyonu, özellikle eklemeli imalatın (additive manufacturing) yükselişiyle birlikte yeni tasarım paradigmalarının ortaya çıkmasını sağlamıştır. ANSYS, bu tür özgür geometrilerin üretilebilirliğini de analiz ederek tasarımın tüm yaşam döngüsü boyunca güvenilir şekilde sürdürülmesine katkı sağlamaktadır.

2. ANSYS'de Yapısal Analiz (Static Structural) Örneği

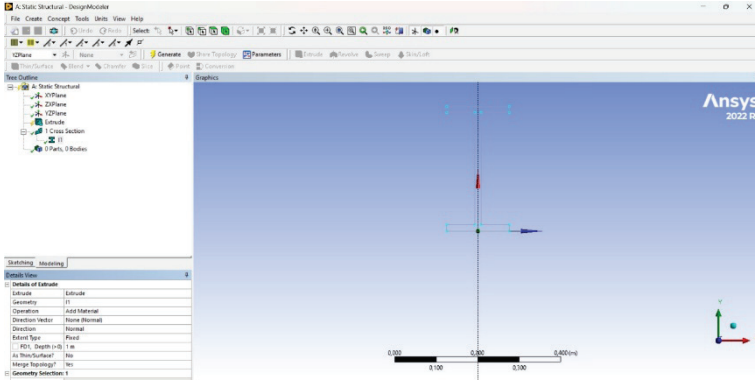
Yapısal analiz için ANSYS programı kütüphanesinde bulunan I profil modeli seçilmiştir. I profil 15 mm et kalınlığında ve 30 mm yüksekliğinde belirlenmiştir. Ayrıca profil uzunluğu Extrude komutu ile 1000 mm olarak belirlenmiştir (Şekil 4, 5, 6,7). Profil malzemesi olarak yapısal çelik seçilmiş ve boyutlandırılan profilin ağırlığı 67.118 kg olmuştur.



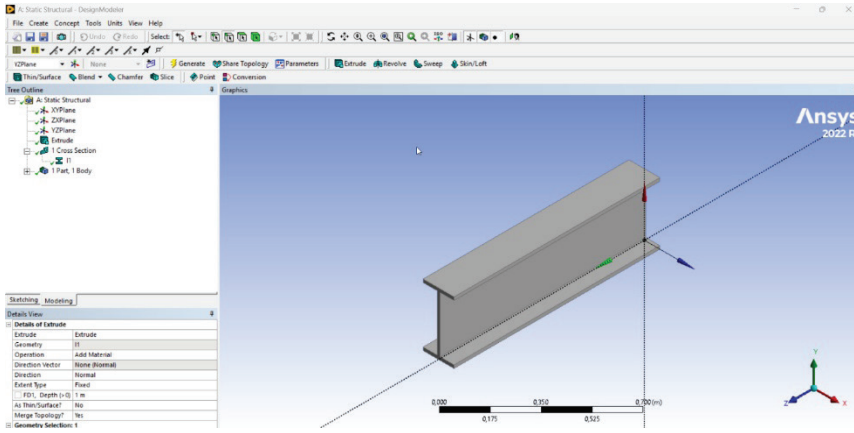
Şekil 4. Geometri oluşturmak için I profil seçimi



Şekil 5. I profilin boyutlarının ayarlanması

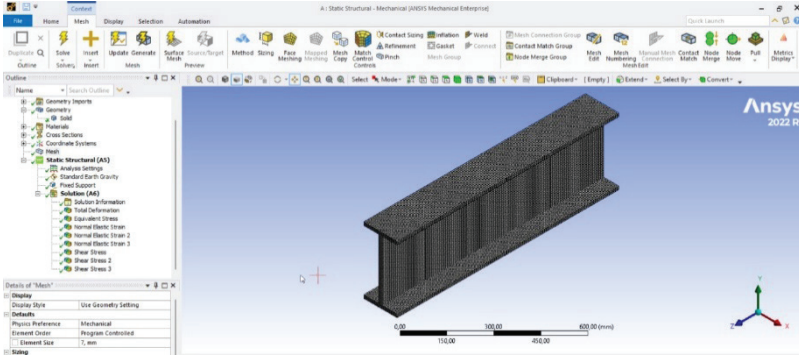


Şekil 6. I profile Extrude ile uzunluk verilmesi



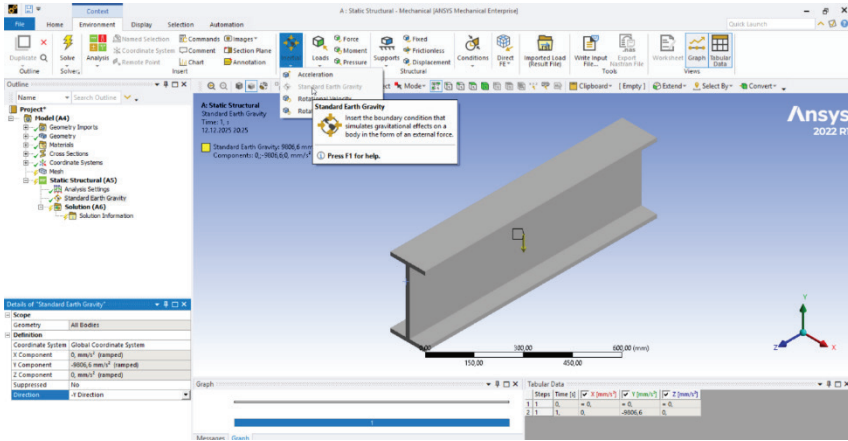
Şekil 7. Oluşturulan I profil geometrinin son hali

Oluşturulan profil geometrisine analiz öncesi mesh işlemi yapılmıştır. Mesh işleminde daha sağlıklı bir analiz için eleman boyu 7 mm ve altıgen (hexa) biçimli olarak belirlenmiştir. Bu parametrelerde 30030 eleman sayısına sahip mesh uygulanmıştır. Şekil 8’de mesh işlemi gösterilmiştir.



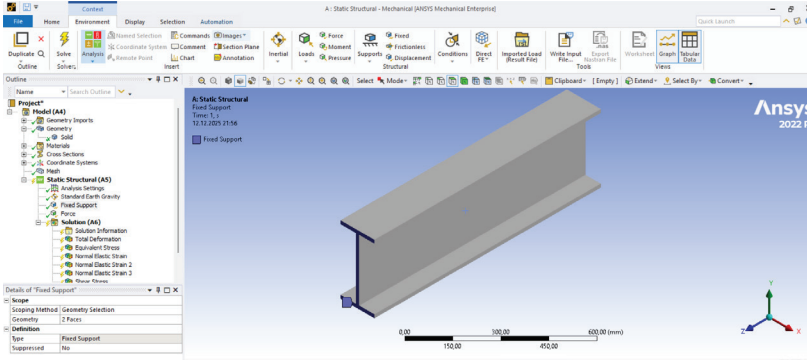
Şekil 8. I profile mesh atama işlemi

Mesh işleminin ardından yer çekimini tanımlamak için profilin tam ortasına ağırlık merkezi atanmıştır. Şeklin tasarımına göre -y yönünde yer çekimi kuvveti tanımlanmıştır (Şekil 9).



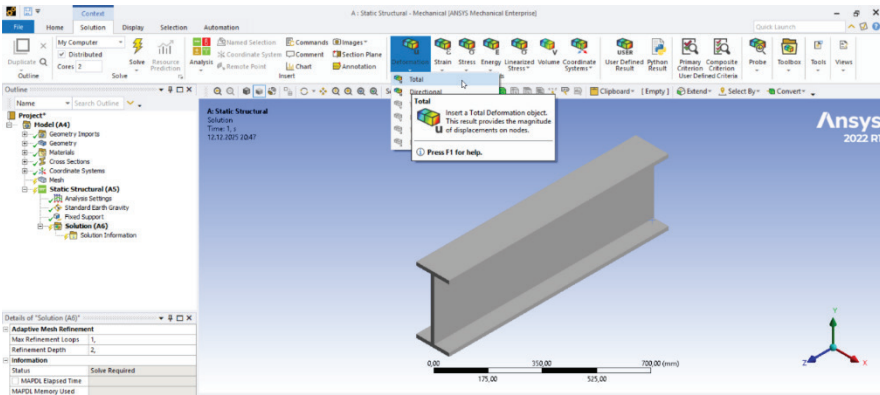
Şekil 9. Profile ağırlık merkezi ve yer çekimi tanımlanması

Profil, kuvvet uygulanmadan önce sabitlenmesi gerekir. Model çalışma koşullarına göre uygun yerlerden sabitlenmelidir. Bu çalışmada model her iki uçtaki yüzeylerden sabitlenmiştir. Sabitleme işlemi Şekil 10'da verilmiştir.



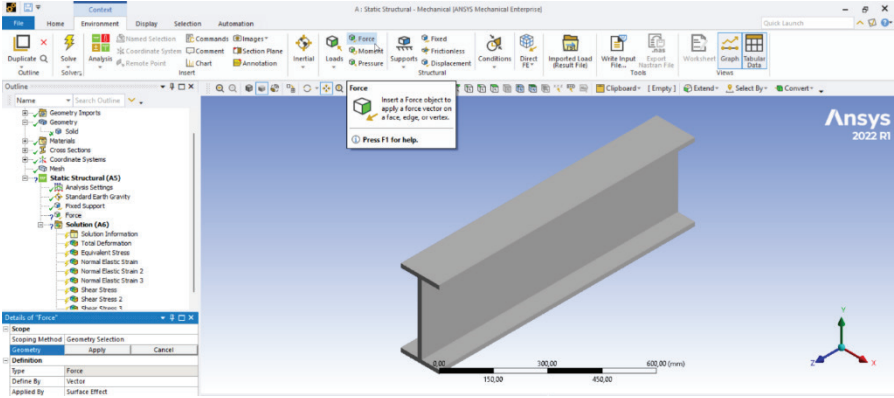
Şekil 10. Profilin kuvvet uygulanmadan önce sabitlenmesi

Bu aşamada sabitlenen profil için uygulanacak analiz çeşitleri seçilir. Toplam deformasyon (Deformation), gerilme (Strain) ve gerilim (Stress) seçeneklerinden yapmak istediğimiz analize göre seçim yapılabilir. Bu analizde sadece toplam deformasyona bakılmıştır. Şekil 11'de toplam deformasyon analizi seçimi yapılmıştır.

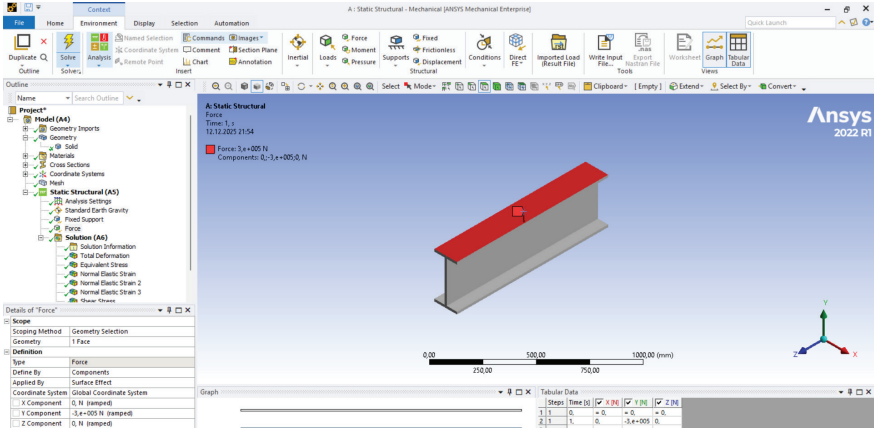


Şekil 11. Sayısal çözümleme için toplam deformasyon seçimi

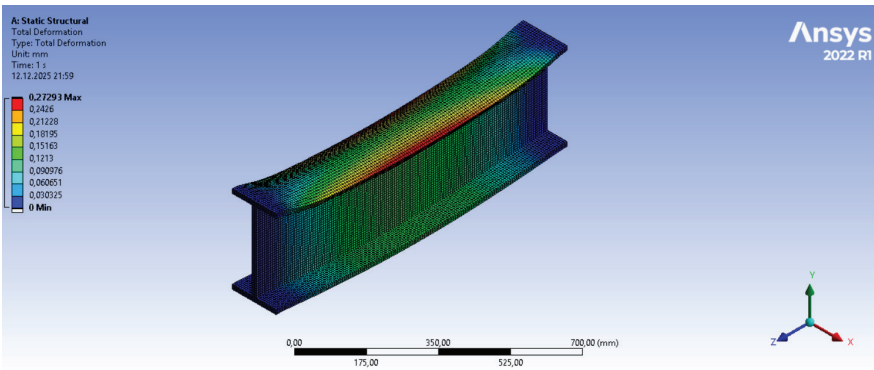
Sayısal analiz yöntemi belirlendikten sonra model üzerinde kuvvet uygulanacak yer ve kuvvet ayarları yapılır. Şekil 12'de parçaya uygulanacak kuvvet yeri belirlenirken Şekil 13'te uygulanacak kuvvet yönü ve miktarı belirlenir. I profilin konumuna göre -y yönünde ve profilin üst orta noktasından -300 kN kuvvet uygulanmıştır.



Şekil 12. I profile kuvvet uygulanan yerin belirlenmesi



Şekil 13. I profile uygulanan kuvvetin miktarının ve yönünün belirlenmesi



Şekil 14. I profilede oluşan toplam deformasyon

Sayısal çözümleme sonunda profilde meydana gelen toplam deformasyon Şekil 14'te verilmiştir. Renk skalasında en fazla deformasyon oluşan bölgeler kırmızı, en az deformasyon olan bölgeler mavi renkte görülmektedir. En büyük deformasyon yaklaşık 0.27 mm olmuştur. En fazla deformasyon profilin üst kısmında ve orta bölgenin kenarlarında gerçekleşmiştir.

3. SONUÇ

ANSYS, makine mühendisliği tasarım sürecinde yalnızca bir analiz aracı olmanın ötesine geçerek mühendislik karar mekanizmasının merkezinde yer alan kapsamlı bir platform hâline gelmiştir. Yapısal, termal, akışkan, dinamik ve optimizasyon analizlerini bütünlük bir yapıda sunması, günümüz mühendislik problemlerinin çok boyutlu yapısına doğrudan karşılık vermektedir.

ANSYS'in sunduğu çözümler sayesinde tasarım döngüsü hızlanmakta, fiziksel prototip ihtiyacı azalmakta ve tasarım alternatifleri daha düşük maliyetle daha kısa sürede değerlendirilebilmektedir. Gelişmiş algoritmaların sunduğu sayısal doğruluk, mühendislerin kritik tasarım kararlarını bilimsel temellere dayandırmasını kolaylaştırmaktadır.

Gelecekte yapay zekâ destekli simülasyonların daha fazla önem kazanmasıyla, ANSYS'in optimizasyon ve öngörülse mühendislik araçlarının tasarım süreçlerini daha da otomatik hâle getireceği öngörülmektedir. Böylece hem akademik araştırmalarda hem de endüstriyel uygulamalarda ANSYS, yüksek doğruluk gerektiren her alanda temel bir bileşen olarak varlığını sürdürecektir.

KAYNAKLAR

- ANSYS Inc. (2023). ANSYS Fluent Theory Guide.
- ANSYS Inc. (2023). ANSYS Mechanical User's Guide.
- Bendsoe, M., Sigmund, O. (2019). Topology Optimization: Theory, Methods and Applications, *Springer*.
- Budynas, R., Nisbett, J. (2020). Shigley's Mechanical Engineering Design, McGraw-Hill.
- Cook, R. D. (2018). Principal components, sufficient dimension reduction, and envelopes. *Annual Review of Statistics and Its Application*, 5, 533-559.
- Haftka, R., Gürdal, Z. (2012). Elements of Structural Optimization, *Springer*.
- Incropera, F., DeWitt, D. (2019). Fundamentals of Heat and Mass Transfer, *Wiley*.
- Moaveni, S. (2020). Finite Element Analysis Theory and Application with ANSYS, *Pearson*.
- Rao, S. S. (2021). Mechanical Vibrations, *Pearson*.
- Versteeg, H., Malalasekera, W. (2019). An Introduction to Computational Fluid Dynamics, *Pearson*.
- Yıldız, C. (2021). Termal Analizlerde Sonlu Elemanlar Yönteminin Kullanımı, *Makine Teknolojileri Dergisi*.

Bölüm 11

KESTİRİMCİ BAKIMDA TİTREŞİM, SICAKLIK VE YAĞ ANALİZİ YÖNTEMLERİNİN TEORİK KARŞILAŞTIRMASI

Ali İhsan ENGÜR¹

¹ Dr. Öğr. Gör. Ali İhsan ENGÜR Kocaeli Üniversitesi, Gölcük MYO, Makine Bölümü, ali.engur@kocaeli.edu.tr ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0124-5491>

1. Giriş

Endüstri 4.0 ile sistem güvenilirliği, ani duruşlardan kaçınma, ambar-da stok azaltımı gibi önleyici ve yer açıcı uygulamalar kestirimci bakım gibi önleyici sitemlerin önemini bir kat daha arttırmıştır. Kestirimci bakım, makina elemanlarının arızalarını meydana gelmeden önce tahmin etmeye yönelik bir stratejidir. Bu çalışmada, üç temel kestirimci bakım yöntemi olan titreşim analizi, sıcaklık izleme ve yağ analizi teorik açıdan karşılaştırılmıştır. Her yöntemin fiziksel özellikleri, sistem ana datası, avantajları ve sınırlılıkları ele alınmıştır.

Endüstriyel tesislerde kullanılan döner makineler, pompalar, türbinler ve redüktörler zamanla aşınma, balanssızlık (eksenel ve dönel) gibi nedenlerle zamanla aşınma, çatlama gibi zararlara maruz kalır.. Bu zararların erken tespiti, plansız duruşların önlenmesi açısından kritik öneme sahiptir. Kestirimci bakım, problardan elde edilen sinyallerin analizi yoluyla makine sağlık durumunu değerlendirir. Üç temel yaklaşım öne çıkar: titreşim analizi, sıcaklık (termal) analizi ve yağ analizi. Bu yöntemlerin birlikte kullanılması, daha doğru tahmin ve daha az yanlış alarm olasılığı sağlar.

Engür'ün (2007) Denizli Bakım Teknolojileri Kongresi'nde sunduğu Kestirimci Bakımda kalite anlayışının bakım takvimlerine ve MTBF Analizine Etkisi isimli bildiride, kestirimci bakım uygulamalarının kalite yönetimi üzerindeki etkiler ve bu etkilerin MTBF hesaplamaları ve bakım planlaması üzerindeki sonuçları analiz edilmektedir. Araştırma, bakım süreçlerini titreşim temelli izlemenin pratik sonuçlarını ortaya koymaktadır. Uluslararası literatürde Jardine, Lin ve Banjevic (2006), kestirimci bakım ve durum izleme yöntemlerine ilişkin kapsamlı bir derleme sunmuş; titreşim, termal ve yağ analizi yöntemlerinin prognostik yaklaşımlardaki önemini vurgulamıştır. Randall (2011), rulman arızalarının titreşim imzalarını inceleyerek özellikle spektral demodülasyon ve envelope analizi tekniklerinin FFT çözüm yöntemleri temeli ile prensiplerini açıklamıştır. Sıcaklık analizi alanında Balakrishnan vd., (2022), infrared termografinin elektriksel ve mekanik ekipmanlarda kullanımını değerlendirmiş; çevresel etkiler, emisyon katsayısı ve hata teşhis doğruluğuna ilişkin kapsamlı bir inceleme sunmuştur. Yağ analizinde Zhao vd., (2021), triboelektrik nanogeneratör tabanlı gerçek zamanlı yağ durum izleme sensörlerinin, kontaminasyon ve aşınma partiküllerini hızlı biçimde tespit edebildiğini göstermiştir.

2. Titreşim Analizinin Teorik Temelleri

Titreşim analizi, sistemin dinamik davranışlarını inceleyen bir yöntemdir. Döner elemanların dengesizliği yani balanssızlık, rulman hata-

ları veya dişli bozuklukları, sistemin doğal frekanslarında belirgin genlik artışlarına neden olur. Matematiksel olarak bir mekanik sistemin serbest titreşimi şu diferansiyel denklemle ifade edilir:

$$m \ddot{x}(t) + c \dot{x}(t) + kx(t) = F(t)$$

Burada;

m: kütle(Mass)

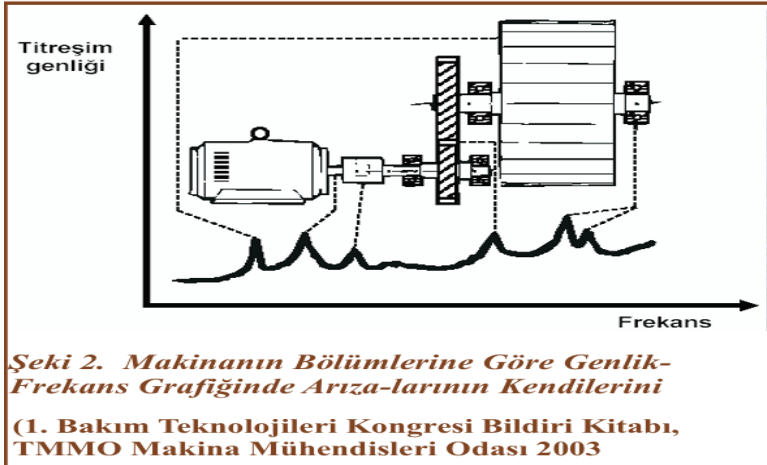
c: sönüm katsayısı (damping Coefficient)

k: yay sabiti (Koefficient)

F(t): Uygulanan Kuvvet (Force)

x(t): yer değiştirmedir (X-axis displacement)

Fourier analizi ile titreşim sinyalleri frekans düzleminde incelenir. Titreşim analizi özellikle dönel mekanik parçaların arızalarında yüksek doğruluk sağlar, ancak yağlama veya termal sebepli bozukluklarda sınırlı kalabilir. Titreşim analizinde problemlerdeki ivme ölçerlerden gelen frekans ve amplitüd grafikleri her bir eleman için farklı frekanslarda farklı genliklerin incelenmesi ile ortaya çıkar. Mesela Balanssızlık 1X RPM’de genlik artışı, rulman arızaları yüksek frekanslarda karıncalanma şeklindeki genlikler, kayış kaskat sistemleri sistem çalışma frekansındaki genlik artışı ile belirlenir.



Resim 1. Makinaların bölümlerine göre genlik frekans grafiğinde arızaların gözüktüğü frekanslar

Resim 1. 'da gözüktüğü gibi makinanın çalışma frekansı ilk yatakta meydana gelir. Burada makinenin çalışma frekansı olarak adlandırılacaktır.

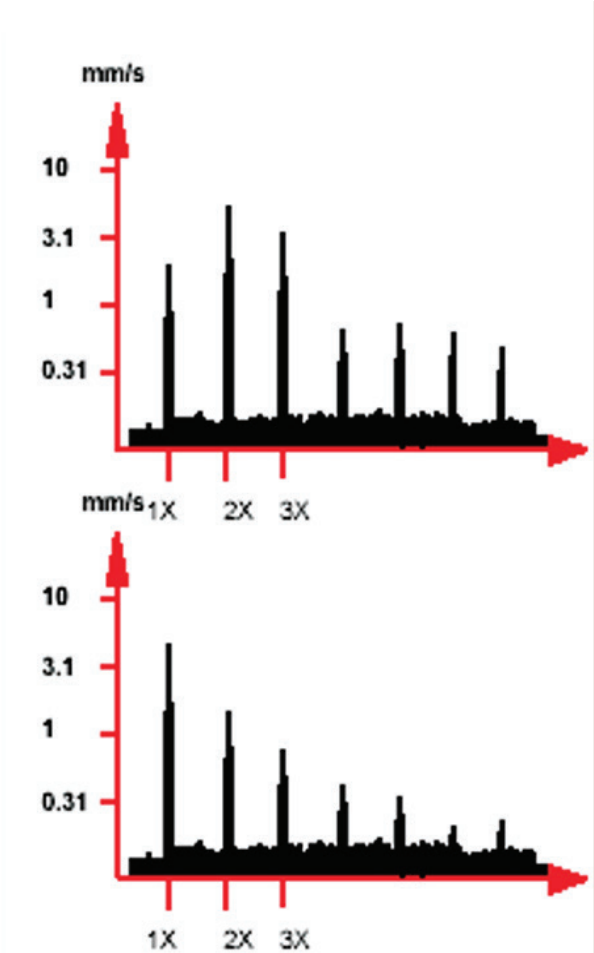
ğımız 1XRPM frekansında balanssızlık gözükür. 2XRPM ve harmoniklerinde genlik artışları gözükürken yine mekanik gevşeklik kat sayılarının tam olmasına bağlı kalmaksızın bu bölgede kendini gösterir. Yüksek frekanslarda ise bir rulman arızasından bahsedebiliriz. Örneğin bir rulmanda iç bilezik arızası olsun. Bu iç bilezikten 10 adet bilyenin geçtiğini düşünelim makinenin çalışma frekasında tek pik olacakken rulman dan gelen farklı frekans sayısı 10 adet olacaktır. Ayrıca oluşan çukurdan geçebilmek için bilyeler hızlanacak ve anlık frekanslarında artış olacaktır. Tüm bu sebeplerden dolayı rulmanlar yüksek frekanslarda küçük pikler ile kendilerini gösterirler.



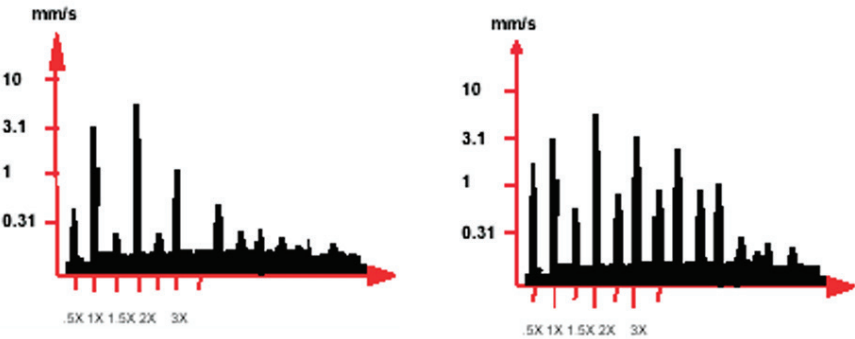
Resim 2. Balanssızlığın frekans grafiğinde gözükmesi

Resim 2. de gözüktüğü gibi balanssızlık 1X RPM’de meydana gelir. Resim 3. De ise eğer balanssızlığın amplitüdü yüksek ise yan bandlarda (2XRPM, 3XRPM) pikler gözükür. Burada çalışma frekansı ve katlarında gözükten ardışık pikler bize balanssızlığı verir.

Balanssızlık 1XRPM yani çalışma frekansında oluşan makinenin kütle merkezi ile çalışma merkezinin birbirini tutmaması olarak tanımlanabilir. Burada oluşacak amplitüd makinenin çalışma frekansında ortaya çıkacak olup modellemesi bu frekans ile sabit kalmakta ancak bir veya 2 kat yan frekanslara sıçrayabilmektedir. Bu da bize özellikle 1XRPM frekansında oluşan yüksek bir amplitüd ve 2XRPM ve 3XRPM frekanslarında takip eden amplitüdlere şeklinde kendini gösterir. Ayrıca bu yataktan alınan ilk amplitüd makinenin doğru ve sorunsuz bir şekilde montajlanmasından sonra ilk çalışması akabinde alınan amplitüd değeri ise makinenin sorunsuz çalışma genliğini verir ve sonraki titreşim ölçümleri için orijin kabul edilerek trend analizine olanak sağlar



Resim 3. Balanssızlık frekansının harmonikleri



Resim 4. Mekanik Gevşeklik

Resim 4'te ise sistemde oluşan mekanik gevşeklik kendisini yarım harmoniklerde gösterir. Eğer düzensiz harmonikler oluştuysa ve 1XRPM çevresinde yoğun bir piklenme söz konusuysa gevşek temel ya da makinenin montajında temele takozlanması sorun var demektir.

Titreşim Kaynağı	Baskın Titreşim Frekansı	Ölçüm Yönü	Faz İlişkisi	Genlik
Kütle Dengesizliği	1xRPM	Radyal	Aynı noktada yatay dikey arasında 90°	Sabit
Eğik Şaft	1xRPM	Eksenel	Yataklar arası fark 180°	Sabit
Ekzantirik Motor Rotoru	1xRPM	Radyal		Hareketli
Statik Balanssızlık	1xRPM	Radyal	Radyalde iki yatakta aynı	
Dinamik Balanssızlık	1xRPM	Radyal	Eksenelde ve Radyalde 180°	

Resim 5. Farklı frekanslarda oluşan ölçüm yönü, faz ilişkisi

Resim 5'te ise yapılan ölçüme göre makinenin çalışma frekansında ortaya çıkan fazlar verilmektedir.

Titreşim Kaynağı	Baskın Titreşim Frekansı	Ölçüm Yönü	Faz İlişkisi	Genlik
Paralel	1x,2x,3x RPM	Radyal	Radyalde 180°	Sabit
Açısal	1x,2x,3x RPM	Eksenel	Eksenelde 180°	Sabit
Her ikisi	1x,2x,3x RPM	Radyal ve/veya Eksenel	180°	Sabit
Kaymalı yataklar	1x,2x,3x RPM	Radyal ve/veya Eksenel	Eksenelde 180°	
Bilyalı yataklar	1x,2x,3x RPM ve 30-60 bin RPM	Eksenel	Eksenelde 180°	

Resim 6. Titreşim kaynağına göre arızaların gözükceği frekanslar

Resim 6'da oluşan titreşimlere göre, hangi arızanın hangi frekansta ve hangi yönde oluşacağı görülmektedir

3. Sıcaklık Analizinin Teorik Temelleri

Sıcaklık analizi, sistem bileşenlerinin termal farklılıklarını izler. Termal kameralar veya sabit sensörlerle elde edilen sıcaklık verileri, malzeme aşınması ve enerji kayıplarına dair bilgi verir. Temel prensip, ısı iletimi denkleminde dayanır:

$$\rho c_p \partial T / \partial t = k \nabla^2 T + Q$$



Resim 7. Bir motor çalışırken yatağından sıcaklık ölçümü

Aşırı sıcaklık artışı, genellikle sürtünme veya elektriksel yüklenme kaynaklıdır. Termal analiz, sistemin elektriksel ve mekanik yük dengesini doğrudan ölçmediği için dolaylı bir ön kestirmeye dayalı veri sağlar.

4. Yağ Analizinin Teorik Temelleri

Yağ analizi, triboloji bilimine dayalı olarak kullanılan makinaların içindeki sürtünme, aşınma düzeylerini ölçer. Spektrometrik analiz, partikül sayımı veya viskozite ölçümü gibi yöntemlerle yağın kimyasal yapısı incelenir. Aşınma partiküllerinin boyutu ve tipi, rulman veya dişli yüzeyindeki bozulmayı gösterir. Yağ analizi özellikle yavaş dönen sistemlerde titreşim analizine kıyasla daha güvenilir sonuçlar verir. Yağ analizinde incelenen yağ içerisindeki partiküller direk gözlemlenebildiği için güvenilir kesin sonuçlar elde edilir. Aşınma sonucu yağın temas ettiği malzemenin yağın içerisindeki miktarı ve büyüklükleri bu aşınma hakkında bize güvenilir veriler verir. Ancak bu inceleme yağın, makina elemanlarında oluşan zarar sonrasında incelendiği için zarar anının ilerisinde

bir süreçte gecikmeli olarak karşımıza çıkar. Bu yüzden bu yöntem direkt kullandığımız bir yöntem olamamalı, titreşim analizine ek bir yöntem olarak kullanılmalıdır.



Resim 8. Bir motorun yatağından alınan yağ ile içerisindeki partikül analizi

Yağ analizi; yağ içerisindeki partiküllerin yoğunluğu, büyüklüğü, şekli ve yağda oluşan vizkozite değişikliği sistemde yağlama problemleri sebebiyle oluşabilecek mekanik zararların erken tespitini sağlar. Bu analizler yağda oluşabilecek kimyasal ve fiziksel değişiklikleri inceleyerek sürtünme ve dolayısı ile aşınma ayrıca termal bozulmayı ortaya çıkarır. Bu sayede bakım aralıkları artar, makine parçalarının kalan ömürleri öngörülebilir, plansız duruşlar önlenir ve daha küçük bir stok alanı ile çalışılabilir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta analizin hangi makina elemanından alınan yağda yapıldığına önem verilmesidir. Örneğin rulmanlı bir yataktan alınan yağ incelendiğinde demir partiküllerdeki artış veya bronz gibi bakır ihtiva eden bileşenlerden ortaya çıkılacak yükseliş rulmandaki aşınmayı gösterir. Analiz ettiğimiz yağda bulunan su, yakıt veya soğutma sıvısı gibi dış kaynaklardan gelen harici meteryaller yağın işlevini azaltacağından düzenli yağ analizi hem ekipman sağlığı açısından hem de bakım stratejileri için önemlidir.

5. Yöntemlerin Teorik Karşılaştırması

Yöntem	Titreşim Analizi	Sıcaklık Analizi	Yağ Analizi
Fiziksel Temel	Dinamik sistem tepkisi	Isı iletimi	Tribolojik süreçler
Ölçüm Tipi	İvme, hız, yer değişimi	Termal enerji (IR)	Kimyasal ve partikül analizi
Tepki Süresi	Anlık	Yavaş-orta	Sonradan
Uygulama Alanı	Döner makineler	Elektrik motorları, yataklar	Yağlı sistemler
Avantaj	Erken arıza tespiti	Kolay izleme	Yağ sağlığı bilgi
Sınırlılık	Yağsız sistemlerde etkisiz	Yüzey ölçümüne bağlı	Numune alma

Tablo 1. Kestirimci bakım yöntemlerinin karşılaştırması

6. Sonuç

Titreşim, sıcaklık ve yağ analizi yöntemleri, kestirimci bakımın temel çözüm yöntemleridir. Teorik olarak, titreşim analizi mekanik arızaları erken aşamada, sıcaklık analizi termal yük değişimlerini, yağ analizi ise aşınma sürecini gösterir. Kapsamlı bir kestirimci bakım stratejisi, bu üç yöntemin entegre biçimde uygulanmasıyla elde edilebilir. Kestirimci bakım yapacağımız makinelerin yük taşıma, yağlanma şekli, elektrik yükü gibi özelliklerine göre bu yöntemler kombine olarak kullanılmalıdır.

Kaynakça

- Engür, A. İ. (2007). Kestirimci bakımda kalite anlayışının bakım takvimlerine ve MTBF analizine etkisi. **Bakım Teknolojileri Kongresi** (BTK 2007) Tam Metin Bildiri, Denizli, Türkiye, 21 Ekim 2007, (Sa. 453), 207–212.
- Engür, A. İ. (2007). Titreşim analizi ile kestirimci bakım yaklaşımları. **Mühendis ve Makina**, 48(570), 27–31.
- Ahuett-Garza, H., & Kurfess, T. (2018). Smart manufacturing: Past research, present findings, and future directions. **Journal of Manufacturing Systems**, 48, 165–175.
- Alabdulkarim, A., & Ball, P. (2022). Predictive maintenance strategy selection using reliability-centered maintenance and digital twins. **International Journal of Production Research**, 1–18.
- Bai, X., Song, H., & Jiao, L. (2021). Intelligent fault diagnosis for rotating machinery using deep learning: A review. **Mechanical Systems and Signal Processing**, 150, 107254.
- Cinar, E., Kalay, S., & Saricicek, I. (2022). A predictive maintenance system design and implementation for intelligent manufacturing. **Machines**, 10(11), 1006.
- de Araujo, A. P., & Lopes, I. (2018). Reliability modeling and MTBF optimization in industrial maintenance. **Reliability Engineering & System Safety**, 176, 248–255.
- Ersöz, O. Ö., et al. (2025). Makine öğrenmesi ile kestirimci bakım ve yedek parça yönetimi. **Politeknik Dergisi**, 28(5), 1327–1338.

Bölüm 12

YENİLENEBİLİR ENERJİ VE TEKNOLOJİK İNOVASYON

*Namık AK*¹

*Selman SEZER*²

*Nurettin ÇEK*³

¹ İstanbul Beykent Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Çevre Koruma Teknolojileri Bölümü, İstanbul, Türkiye, namikak@beykent.edu.tr, ORCID: 0000-0001-9119-1567

² Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği, Elazığ, Türkiye, sesezer07@gmail.com, ORCID: 0009-0001-4920-7323

³ Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Teknolojileri, Ankara, Türkiye, nurettincek@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6120-9228
OSTİM Teknik Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri, Ankara, Türkiye, nurettin.cek@ostimteknik.edu.tr

GİRİŞ

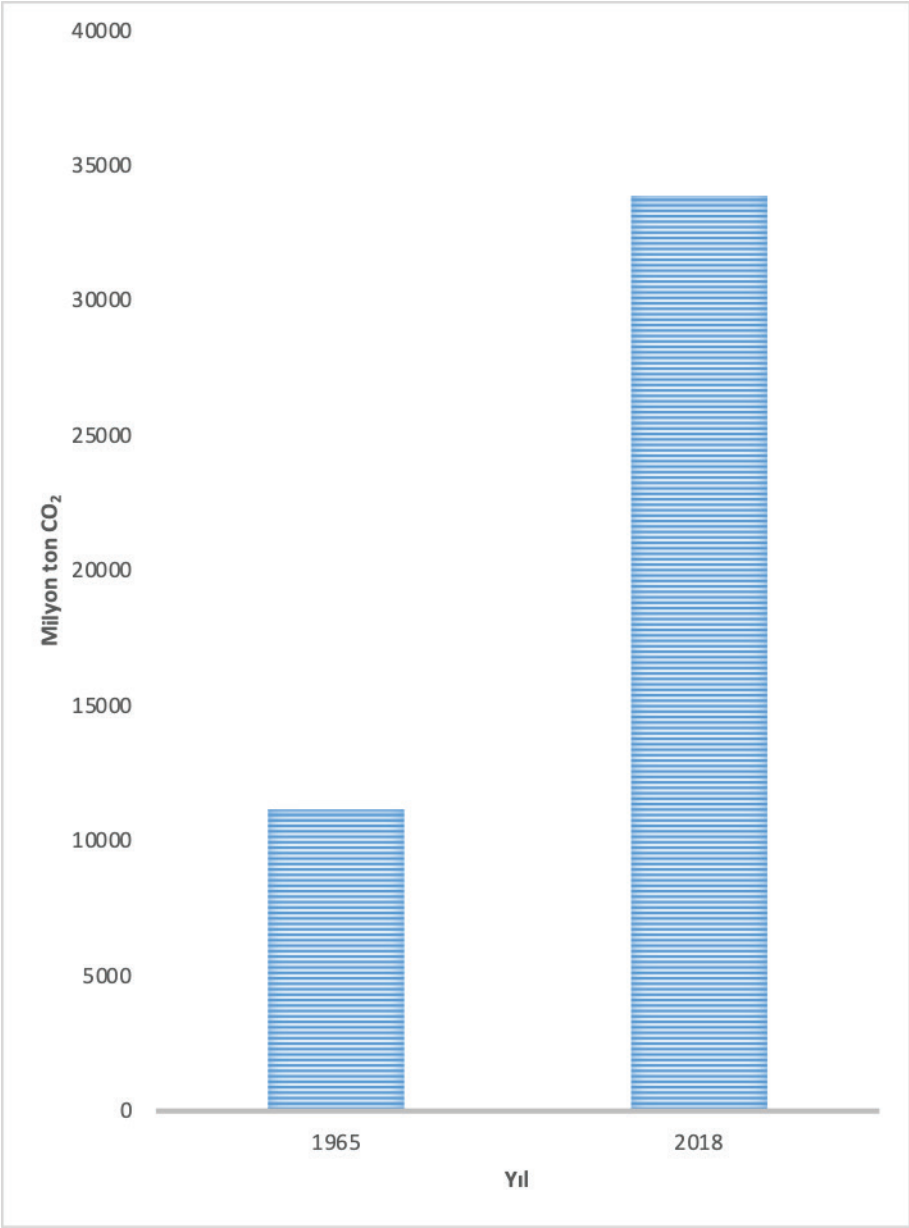
Çağdaş dönem olarak adlandırılan ve günümüzü de kapsayan dönemin en kritik küresel sorunlarından birisi de iklim değişikliğidir. İklim değişikliğine sebep olan ana unsur olarak sera gazı emisyonları gösterilmektedir. Sera gazı emisyonlarının bir türü olan karbondioksit (CO_2) emisyonları geçmişten günümüze ciddi bir şekilde yükseliş göstermiştir (Han vd. 2025).

Şekil 1, CO_2 emisyonlarının geçmişten yakın zamana kadar gerçekleşen ciddi artışını göstermektedir. 1965 yılında CO_2 emisyonları 11.190 milyon ton iken 2018 yılında 33.890,8 milyon tona yükselmiştir. CO_2 emisyonlarının endişe verici seviyelerde artışı; insan sağlığı, ekosistemler ve küresel güvenlik için önemli tehditler oluşturan iklim değişikliği sorununa sebebiyet vermiştir. Bu nedenle, iklim değişikliğiyle mücadelenin aciliyeti apaçık ortadadır. İklim değişikliği ile yeterince mücadele edilmemesi, hava kirliliğinde artışa, aşırı hava olaylarına, insan refahının azalmasına ve insanın hayatta kalması için uzun vadeli risklerin ortaya çıkması sebep olmaktadır (Han vd. 2025).

İklim değişikliğiyle mücadelede temel bir taş olarak yaygın olarak kabul edilen uygulamalardan birisi de yenilenebilir enerji uygulamalarıdır. Yenilenebilir enerji, fosil yakıtlara sürdürülebilir bir seçenek sunmaktadır. Böylece, CO_2 emisyonlarının azaltılmasına katkı sağlamakta ve nihayetinde sera gazı emisyonlarının azaltılmasına da katkı sağlamaktadır (Han vd. 2025).

Yenilenebilir enerjinin daha yaygın bir kullanıma kavuşması için yenilenebilir enerji üreticilerinin maliyetlerinin düşürülmesi gerekmektedir. Bunun için verimli yenilenebilir enerji hasat cihazları üretilmeli ve mevcut teknolojilerin verimliliği artırılmalıdır. Bu gerçekleştiği takdirde yenilenebilir enerji kaynaklarının verimli kullanımı, yenilenebilir enerji kaynaklarını etkili bir şekilde elektriğe, “en yüksek kaliteli enerji biçimi”ne dönüştürülebilecektir (Olabi ve Abdelkareem, 2022). Bunun için yenilenebilir enerji konusunda teknolojik inovasyonlar yapılması gerektiği artık göz ardı edilemeyecek bir gerçektir.

Enerji konusunda yapılacak teknolojik inovasyon, enerji tasarrufu ve emisyon azaltımı sağlamanın önemli bir yolu olarak gösterilmektedir. Geleneksel fosil enerjinin düşük karbonlu ve yüksek verimli kullanımı veya yenilenebilir enerjinin daha düşük bir maliyetle büyük ölçekte kullanımı fark etmeksizin, teknolojik inovasyona büyük ölçüde güvenilmesi gerektiği araştırmacılar tarafından tavsiye edilmektedir (Lin ve Zhu, 2019).



Şekil 1. CO₂ emisyonu değişiminin yıllara göre kıyaslaması (Han vd. 2025).

ÇEVRESEL SÜRDÜRÜLEBİLİRLİĞE GİDEN BİR YOL: YENİLENEBİLİR ENERJİ

Yenilenebilir enerji denilince akla; güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, biyokütle enerjisi, jeotermal enerji, hidroelektrik, gel-git ve dalga enerjisi gibi enerji üretim kaynakları gelmektedir. Güneş enerjisi teknolojisi, güneş ışığını kullanarak elektrik veya ısı üretimini sağlayan sürdürülebilir ve bol miktarda bulunan bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Rüzgar enerjisi, rüzgarın kinetik potansiyelini elektrik enerjisine dönüştüren yenilenebilir enerji kaynağı türüdür. Biyokütle enerjisi; bitkiler, mahsul artıkları, tarımsal atıklar, odun ve hayvan gübresi gibi doğal kaynaklardan elde edilen yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Jeotermal enerji, Dünya yüzeyinin mevcut iç ısını çeşitli uygulamalar için ısıya veya elektriğe, doğrudan ısıtmaya ve soğutmaya dönüştüren yenilenebilir enerji kaynağıdır. Hidroelektrik, santraller vasıtasıyla yüksek bir yerden düşen suyun yerçekimi kuvvetini kullanarak elektrik üretimine olanak tanıyan bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Gelgit enerjisi, su kütlelerinin kinetik enerjisinin, özellikle de ay ve güneşin uyguladığı çekim kuvvetlerinin neden olduğu gelgit hareketini kullanarak elektrik enerjisi üretimini sağlayan yenilenebilir enerji kaynağıdır. Dalga enerjisi ise okyanus dalgalarının yukarı ve aşağı akışını kullanarak elektrik üretimini sağlayan yenilenebilir enerji kaynağıdır (Kumar ve Pal, 2025).

Karbonsuzlaştırma stratejilerinin önde geleni olarak tanıtılan yenilenebilir enerji ile ilgili yapılan çalışmalar fayda sağlamıştır. 2022 yılına kadar, dünya genelindeki toplam kurulu yenilenebilir enerji kapasitesi 3,37 TW değerine yükselmiştir. Bu kapasitenin %95’lik kısmını rüzgar, güneş ve hidroelektrik oluşturmuştur. 2022 yılında dünyada yenilenebilir enerji kurulumu artmıştır. Asya ve Avrupa, kıtalarında yalnızca 2022’de toplam yenilenebilir enerji kurulu gücü 232 GW artmıştır. Bu artış, bir önceki yıla göre yaklaşık %10 büyümeye olarak ifade edilmiştir. Kuzey Amerika, Güney Amerika ve Afrika gibi bölgelerde ise yenilenebilir enerjinin kurulu gücü %4,8 ile %7,4 arasında bir büyümeye oranı göstermiştir. Bu oran, Asya ve Avrupa’ya kıyasla düşük kalmaktadır. Nihayetinde, 2022 yılının sonunda yenilenebilir enerji kaynakları, tüm yeni elektrik üretim kapasitesi büyümesinin %83’ünü oluşturmuştur (Kumler vd. 2025).

Çevre felaketlerdeki hızlı artış yaşanması, küresel ısınma ve iklim değişikliğini ekonomik ve çevresel politika tartışmalarının en başlarına taşımıştır. Dünya çapında çevresel sürdürülebilirliği sağlamak için 26 sanayileşmiş ülke ve 45 gelişmekte olan ekonomi, yenilenebilir enerjinin gelişimini teşvik etmek ve enerji verimliliğini artırmak için çalışmaları yoğunlaştırmıştır. Bunun için sadece Avrupa Birliği, 700 milyar ABD dolarından fazla bütçe sağlayan mali politika teşvikleri getirmiştir. Enerji güvenliği ve arz güvenliği de yenilenebilir enerji yatırımlarının enerji

güvenliğine nasıl katkıda bulunabileceği hakkında önemli faktörlerdir. Enerji istatistiklerinin gösterdiği gibi, son ekonomik dönüşümdeki rollerine rağmen, fosil yakıtlar sınırlıdır. bu nedenle, yenilenebilir enerji kaynaklarına yatırım yapmak enerji ihtiyaçlarını karşılamak ve çevreyi korumak için en uygun seçenektir (Bashir vd. 2025).

Son zamanlarda, çevre, iklim ve güvenlik konuları arasındaki gerilimler artmıştır. Bu gerilimler tırmanırken, enerji sürdürülebilir ekonomik büyüme için geniş kapsamlı etkileri olan ayrı bir unsur olarak sermayeden ayrılmaktadır. Temiz, düşük karbonlu nitelikleri ve muazzam kalkınma potansiyeli nedeniyle, yenilenebilir enerji, özellikle yeşil tahviller gibi son teknoloji finansal araçlar aracılığıyla dikkat çekmiştir. 2023 yılında gerçekleştirilen COP28'de yenilenebilir enerjinin yatırım araçlarından biri olan yeşil tahvillerin yatırımı artırdığı ifade edilmiştir. Ancak, yenilenebilir enerji ile ilgili yatırım yapan ülkeler bu kaynakları kullanmak için yeterince donanımlı değildir. Ayrıca, yenilenebilir enerji kullanımının etkinliği dünyadaki coğrafi bölgeler arasında aynı değildir. Bu nedenlerden ötürü, yenilenebilir enerji teknolojisi ile ilgili inovasyonun, dünya çapındaki enerji dönüşümü için en önemli katalizör görevi göreceğine inanılmaktadır (Wei vd. 2025).

Son yıllarda iklim sistemi ısınma eğilimine doğru hareket etmektedir. Bilim insanları, 2100 yılına kadar dünyanın sıcaklığının 1,4°C ile 5,8°C arasında artacağını öngörmektedirler. Bu sıcaklık artışı, kar ve buzun yaygın olarak erimesi, küresel ortalama deniz seviyelerinin yükselmesi, biyolojik çeşitliliğin kaybı, ekosistemlerin dönüşümü ve tarımsal ürünlerin değer ve çeşitliliğinin azalması gibi olumsuz etkileri doğuracaktır. Fosil yakıtların enerji üretiminde yaygın kullanımı iklim sisteminin bozulmasının ana nedeni olarak gösterilmektedir. Bu nedenle, yenilebilir enerji kaynaklarının yaygınlaşması elzem bir konu haline gelmiştir (Sanaeepur vd. 2013).

Yenilenebilir enerji gelişiminin odak noktası elektrik sektörüdür. Son yıllarda güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik paneller ve rüzgar enerjisi alanlarındaki güçlü büyüme, politika desteği ve güçlü maliyet düşüşleri sayesinde meydana gelmiştir. Yenilenebilir enerji, daha sürdürülebilir ve daha az karbon yoğun bir enerji sistemine geçişin merkezinde yer almaktadır. Tüm enerji sektörünün ve her bir enerji alt sektörünün strateji ve planlamasını, enerji güvenliğinin sağlanmasında elektrik planlamasının merkezi öneme sahip olduğu, stratejiden planlamaya kadar birleşik, senkronize ve sıkı sıkıya organik bir sistem haline getirilmesi gerekmektedir. İlaveyen, yenilebilir enerjide kurulu gücün büyük bölümünü oluşturan güneş ve rüzgar enerjisi alanında en son teknolojilerin araştırılması ve transferi konusunda uluslararası ortaklarla stratejik iş birliğinin güçlendirilmesi gerekmektedir (Nguyen vd. 2021).

Yenilenebilir enerjinin benimsenmesi, ekonomik büyümeyi sürdürmektedir. Ayrıca, ekonominin yeşil dönüşümü ve sürdürülebilir kalkınma için hayati önem taşımaktadır. Yenilenebilir enerjiye geçiş, enerji tüketiminin karbon yoğunluğunda bir azalmaya yol açar ve sürdürülebilir kalkınmayı teşvik eder. Yenilenebilir enerji geçişi, çevre düzenleme politikalarının önemli bir parçasıdır. Çevre düzenlemesi, kirlenici emisyonları başarıyla azaltır ve insanların sağlık durumunu iyileştirir (Ai vd. 2025).

“İklim değişikliğini daha da kötüleştirmeden sürdürülebilir kalkınma için gereken enerji gereksinimlerini nasıl karşılayabiliriz?” sorusunu cevaplayabilmek için iki temel yaklaşım ortaya atılmıştır. İlk yaklaşımda, uzun vadeli kalkınma planı ortaya konulmuştur. Bu kalkınma planına göre, yakıt tüketimini ve dolayısıyla iklim değişikliğini azaltmak için gelişmiş enerji üretim teknolojilerinin değiştirilmesi ve/veya geleneksel teknolojiler yerine hibrit süreçlerin uygulanması hedeflenmiştir. İkinci yaklaşımda, alternatif enerji kaynaklarının geliştirilmesi gerekliliği ortaya konulmuştur. İkinci yaklaşım ilk yaklaşıma göre daha sürdürülebilir bir yolu benimsemiştir (Sanaeepur vd. 2013).

Yenilenebilir enerjinin çevre dostu davranışı bilimsel çalışmalarla ortaya konulmuştur. Buna rağmen, çok sayıda çalışma ulusal yenilenebilir enerji yatırımlarındaki farklılıkları farklı faktörlere bağlamıştır. Yenilenebilir enerji dağıtımı; teknolojik inovasyondan, enerji güvenliğinden, elektrik fiyatlarından, fosil yakıt temelli ekonomilerden, çevresel kaygılardan ve sosyal baskınlık yöneliminden etkilenebilmektedir (Kim ve Park, 2023).

YENİLENEBİLİR ENERJİ, TEKNOLOJİ VE İNOVASYON İLİŞKİSİ

Enerji teknolojisi inovasyonu, yenilenebilir enerji teknolojisi maliyetlerinde düşüş sağlama açısından güçlü bir role sahiptir. Bu kapsamda, Ar-Ge aşamasından başlayarak, araştırma yoluyla öğrenmenin rolü önceliklidir. Bu rol, araştırma faaliyetlerinin hızını etkileyebilen ve Ar-Ge yatırımlarının etkinliğini artırabilen bilgi birikimi ile güçlendirilir. Ar-Ge çalışmaları sonucunda ortaya çıkan ürünler için başlangıç veya biçimlendirici aşamada, yeni üretilen teknoloji, pazar oyuncularının maliyet rekabetinden ziyade teknik özelliklere ve performans avantajlarına daha duyarlı olduğu korumalı (niş) pazarlarda yerini alır. Ardından, teknolojinin tam ticarileşme aşaması için çabalar sarf edilir. Bu aşamada, hızlı bir şekilde pazar kapasitesinin büyümesi başlar. Bu nedenle, ürünlerin standartlaştırılmış bir yapıya doğru güçlü bir endüstriyel büyümesi başlar. Bu aşamada, gerek teknoloji üreticileri gerek tedarik zinciri olmak üzere tüm endüstride “yaparak/kullanarak öğrenme” işlemi gerçekleştirilir. Bu işlem

sayesinde maliyet düşüşlerinin oluşmasına olanak tanınır. Bu aşamada, bilgi yaratımının hala devam ettiği göz ardı edilemeyecek bir gerçektir. Ancak araştırarak öğrenme esas olarak endüstriyel düzeyde elde edilmekte ve şirketler ile kamu araştırmaları arasındaki işbirlikleri azalmaktadır. Buna rağmen teknolojiyi/ürünü kullanan kişilerden alının geri bildirim teknik engellerin aşılmasını imkan tanımaktadır (Elia vd. 2021).

Yenilenebilir enerjinin yaygın bir halde uygulanması, dünya çapındaki değer zincirleri ve dijitalleşme konularını kapsayan iki temel inovasyon sürücüsüne dayanmaktadır. Bu çerçevede, modern yeşil teknolojiye erişim, daha iyi enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik odaklı enerji çözümlerinin daha hızlı uygulanması yoluyla ülkelere ve kuruluşlara yeni fırsatlar sunmaktadır (Zhang vd. 2025).

Yenilenebilir enerjiye ekonomik açıdan bakıldığında bu enerji kaynağının iş fırsatlarını ve istihdam yaratmayı teşvik ettiği, enerji bağımsızlığını desteklediği ve çeşitlendirilmiş kaynaklar aracılığıyla enerji fiyatlarını dengelediği görülmektedir. Sosyal açıdan bakıldığında yenilenebilir enerji, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltarak halk sağlığının iyileşmesine, merkezi olmayan enerji üretimi yoluyla yerel toplulukları güçlenmesine ve herkese uygun fiyatlı ve erişilebilir güç sağlanmasına katkı sağlayarak enerji eşitliğini teşvik etmektedir (Hardi vd. 2025).

Yenilenebilir enerji ile ilişkili Gayri Safi Yurtiçi Hasıla (GSYİH)'nın çoğunluğunu Asya'daki büyük ülkeler oluşturmaktadır. Bu ülkeler, enerji tedariklerinin büyük bir kısmında yenilenebilir enerji kaynakları yerine fosil yakıtlardan sağlamaktadırlar. Enerji tedarikini fosil yakıttan sağlayan Asya ülkeleri ve tedarik oranları Tablo 1'de verilmiştir (Hardi vd. 2025).

Tablo 1. Asya'daki büyük ülkelerin fosil yakıttan enerji tedarik oranları (Hardi vd. 2025).

Ülke	Fosil yakıttan enerji tedarik oranı
Çin	% 86,7
Japonya	% 87,2
Güney Kore	% 80,3
Endonezya	% 87,4
Türkiye	% 81,3

Fosil yakıttan enerji tedariki sağlayan ülkelerde yenilenebilir enerjiye geçiş, doğal çevreye ek olarak önemli sosyoekonomik faydalar da sağlayacaktır. Asya'nın uçsuz bucaksız ve dinamik coğrafyasında

yenilenebilir enerji, özellikle Çin, Japonya, Güney Kore, Endonezya ve Türkiye gibi büyük ekonomilerde çok sayıda avantaj ve fırsat sunmaktadır. Türkiye, toplam kurulu güç kapasitesindeki yenilenebilir enerji payını 2035 yılına kadar %65'e çıkarmayı hedeflemektedir. Türkiye, güneş, rüzgar ve jeotermal projelerini desteklemek için besleme tarifeleri ve yenilenebilir enerji sertifikaları gibi politikalar uygulamıştır (Hardi vd. 2025).

İşletmelerin inovasyonu yönlendirme adı altında yapması gereken çalışmalardan birisi yenilenebilir enerji konusunda farkındalığın arttırılmasıdır. İleri bir aşamada, dijital devrimin yenilenebilir güç kaynaklarının tüketimi üzerinde olumlu sonuçlar vermeye başlayacağı öngörülmektedir. Akıllı şebekeler, otomasyon sistemleri ve gelişmiş enerji yönetim sistemleri, güneş ve rüzgar gibi yenilenebilir kaynakların ulusal şebekelere dahil edilmesini kolaylaştırırken enerji kaynaklarının daha etkili kullanılmasını sağlamaya yardımcı olacağına inanılmaktadır. Dahası, bu teknolojilerin yenilenebilir kaynak bağımlılığını azaltmak için iyileştirilmiş talep tahmin yetenekleri, gerçek zamanlı dağıtım yetenekleri ve gelişmiş depolama seçenekleri kolaylaştıracağı düşünülmektedir (Bingxin, 2025).

Kirliliği azaltan ve ekonomik kalkınmayı aynı anda destekleyen yenilikler çevre ile ilişkili olan "Çevresel Dönüşüm" kavramına dahildir. Yapılan araştırmalarda, kurum ve kuruluşların daha sürdürülebilir ve çevre dostu teknolojiler benimsenerek yeniden düzenlemesi şiddetle tavsiye edilmektedir. Bu tavsiyenin hayata geçirilmesinin, sera gazı emisyonları azaltmak ve daha yeşil teknolojiler benimsemek için finansal bir teşvik sağlayacağı öngörülmektedir. Politika yapımcıların, sürdürülebilir kalkınmayı teşvik eden ve çevre dostu çözümlere öncelik veren teknik ilerlemeleri savunması gerekmektedir. Sürdürülebilir kalkınmaya öncelik vermek, ülkeler için kalıcı sürdürülebilirlik sağlarken küresel ölçekte rekabet etmelerine ve ekonomik ilerleme ile çevre koruma arasındaki uzlaşmayı kolaylaştırmalarına olanak sağlayacaktır (Amin vd. 2025).

Ekonomik sürdürülebilirlik ve çevresel sorunlar küresel toplumun karşı karşıya kaldığı en önemli iki zorluk olarak ifade edilmektedir. Bu zorluklara karşı mücadele çalışması yürüten ülkelerden biri olan Almanyadır. Bu ülke, yenilenebilir enerji gelişimine yatırım yapmıştır ve bu nedenle ileri teknoloji konusunda ilerlemeler kat etmiştir. Nihayetinde, Almanya yenilenebilir enerji gelişimi açısından lider ülkelerden birisi haline gelmiştir. Almanya, tüm enerji altyapısını dönüştürerek ve son zamanlarda enerjisinin %46'sını yenilenebilir enerji kaynaklarından üreterek iklim nötrlüğüne ulaşmak için çok çabalamaktadır. Almanya'nın kat ettiği bu ilerleme, teknoloji ilerlemesine yapılan daha yüksek yatırım sayesinde mümkün olmaktadır (Khan vd. 2022).

Bazı çalışmalarda yenilenebilir enerji sektörü için oldukça önemli

bir kamu politikası müdahalesi yapılması gerektiği ifade edilmiştir. Yapılan araştırmalarda, çoğunlukla, talep odaklı politikaların yenilenebilir enerji teknolojilerinde inovasyonu yönlendirmede diğer tüm politika müdahalelerinden daha etkili olduğu görülmüştür. Bazı bilim insanları, karbon fiyatlandırma politikalarının yanı sıra yenilenebilir enerji inovasyonunu teşvik etmek için belirli teknolojilerin önemini vurgulayan bir politika karışımının daha tercih edilebilir olabileceğini savunmuştur (Pitelis vd. 2019).

KAYNAKÇA

- Ai, H., Tan, X., Mangla, S. K., Emrouznejad, A., Liu, F., & Song, M. (2025). Renewable energy transition and sustainable development: Evidence from China. *Energy Economics*, 108232. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2025.108232>
- Amin, A., Yusoff, N. Y. B. M., Isik, C., & Osabohien, R. (2025). Decarbonizing the U.S economy: the roles of renewable energy, technology innovation, human capital, and green growth. *Clean Technologies and Environmental Policy*. <https://doi.org/10.1007/s10098-025-03283-w>
- Bashir, M. F., Pata, U. K., & Shahzad, L. (2024). Linking climate change, energy transition and renewable energy investments to combat energy security risks: Evidence from top energy consuming economies. *Energy*, 314, 134175. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.134175>
- Bingxin, W., Qamri, G. M., Hui, G., Ameer, W., & Majeed, M. A. (2025). From digitalization to renewable energy: How the tech-energy connection drives the green energy in belt and road countries. *Energy Economics*, 144, 108324. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2025.108324>
- Elia, A., Kamidelivand, M., Rogan, F., & Gallachóir, B. Ó. (2020). Impacts of innovation on renewable energy technology cost reductions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 138, 110488. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110488>
- Han, S., Peng, D., Guo, Y., Aslam, M. U., & Xu, R. (2025). Harnessing technological innovation and renewable energy and their impact on environmental pollution in G-20 countries. *Scientific Reports*, 15(1), 2236. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-85182-0>
- Hardi, I., Idroes, G. M., Hamaguchi, Y., Can, M., Noviandy, T. R., & Idroes, R. (2024). Business Confidence in the shift to Renewable Energy: A Country-Specific Assessment in major Asian Economies. *Journal of Economy and Technology*, 3, 44-68. <https://doi.org/10.1016/j.ject.2024.08.002>
- Kim, S. K., & Park, S. (2022). Impacts of renewable energy on climate vulnerability: A global perspective for energy transition in a climate adaptation framework. *The Science of the Total Environment*, 859(Pt 1), 160175. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160175>
- Khan, K., Su, C. W., Rehman, A. U., & Ullah, R. (2022). Is technological innovation a driver of renewable energy? *Technology in Society*, 70, 102044. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2022.102044>
- Kumar, A., Pal, D. B. (2025). Renewable Energy Development Sources and Technology: Overview. In: Kumar, S., Singh, V.K. (eds) *Renewable Energy Development: Technology, Material and Sustainability*. Clean Energy Production Technologies. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-9626-7_1

Kumler, A., Kravitz, B., Draxl, C., Vimmerstedt, L., Benton, B., Lundquist, J. K., Martin, M., Buck, H. J., Wang, H., Lennard, C., & Tao, L. (2025). Potential effects of climate change and solar radiation modification on renewable energy resources. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 207, 114934. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114934>

- Lin, B., & Zhu, J. (2019). The role of renewable energy technological innovation on climate change: Empirical evidence from China. *The Science of the Total Environment*, 659, 1505–1512. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.449>
- Nguyen, X. P., Le, N. D., Pham, V. V., Huynh, T. T., Dong, V. H., & Hoang, A. T. (2021). Mission, challenges, and prospects of renewable energy development in Vietnam. *Energy Sources Part a Recovery Utilization and Environmental Effects*, 1–13. <https://doi.org/10.1080/15567036.2021.1965264>
- Olabi, A., & Abdelkareem, M. A. (2022). Renewable energy and climate change. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, 112111. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112111>
- Pitelis, A., Vasilakos, N., & Chalvatzis, K. (2019). Fostering innovation in renewable energy technologies: Choice of policy instruments and effectiveness. *Renewable Energy*, 151, 1163–1172. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.11.100>
- Sanaeepur, S., Sanaeepur, H., Kargari, A., & Habibi, M. H. (2013). Renewable energies: climate-change mitigation and international climate policy. *International Journal of Sustainable Energy*, 33(1), 203–212. <https://doi.org/10.1080/14786451.2012.755978>
- Wei, D., Ahmad, F., Abid, N., & Gul, A. (2025). Financial development and renewable energy technology: The heterogeneous role of energy endowment, market environment and policy support in Chinese provinces. *Energy Strategy Reviews*, 59, 101697. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2025.101697>
- Zhang, L., Zhao, Z., Qamri, G. M., & Makhmudov, S. (2025). Unleashing the critical role of renewable energy through global value chains and digitalization: A path towards environmental sustainability. *Journal of Environmental Management*, 392, 126688. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.126688>

Bölüm 13

KAFES YAPILARIN EKLEMELİ İMALATLA ÜRETİMİ

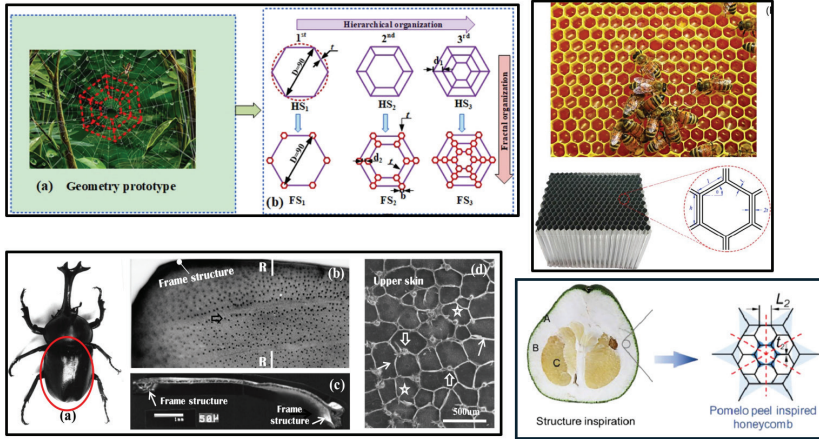
Melih Canlıdınç¹

¹ Dr.Öğr.Üyesi Melih Canlıdınç, Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Orcid no: 0000-0002-4011-9490

1. Giriş

Mühendislik tasarımı geleneksel olarak mukavemet ve ağırlık arasında en iyi dengeyi arayan bir disiplin olmuştur. Kemik, ahşap, mercan ve petek yapılar gibi doğada görülen hücresel mimariler, az malzeme kullanımıyla maksimum yapısal performans elde etmek için biyomimetik bir model sağlar. Geleneksel üretim yöntemleri (döküm, işleme ve dövme), bu karmaşık iç yapıların inşası için önemli kısıtlamalara sahiptir. Bununla birlikte, özellikle Toz Yatak Füzyonu (powder beam fusion, PBF) sistemleri olmak üzere Eklemeli İmalat (additive manufacturing, AM) teknolojilerinin yükselişi, metal kafes yapılarının üretiminde dramatik bir değişime yol açmıştır.

Kafes yapılar, periyodik bir düzende düzenlenmiş ve birleştirilmiş hücre yapısı birimlerinden oluşan, uzay ızgarasının organize gözenekli yapılarıdır [1]. Şekil 1'de gösterildiği gibi değişen yapısal koşullara sahip biyomimetik iki boyutlu ve üç boyutlu kafes yapılar gibi doğal biyolojik yapılar, ilgili bilim insanlarını büyük ölçüde etkilemiştir [2-5]. Havacılık, otomotiv, askeri ve diğer alanların hızla genişlemesiyle birlikte, mühendislik, hafif yapılar ve çok fonksiyonlu entegrasyon için artan tasarım ve teknolojik kriterler önermiştir [6]. Örneğin, verimli motorlara ve hafif uçaklara olan talep sürekli olarak artmıştır. Gözenekli metalik kafes malzemeler, metal kristal hücrelerinin düzenli bir dizilimine sahip yeni bir gözenekli metal malzeme türüdür.



Şekil 1. Doğal biyolojik yapıdan esinlenilmiş iki boyutlu kafes yapı örnekleri [2-5].

Stokastik (rastgele) köpüklerin aksine, metal kafes yapılar, periyodik olarak tekrarlanan birim hücrelerden oluşan düzenli bir uzamsal geometriye sahip gözenekli tasarımlardır. Bu yapılar, yüksek özgül mukavemet,

ayarlanabilir sertlik, mükemmel enerji dağıtım kapasitesi ve geniş yüzey alanı/hacim oranı gibi belirgin özelliklere sahiptir. Bu avantajlar, metal kafes yapıların otomobillerde, havacılıkta, gemilerde, askeri, inşaat, tıp ve diğer alanlarda yaygın olarak kullanılmasını sağlar [7-11]. Son akademik araştırmalar, bu yapıların havacılık, otomotiv ve biyomedikal vb. endüstrilerindeki dönüştürücü etkisini vurgulamaktadır.

2. Kafes Yapılar

Kafes yapılar, birbirine bağlı gözenekli birim hücrelerin (unit cells) sistematik ve tekrarlı bir şekilde düzenlenmesiyle oluşan geometrik çerçevelerdir. Bu yapılar, düğüm noktaları ve bunları birbirine bağlayan çubuklar (struts) veya kirişlerden (beams) meydana gelen açık, hücresel bir mimariye sahiptir [12]. Mühendislik uygulamalarında ağırlık azaltma ve yüksek mukavemet/ağırlık oranı potansiyelleri nedeniyle dikkat çekmiştir. Başlangıçta, Gibson ve Ashby'den [13,14] elde edilen hücresel yapı terimi, kafes yapıların tanıtılmasından önce yaygın olarak kullanılıyordu. Onlara göre hücresel yapı, petek ve hem açık hücreli hem de kapalı hücreli köpükleri kapsıyordu [15]. Bununla birlikte, özellikle birim hücrelerin türü, şekli, boyutu ve özelliklerine bağlı olarak, köpükler ve peteklerle karşılaştırıldığında kafes yapıların tanımında farklılıklar vardır [16]. Hücresel yapıların daha belirgin bir sınıflandırmasını sağlamak için Dhruv Bhate, Tao ve Leu bu yapıları üç ana gruba ayırmıştır: köpükler, petekler ve kafes yapılar [17-18].

Köpük yapılar, hücre duvarlarının uzayda keyfi yönelimler sergilediği rastgele şekilli birim hücrelerden oluşturulur. Bu köpükler, mantar, süngerimsi kemik ve ahşap gibi malzemelerde bulunan örnekleriyle yaygın bir hücresel yapı türüdür. Bu köpükler hakkında detaylı bilgi, metalik köpüklerin özelliklerini, üretim yöntemlerini ve uygulamalarını araştıran Ashby ve ark. (2000) tarafından bir çalışmada sunulmuştur [19]. Ayrıca, bir çalışmada metalik köpüklerin daha belirgin bir tanımı sunulmuş ve gözenekliliğin %40 ile %98 arasında olduğu açıkça belirtilmiştir [20].

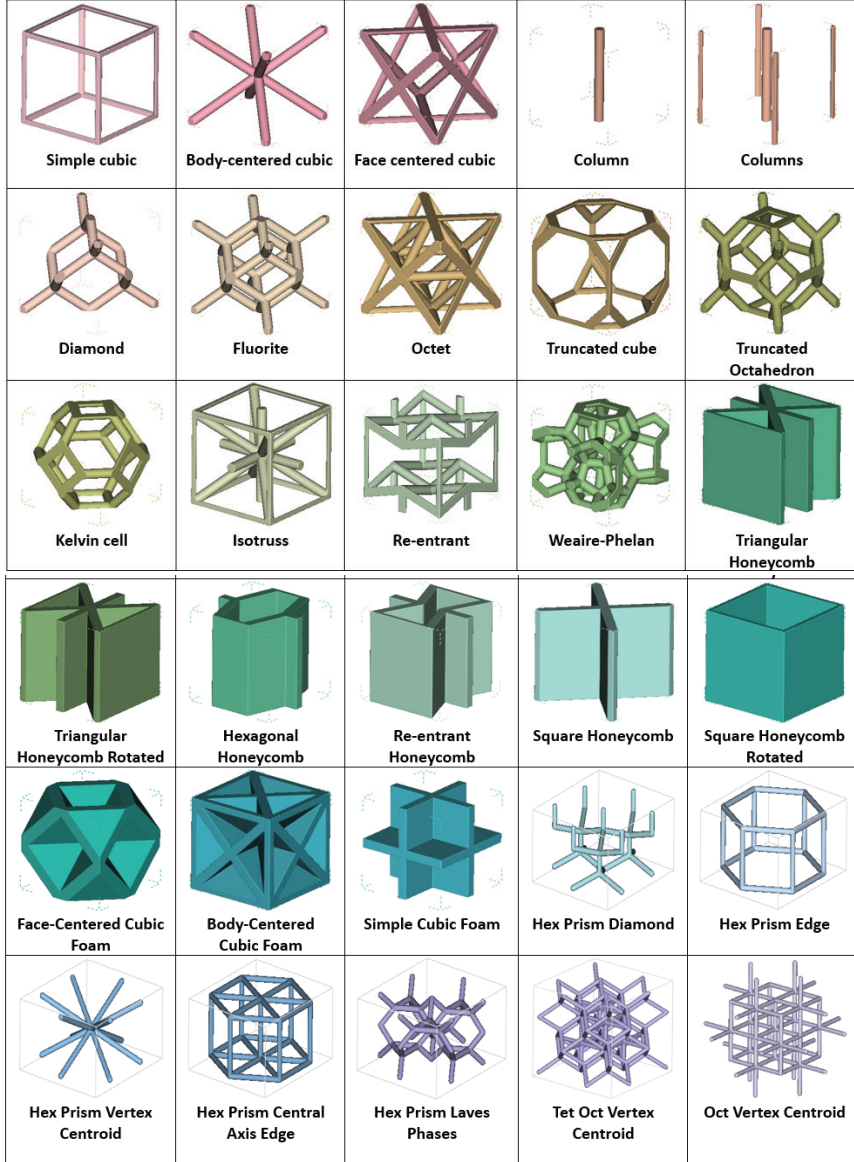
Petek yapılar, aynı boyutta olan ekstrüde edilmiş birim hücrelerinden düzgün şekiller oluşturur [21]. 2 boyutlu (2B) düzlemde tekrarlanan birim hücre şekline göre bunlar tetrahedronlar, üçgen prizmalar, kare prizmalar, altıgen prizmalar ve daha fazlası olarak sınıflandırılabilir [22]. Son zamanlarda, negatif Poisson oranına sahip auxetik yapı adı verilen petek alt sınıfına önemli bir ilgi vardır Bu yapılar, geleneksel peteklere kıyasla kayma modülünü, kırılma sertliğini ve girintiye karşı direncini artırarak çekme yönüne doğru yanal olarak genişler [23,24].

Kafes yapılar, kenarları ve yüzleri olan uzamsal birim hücrelerin düzenlenmesiyle oluşturulan mimari konfigürasyonlardır. 3 boyutlu tasarım uzayındaki birim hücre düzenlemesine bağlı olarak, kafes yapısı periyodik

yapılar ve sözde periyodik kafes yapıları olarak daha da sınıflandırılabilir [25,26]. Periyodik yapılarda, birim hücre özelliklerinde herhangi bir değişiklik olmaksızın birim hücreler düzenlenir. Pseudo periyodik kafes yapılarında ise birim hücre tipi, boyutu ve kalınlığı gibi birim hücre özellikleri değişir. Konformal kafes yapıları, uzunluk ve şekil bakımından düzensiz bir şekilde değişen hücrelere sahiptir ve bu da kopyalama deseninin parçanın sınırlarını takip etmesine olanak tanır. Ayrıca, rastgele bir desen veya stokastik kafes yapıları olarak da bilinen yapılar, boyut, şekil ve yönelimde rastgele varyasyonlarla periyodik bir düzende düzenlenmiş hücrelere veya desteklere sahiptir; bu, katı matris boyunca rastgele dağılmış düzensiz şekilli hücrelerden veya boşluklardan oluşan rastgele köpüklerle karıştırılmamalıdır. Bir diğer kafes yapısı kategorisi ise, belirli özellikler elde etmek için farklı tipteki birim hücrelerin düzenlendiği hibrit kafes yapılarıdır.

Kafes yapılarının eklemeli üretiminde yaygın olarak kullanılan farklı tipteki birim hücre topolojilerine genel bir bakış, literatürde yer almaktadır; destek tabanlı (strut-based) ve yüzey tabanlı (surface based) kafes yapıları Şekil 2'de sunulmuştur. Destek tabanlı yapılarda, birim hücrelerin köşelerinde veya kenarlarında ve bazen hücrenin iç kısmında konumlandırılan düğümler, genellikle destek çubukları veya kirişler olarak adlandırılan ince, düz elemanlarla bağlanır. Bu birim hücreler, basit kübik, BCC, FCC ve sekizgen kafesler de dahil olmak üzere çeşitli hücre şekillerine sahip hem katı hem de içi boş kafes varyasyonlarına sahiptir [27-29]. Yüzey tabanlı birim hücrelerde, düz levha tabanlı kafesler ve üçlü periyodik minimal yüzey (TPMS) hücreleri arasında ayrım yapılabilir [30]. Düz levha tabanlı kafesler, birleştirildiğinde Şekil 2'de gösterildiği gibi üç boyutlu bir nesne oluşturan düz iki boyutlu katmanlardan oluşur. 3D baskıda kullanılan yaygın düzlemsel yapılar arasında altıgen veya üçgen birim hücrelere sahip kafesler bulunur. Bunlar genellikle kiriş tabanlı kafeslere göre daha serttir ancak daha fazla ağırlık taşır ve basılması zordur [31]. Alternatif olarak, her noktada sıfır ortalama eğriliğe sahip sınır yüzeylerine sahip biyolojik olarak esinlenilmiş TPMS birim hücreleri önemli bir ilgi görmektedir [32]. Üretilirlik, akışkan geçirgenliği ve elektriksel ve termal iletkenlik gibi çeşitli yüzeyle ilgili özellikleri sağlayan geometrik özellikleri nedeniyle fonksiyonel olarak derecelendirilmiş yapılar olarak önem taşırlar. Schwarz tarafından Primitif ve Elmas yüzeylerle tasarlanan TPMS, periyodik 3B desenler oluşturan ve yüzey alanını yerel olarak en aza indiren matematiksel olarak tanımlanmış, kendi kendine kesişmeyen yüzeylerdir [33]. Bu yüzeyler hacimleri tek bağlantılı bileşenlere böler ve harmonik fonksiyonlara dayalı seviye kümesi teknikleri kullanılarak oluşturulabilir. İki ana TPMS yapısından ilki olan levha TPMS'de, katı bir yapı oluşturmak için yüzey kalınlaştırılırken, iskelet TPMS'de, TPMS tarafından ayrılan

hacim, katı bir yapı oluşturmak için doldurulur. Bu mimarilerde düğümler ve eğrilik süreksizlikleri bulunmamakta, bu da gerilim yoğunlaşmasını azaltarak mukavemeti artırmaktadır [34]. SplitP, Gyroid ve Diamond gibi en yaygın TPMS ünite hücreleri Şekil 2’de gösterilmektedir.



Şekil 2. Kafes yapılarda kullanılan birim hücreler [67].

3. Kafes Yapıların Eklemeli İmalatla Üretimi

Kafes yapıların karmaşık geometrileri ve içerdikleri boşluklu/gözenekli formlar nedeniyle, bu yapıların üretiminde Eklemeli İmalat - Eİ, (Additive Manufacturing - AM), diğer adıyla 3 Boyutlu Yazıcı teknolojileri en yaygın ve tercih edilen yöntemdir. Geleneksel üretim yöntemleri bu karmaşık yapıları üretmekte zorlanırken, Eİ teknolojisi malzemeyi katman katman işleyerek tasarım esnekliği ve üretim kolaylığı sağlar.

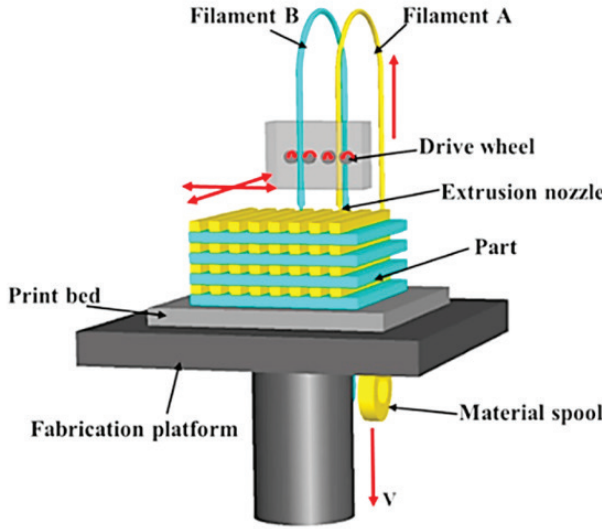
Eklemeli imalat, havacılık, biyomedikal, otomotiv, mimari, enerji ve sanat gibi farklı alanlarda ve endüstrilerde yaygın olarak kullanılan bir üretim yöntemidir. Adından da anlaşılacağı gibi, bu üretim süreci katman katman gerçekleştirilir. Son ürünü oluşturmak için düz bir platform üzerine toz veya filament katmanlama esasına dayanır [35]. Eİ'de kullanılan sistemlere genellikle 3 boyutlu (3D) yazıcılar denir çünkü katman katman üretim, tipik bir yazıcıya benzer bir yöntemeye dayanır. Bu üretim yöntemi, tasarım esnekliği, azaltılmış üretim süreleri, daha az hammadde tüketimi, daha kolay üretim adımları ve karmaşık yapıların oluşturulmasında kolaylık sağlar. Gözenekler ve boşluklar da dahil olmak üzere neredeyse tüm 3D yapısal tasarımlar, Eİ kullanılarak kademeli olarak üretilebilir [36].

Günümüzde Eİ hızla önem kazanmakta ve yüksek hassasiyet, karmaşık yapılar üretme yeteneği ve hızlı üretim gibi gereksinimleri karşılamak için 3B baskı teknolojileri geliştirilmektedir [37]. Hafif ve yüksek mukavemete sahip malzemeler, havacılık ve otomotiv sektörlerinde önemli bir rol oynamaktadır. Eİ kullanımıyla, bu malzemeler ve boşluklu hücresel yapısal tasarımlar kullanılarak yaklaşık olarak eşdeğer mukavemete sahip ve daha az ağırlıkta bileşenler üretilebilmektedir [38]. Benzer gereksinimler biyomedikal endüstrisi için de büyük önem taşımaktadır. Örneğin, tıbbi cihazlarda yaygın olarak kullanılan Ti-6Al-4V gibi titanyum alaşımları, sert dokuların nakli için mükemmeldir. Bu alaşımlar biyouyumluluk, yüksek mukavemet, korozyon direnci ve daha az ağırlık sağlamaktadır. Dahası, Eİ kullanılarak üretilen kemik implantları ortopedik tedavilerde önemli ölçüde kullanılmaktadır [39]. Eklemeli imalatla ayrıca mimarların karmaşık tasarımların 3D modellerini kolayca üretmeleri için de alan açmıştır [40]. Literatürde kafes yapıların üretimi için sınıflandırılan başlıca AM teknikleri şunlardır:

3.1 Eriyik Yığma Modelleme

Eriyik Yığma Modelleme - EYM (Fused Deposition Modeling, FDM), termoplastik filament malzemesi kullanılarak katman katman 3 boyutlu nesneler oluşturmak için çok yönlü ve yaygın olarak benimsenen bir teknik olarak öne çıkmaktadır. EYM, çeşitli filament türlerini kullanan bir mekanik imalat yöntemidir [41]. Şekil 3'te gösterildiği gibi, EYM'de, sürekli bir termoplastik malzeme filamenti ısıtılmış bir ekstrüzyon nozulüne

beslenir; burada filament ısıtılır ve viskoz ve şekillendirilebilir bir duruma dönüştürülür. Daha sonra erimiş malzeme, önceden belirlenmiş bir yolda bir yapı platformuna ekstrüde edilir ve burada nesnenin her katmanını oluşturmak için hızla katılır. Her katman biriktirildikçe yapı platformu kademeli olarak aşağı doğru hareket eder ve bu da nihai 3 boyutlu nesnenin kademeli olarak oluşturulmasına olanak tanır. Baskı cihazı için tasarlanan hareket mekanizması, üretim sürecini düzenlemek için ekstrüzyon nozulünün hareket özgürlüğünü sağlar. FDM sistemi bir yapı platformu, nozul, ısıtma bloğu, ekstrüder, filament makarası ve hareket mekanizmalarından oluşmaktadır [42].



Şekil 3. Eriyik yığılma modelleme üretiminin şematik gösterimi [43].

EYM, eklemeli imalatla birçok avantaj sunarken, önemli bir dezavantajı katmanlı yüzeydir; bu da baskılı nesnelerin yüzeyinde çıplak gözle görülebilen katman çizgileri anlamına gelir. Bu, nihai ürünün estetiğini etkileyebilir ve üretim için daha pürüzsüz bir yüzey elde etmek için ek son işlem süreçleri gerektirebilir. Dahası, FDM yazıcılar, özellikle küçük ölçekli baskılarda, ürünün ince detaylarını ve karmaşık özelliklerini elde etmede çözünürlük sınırlamalarına sahip olabilir. Bu, baskılı bileşenlerin genel hassasiyetini ve çözünürlüğünü etkiler [43]. Malzeme sınırlamaları da EYM için bir diğer endişe kaynağıdır; mevcut termoplastik baskı malzemesi yelpazesi, diğer AM teknolojilerine kıyasla sınırlıdır. Bu, özel malzemeler gerektiren bazı uygulamaları kısıtlayabilir. Düşük erime sıcaklıklarına sahip çeşitli termoplastik malzemeler, EYM baskısında kullanılabilir ve her

biri benzersiz malzeme özellikleri ve karakteristikleri sunar. Akrilonitril bütadien stiren (ABS), PLA, PETG, naylon, TPU vb., FDM üretiminde yaygın olarak kullanılan filament malzemeleridir [44]. Bu malzemelerin mukavemeti, esnekliği, ısı direnci ve diğer özellikleri birbirinden farklıdır, bu nedenle bu, belirli uygulama gereksinimlerine göre özelleştirmeye olanak tanır.

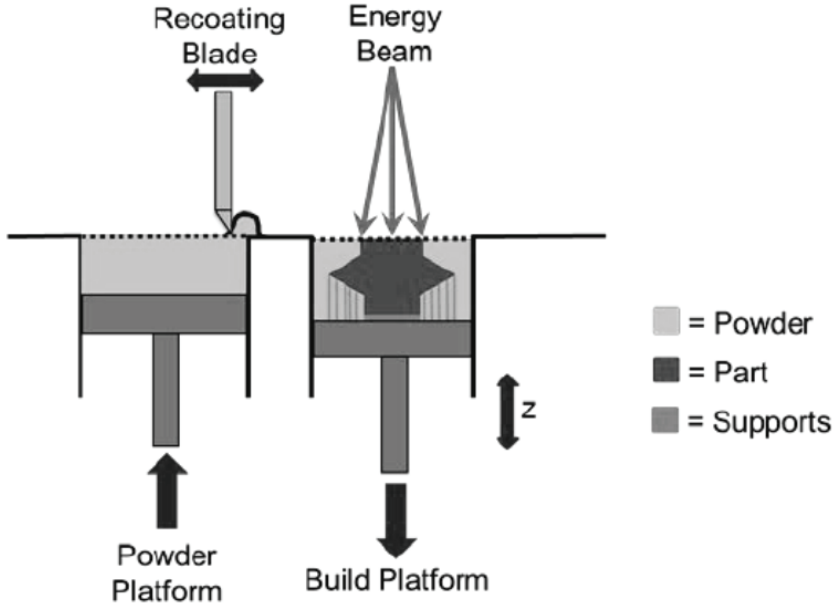
Havacılık endüstrisinde, EYM genellikle uçak bileşenlerinin, aletlerin ve fikstürlerin hızlı prototiplemesi için kullanılır. Otomotiv endüstrisinde, EYM kullanılarak konsept modeller, prototipler ve özel fikstürler üretilir. Tıp alanında, FDM, özellikle BT veya MR görüntüleme verilerine göre hastaların anatomik modellerini ve kranial plakalar, kemik iskeleleri ve diş implantları gibi implante edilebilir tıbbi cihazları üretmek için kullanılır. Ayrıca, EYM yazıcılar tek bir baskıda birden fazla malzeme ve rengi işleyebilmekte, bu da karmaşık, çok bileşenli nesnelerin kolayca oluşturulmasını sağlamaktadır. Gelecekte, FDM birçok açıdan farklı sektörler için fırsatlar yaratabilir. FDM'nin ham maddeleri çeşitlenecek ve bu malzemeler gereksinimlere göre üretim sırasında birleştirilebilecektir.

3.2 Toz yatak füzyonu

Toz Yataklı Füzyon - TYF (powder bed fusion, PBF), kafes yapıları üretmek için yaygın bir yöntemdir. Geleneksel üretim yöntemiyle karşılaştırıldığında, TYF daha yüksek karmaşıklığa sahip kafes malzemeleri üretebilir. PBF, toz yatağının alanını seçici olarak eritmek için yoğunlaştırılmış termal enerji kullanır. Ana enerji kaynakları lazer veya elektron ışınlarıdır [45]. TYF'nin ana süreci şu şekildedir: önce toz, çalışma alanında homojen olarak dağıtılır. Daha sonra, lazer ışını veya elektron ışını, planlanan yola göre seçici olarak ısıtılır ve eritilir. Ardından, parça katmanını azaltılır ve yeni bir toz katmanını serilir. Parça üretilene kadar katman katman tozlama, eritme ve kürleme işlemi tekrarlanır [46]. PBF'nin prensibi Şekil 4'te gösterilmiştir.

TYF, seçici lazer sinterleme (SLS), seçici lazer ergitme (SLM) ve elektron ışını ergitme (EBM) yöntemlerini içerir. SLS yöntemi, tozun her bir atomize edilmiş parçacığını her kenarda birlikte sinterler. SLS ile sinterlenen toz parçacıkları düzensiz dağılır ve iç kısım hatalara eğilimlidir. Buna karşılık, SLM yöntemi tozu çevreleyen toza eritir, bu da erimiş tozdan oluşan parça katmanını daha homojen hale getirir. Dahası, parçaların işlem süresi daha kısadır ve güvenilirliği daha yüksektir, ancak mekanik özelliklerini iyileştirmek için ısıtma işlemi önerilir [47]. Bu yöntemde, 10-150 µm aralığındaki parçacık boyutu tercih edilir. İdeal lazer enerji yoğunluğu, bağlayıcının veya tozun erime noktası tarafından belirlenir ve bu da lazer gücü ve tarama hızı ayarlanarak belirlenebilir. SLM'de kullanılan malzemeler esas olarak toz halindeki alaşımlardır. Şu anda, SLM ile güvenilir bir şekilde

işlenebilen bilinen malzemeler hala sınırlıdır. Odak noktası alüminyum alaşımları, nikel alaşımları, çelik ve titanyum alaşımları ile bazı kobalt alaşımları, bakır alaşımları, magnezyum alaşımları ve endişe duyulan saf metallerdir. SLM oluşumu sırasında büyük miktarda ısı üretilir. Metalin yüksek sıcaklık ortamında oksitlenmesini önlemek için, şekillendirme işlemini inert bir gazda gerçekleştirmek amacıyla yapı odası genellikle azot veya argon ile doldurulur [48-49].



Şekil 4. Toz yataklı füzyonla imalatın şematik gösterimi [68].

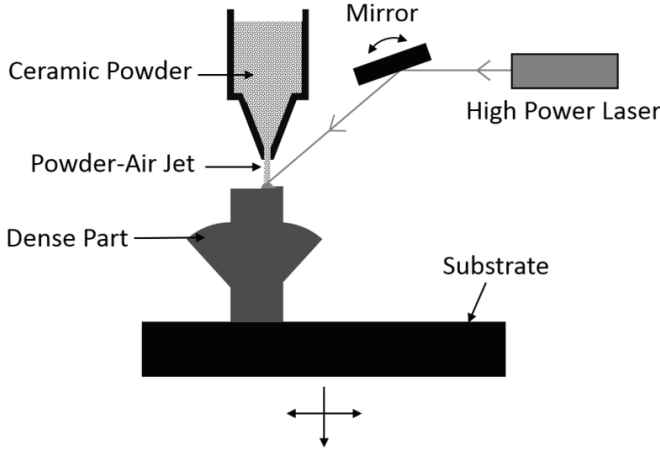
EBM, SLM'ye benzer, ancak EBM ısı kaynağı olarak elektron ışını kullanır. Lazer ışınına kıyasla, elektron ışını daha yüksek enerji yoğunluğuna ve verimliliğine sahiptir, bu nedenle EBM daha verimlidir [50]. SLM'den farklı olarak, EBM'nin yüksek vakumlu bir ortamda gerçekleştirilmesi gerekir çünkü elektron ışını gaz molekülleriyle çarpışarak yön değişikliğine ve enerji kaybına neden olur. Ve yüksek vakum koşullarında üretim daha temiz bir ortam anlamına gelir, bu nedenle EBM aktif maddelerle başa çıkmada avantajlara sahiptir.

Ma ve ark. (2024), SLM teknolojisi ile hazırlanan kafes yapılarının mekanik özelliklerine geometrik kusurların etkisini incelemiş ve bunları ayrıntılı olarak tartışmıştır [51]. Peng ve ark. (2023), farklı sütun boyutlarına sahip yedi grup kafes yapısı hazırlamak için SLM yöntemini kullanmıştır [52]. Sütun boyutunun kafes yapısının mekanik özelliklerine etkisi simülasyon ve deney yoluyla incelenmiştir. Wally ve ark. (2019), SLM'nin

düzgün ve kademeli gözenekliliğe sahip, iyi kontrol edilmiş bir dizi gözenekli Ti6Al4V yapısı üretebildiğini doğrulamış ve SLM'nin dış implantları için bir üretim yöntemi olarak çok umut verici ve mevcut yöntemlerden daha uygun maliyetli olduğunu belirtmiştir [53]. Jabarzadeh ve ark. (2024), SLM ile fonksiyonel fraksiyonlu gözenek örnekleri hazırlamış ve farklı gözenek dağılımlarının kırılma ve deformasyon davranışı üzerindeki önemli etkisini incelemiştir [54]. Condruz ve ark. (2024), Ti-6Al-4V ve Inconel 625 malzemelerini kullanarak SLM ile çeşitli kafes yapıları hazırlamış ve bükme özelliklerini değerlendirmiştir [55].

3.3 Doğrudan Enerji Biriktirme

Doğrudan enerji biriktirme – DEB (Direct Enerji Deposition-DED), genellikle metal imalatında kullanılır; burada ham madde toz veya tel formunda olabilir ve enerji kaynağı olarak lazer veya elektron ışınları kullanılır. İmalat sırasında, erimiş bir havuz oluşturmak için alt tabakanın veya son tortu tabakasının yüzeyine odaklanılır. Aynı zamanda, ham madde toz veya metal tel formunda erimiş havuza gönderilir. Isı kaynağı ileri doğru hareket ettiğinde, biriken metal alt tabaka üzerinde katılaşır ve metal malzemeleri satır satır biriktirerek hem düzgün hem de düzensiz parçalar üzerinde keyfi şekiller oluşturabilir [56]. Bu özelliği nedeniyle, DEB parçaların onarımında kullanılabilir ve büyük bileşenlerin bakımının düşük karmaşıklığı DEB'den faydalanabilir. DEB'nin prensibi Şekil 5'te gösterilmiştir.



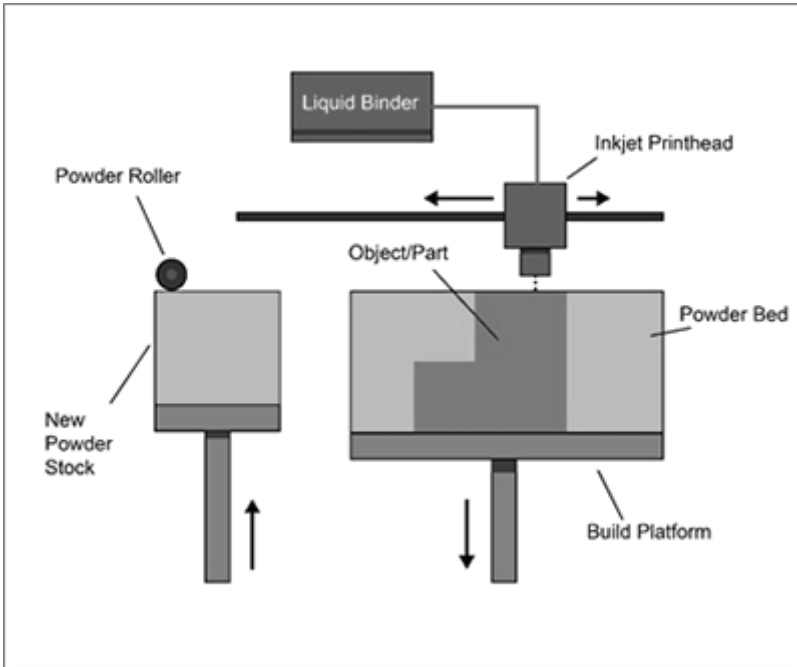
Şekil 5. Doğrudan enerji biriktirme ile imalatın şematik gösterimi [68].

Son yıllarda kafes yapıların imalatında da kullanılmıştır. Baranowski ve ark. (2019), DED'de lazer mühendisliği ağ şekillendirme (LENS) kullanarak Ti6Al4V alaşım tozu ile iki petek topolojisi tasarladı ve üretti ve mekanik özelliklerini karşılaştırdı [57]. Krishna ve ark. (2007), LENS ile CP Ti

kafes parçasını üretti ve ayarlanmış yapının gözenekliliğinin ve mekanik özelliklerinin işlem parametreleri değiştirilerek elde edilebileceğini buldu [58]. Dudka ve ark. [58], LENS kullanarak dört farklı boyutta ince duvarlı petek yapısı üretti ve statik ve dinamik yükleme koşulları altında enerji emme özelliğini inceledi. Ayrıca, mekanik özellikleri iyileştirmek için işlem sonrası uygulamanın gerekli olduğu bulundu. DEB, yerinde toz besleme işlemi kullandığı için, malzeme bileşimi esnek bir şekilde kontrol edilebilir. Bu nedenle, DED, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemelerin üretimi için uygundur. Şu anda, birçok çalışma, derecelendirilmiş kafesin tekdüze kafesten daha iyi performansa sahip olduğunu kanıtlamıştır [59,60].

3.4 Bağlayıcı püskürtme

Bağlayıcı püskürtme - BP (Binder Jetting, BJ), MIT tarafından 1993 yılında icat edilmiştir [61]. Bağlayıcı püskürtme, polimerler, seramikler, metaller ve bunların kompozitleri de dahil olmak üzere birçok malzeme sistemiyle çalışabilir ve bu nedenle bilimsel ve endüstriyel topluluklardan geniş ilgi görmüştür. Baskı işleminde, BP önce CAD modeline göre sıvı bağlayıcıyı toz yatağına seçici olarak püskürtür. Püskürtülen bağlayıcı, kambiymu basmak için toz parçacıklarıyla etkileşime girer ve tamamlandıktan sonra bir ısıtıcı ile kürlenir. Daha sonra, baskı katmanının üzerine yeni bir toz uygulanır ve işlem tekrarlanır. Bu işlem tamamlanana kadar tekrarlanır [62]. Şekil 6, tipik bir bağlayıcı püskürtme sistemidir.



Şekil 6. Bağlayıcı püskürtme ile imalatın şematik gösterimi [68].

Xu ve ark.(2023), BP teknolojisi ile çekme parçalarını ve kafes yapısını hazırladı, çekme ve sıkıştırma deneyleri yaptı ve mekanik özellikleri inceledi [63]. Xie ve ark. (2025), BJ teknolojisi aracılığıyla TPMS kafes yapısını hazırladı ve yapının deformasyon davranışını ve sıkıştırma özelliklerini inceleyerek iyi bir plastik deformasyon kapasitesi ve enerji emme kapasitesi buldu [64]. Sonuçlar, BP'nin özelleştirilmiş gözeneklilik değişiklikleriyle gözenekli titanyum yapıları başarıyla üretebileceğini gösterdi.

Diğer AM yöntemleriyle karşılaştırıldığında, BP'nin parçaları oluşturmak için gereken süre kısadır ve mevcut malzemeler daha geniştir. BP, elektron ışını ve lazer yerine bir bağlayıcı kullanır, bu da maliyeti büyük ölçüde azaltır. Bununla birlikte, toz ve bağlayıcı arasında büyük bir yapışma olsa bile, parçanın mukavemeti hala çok düşüktür. Bu nedenle, BP kafes yapıları üretmek için kullanıldığında çoğu durumda parçaların performansını iyileştirmek için işlem sonrası gereklidir [65].

4. Sonuç

Bu çalışmada kafes yapılar ve kafes yapıların imalatında kullanılan eklemeli imalat üretim teknolojisi özetlenmektedir. Farklı teknolojilerin kendi avantaj ve dezavantajları vardır. Bu teknikler kafes yapıları oluşturmada avantajlara sahip olsalar da, hala birçok sorunla karşı karşıyadırlar. Şu anda, birim uzunluğu 10 cm veya daha büyük olan kafes yapıların seri üretimi için bir yöntem bulunmamaktadır [66]. Ayrıca, eklemeli imalat süreci, çıkıntılı yapıların imalatında çarpılmaya veya deformasyona eğilimlidir ve yapısal istikrarı sağlamak için destek eklenmesi gereklidir. Bununla birlikte, destek eklemek zaman maliyetini artıracak ve desteği en aza indirmeyi gerektirecektir. Bir kafes yapısı da bu sorunlarla karşı karşıya kalmaktadır. Üretimdeki bu sorunlar, büyük ölçekli üretime ulaşmak ve üretim verimliliğini artırmak için daha fazla araştırma gerektirmektedir.

Kaynakça

- AlMahri, S., Santiago, R., Lee, D. W., Ramos, H., Al-Hajri, H., Al-Hamouti, H., ... & Cantwell, W. (2021). Evaluation of the dynamic response of triply periodic minimal surfaces subjected to high strain-rate compression. *Additive Manufacturing*, 46, 102220.
- Al-Saedi, D. S. J., Masood, S. H., Faizan-Ur-Rab, M., Alomarah, A., & Ponnusamy, P. (2018). Mechanical properties and energy absorption capability of functionally graded F2BCC lattice fabricated by SLM. *Materials & Design*, 144, 32–44.
- Ashby, M. F. (2006). The properties of foams and lattices. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 364(1838), 15–30.
- Ashby, M. F., Evans, A., Fleck, N. A., Gibson, L. J., Hutchinson, J. W., & Wadley, H. N. G. (2000). *Metal foams: A design guide*. Boston, MA: Elsevier.
- Baranowski, P., Platek, P., Antolak-Dudka, A., Sarzynski, M., Kucewicz, M., Durejko, T., ... & Czujko, T. (2019). Deformation of honeycomb cellular structures manufactured with Laser Engineered Net Shaping (LENS) technology under quasi-static loading: Experimental testing and simulation. *Additive Manufacturing*, 25, 307–316.
- Benedetti, M., du Plessis, A., Ritchie, R. O., Dallago, M., Razavi, N., & Berto, F. (2021). Architected cellular materials: A review on their mechanical properties towards fatigue-tolerant design and fabrication. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 144, 100606.
- Bhate, D. (2019). Four questions in cellular material design. *Materials*, 12(7), 1060.
- Brischetto, S., Ferro, C. G., & Maggiore, P. (2018). 3D FDM production and mechanical behavior of polymeric sandwich specimens embedding classical and honeycomb cores. *Curved and Layered Structures*, 5, 80–94.
- Bronder, S., et al. (2022). Design study for multifunctional 3D re-entrant auxetics. *Advanced Engineering Materials*, 24(1), 2100816.
- Chen, L. Y., Liang, S. X., Liu, Y. J., & Zhang, L. C. (2021). Additive manufacturing of metallic lattice structures: Unconstrained design, accurate fabrication, fascinated performances, and challenges. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 146, 100648.
- Chen, Q., et al. (2014). Mechanical properties of a hollow-cylindrical-joint honeycomb. *Composite Structures*, 109, 68–74.
- Clough, E. C., et al. (2016). Mechanical performance of hollow tetrahedral truss cores. *International Journal of Solids and Structures*, 91, 115–126.
- Condruz, M., Badea, T., & Paraschiv, A. (2020). Numerical and experimental investigation on flexural properties of selective laser melting processed Ti-6Al-4V lattice structures. *UPB Scientific Bulletin, Series B: Chemistry and Materials Science*, 82(2).

- Corvi, A., Collini, L., Sciancalepore, C., & Kumar, A. (2023). Analysis and modelling of damage mechanism in FDM 3D-printed lattice structure under compression loading. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 37, 1089–1095.
- Davies, G., & Zhen, S. (1983). Metallic foams: Their production, properties and applications. *Journal of Materials Science*, 18, 1899–1911.
- Davoodi, E., Montazerian, H., Mirhakimi, A. S., Zhianmanesh, M., Ibhade, O., Shahabad, S. I., ... & Toyserkani, E. (2022). Additively manufactured metallic biomaterials. *Bioactive Materials*, 15, 214–249.
- Dommati, H., Ray, S. S., Wang, J.-C., & Chen, S.-S. (2019). A comprehensive review of recent developments in 3D printing technique for ceramic membrane fabrication for water purification. *RSC Advances*, 9, 16869.
- du Plessis, A., Razavi, N., Benedetti, M., Murchio, S., Leary, M., Watson, M., ... & Berto, F. (2022). Properties and applications of additively manufactured metallic cellular materials: A review. *Progress in Materials Science*, 125, 100918.
- Evans, A. G., Hutchinson, J., & Ashby, M. (1998). Multifunctionality of cellular metal systems. *Progress in Materials Science*, 43(3), 171–221.
- Gibson, L. J. (1989). Modelling the mechanical behavior of cellular materials. *Materials Science and Engineering: A*, 110, 1–36.
- Gibson, L. J., Ashby, M. F., & Harley, B. A. (2010). *Cellular materials in nature and medicine*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Helou, M., & Kara, S. (2018). Design, analysis and manufacturing of lattice structures: An overview. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 31, 243–261.
- Hu, Y., et al. (2016). Fabrication and mechanical behaviors of corrugated lattice truss composite sandwich panels. *Composites Science and Technology*, 125, 114–122.
- Jabarzadeh, S., Ghasemi-Ghalebahman, A., & Najibi, A. (2024). Investigation into microstructure, mechanical properties, and compressive failure of functionally graded porous cylinders fabricated by SLM. *Engineering Failure Analysis*, 165, 108794.
- Jing, S., Li, W., Ma, G., Cao, X., Zhang, L., Fang, L., ... & Sun, H. (2023). Enhancing mechanical properties of 3D printing metallic lattice structure inspired by *Bambusa Emeiensis*. *Materials*, 16, 2545.
- Koerner, C. (2016). Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting—A review. *International Materials Reviews*, 61, 361–377.
- Krishna, B. V., Bose, S., & Bandyopadhyay, A. (2007). Low stiffness porous Ti structures for load-bearing implants. *Acta Biomaterialia*, 3, 997–1006.
- Kristiawan, R. B., Imaduddin, F., Ariawan, D., Ubaidillah, & Arifin, Z. (2021). A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters. *Open Engineering*, 11, 639–649.

- Lay, M., Thajudin, N. L., Hamid, Z. A., Rusli, A., Abdullah, M. K., & Shuib, R. K. (2019). Comparison of physical and mechanical properties of PLA, ABS and nylon 6 fabricated using fused deposition modeling and injection molding. *Composites Part B: Engineering*, 176, 107341.
- Li, M., Du, W., Elwany, A., Pei, Z., & Ma, C. (2020). Metal binder jetting additive manufacturing: A literature review. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 142, 090801.
- Liu, Z., Lei, Q., & Xing, S. (2019). Mechanical characteristics of wood, ceramic, metal and carbon fiber-based PLA composites fabricated by FDM. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(5), 3741–3751.
- Liverani, E., Rogati, G., Pagani, S., Brogini, S., Fortunato, A., & Caravaggi, P. (2021). Mechanical interaction between additive-manufactured metal lattice structures and bone in compression: Implications for stress shielding of orthopaedic implants. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 121, 104608.
- Loughborough University. (25.12.2025). *Binder jetting*. Retrieved from <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/binderjetting/>
- Ma, S., Zhu, R., Yang, S., Yang, Q., Wei, K., & Qu, Z. (2024). Influence of geometric imperfections on the mechanical behavior for Invar 36 alloy lattice structures fabricated by selective laser melting. *International Journal of Mechanical Sciences*, 274, 109252.
- Maskery, I., Aboulkhair, N. T., Aremu, A. O., Tuck, C. J., Ashcroft, I. A., Wildman, R. D., & Hague, R. J. M. (2016). A mechanical property evaluation of graded density Al-Si10-Mg lattice structures manufactured by selective laser melting. *Materials Science and Engineering: A*, 670, 264–274.
- Maskery, I., Parry, L. A., Padrão, D., Hague, R. J. M., & Ashcroft, I. A. (2022). FLatt Pack: A research-focussed lattice design program. *Additive Manufacturing*, 49, 102510.
- McGregor, M., Patel, S., McLachlin, S., & Vlasea, M. (2021). Architectural bone parameters and the relationship to titanium lattice design for powder bed fusion additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 47, 102273.
- Mohan, N., Senthil, P., Vinodh, S., & Jayanth, N. (2017). A review on composite materials and process parameters optimisation for the fused deposition modelling process. *Virtual and Physical Prototyping*, 12, 47–59.
- Nazir, A., Abate, K. M., Kumar, A., & Jeng, J.-Y. (2019). A state-of-the-art review on types, design, optimization, and additive manufacturing of cellular structures. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 104, 3489–3510.
- Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143, 172–196.
- nTop, Next-Gen Engineering Design Software: nTop, 2025.

- Pan, C., Han, Y., & Lu, J. (2020). Design and optimization of lattice structures: A review. *Applied Sciences*, 10(18), 6374.
- Peng, K., Cai, G. S., Hu, B., & Huang, X. N. (2023). Investigation on effect of pillar size on the comprehensive properties of Ti6Al4V lattice fabricated by selective laser melting. *Materials Science and Engineering: A*, 892, 146037.
- Rasiya, G., Shukla, A., & Saran, K. (2021). Additive manufacturing-A review. *Materials Today: Proceedings*, 47, 6896–6901.
- Rezaei, R., et al. (2017). Mechanical characterization and finite element modeling of polylactic acid BCC-Z cellular lattice structures fabricated by fused deposition modeling. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 231(11), 1995–2004.
- Sabzi, H. E. (2019). Powder bed fusion additive layer manufacturing of titanium alloys. *Materials Science and Technology*, 35, 875–890.
- Sanchez, S., Smith, P., Xu, Z., Gaspard, G., Hyde, C. J., Wits, W. W., ... & Clare, A. T. (2021). Powder bed fusion of nickel-based superalloys: A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 165, 103729.
- Savio, G., Meneghello, R., & Concheri, G. (2019). Design of variable thickness triply periodic surfaces for additive manufacturing. *Progress in Additive Manufacturing*, 4(3), 281–290.
- Schwarz, H. A. (1972). *Gesammelte mathematische Abhandlungen*. Providence, RI: American Mathematical Society.
- Seharing, A., Azman, A. H., & Abdullah, S. (2020). A review on integration of lightweight gradient lattice structures in additive manufacturing parts. *Advances in Mechanical Engineering*, 12(6).
- Shirazi, S. F. S., Gharekhani, S., Mehrali, M., Yarmand, H., Metselaar, H. S. C., Kadri, N. A., & Abu Osman, N. A. (2015). A review on powder-based additive manufacturing for tissue engineering: Selective laser sintering and inkjet 3D printing. *Science and Technology of Advanced Materials*, 16, 033502.
- Sui, Q., Fan, H., & Lai, C. (2015). Failure analysis of 1D lattice truss composite structure in uniaxial compression. *Composites Science and Technology*, 118, 207–216.
- Tang, Y., & Zhao, Y. F. (2016). A survey of the design methods for additive manufacturing to improve functional performance. *Rapid Prototyping Journal*, 22(3), 569–590.
- Tao, W., & Leu, M. C. (2016). Design of lattice structure for additive manufacturing. In *2016 International Symposium on Flexible Automation (ISFA)* (pp. 1-8). IEEE.
- Teng, F., et al. (2022). Topological and mechanical properties of different lattice structures based on additive manufacturing. *Micromachines*, 13(7), 1017.
- Wally, Z. J., Haque, A. M., Feteira, A., Claeysens, F., Goodall, R., & Reilly, G. C. (2019). Selective laser melting processed Ti6Al4V lattices with graded

- porosities for dental applications. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 90, 20–29.
- Wang, T., et al. (2019). Dynamic crushing analysis of a three-dimensional re-entrant auxetic cellular structure. *Materials*, 12(3), 460.
- Wong, K. V., & Hernandez, A. (2012). A review of additive manufacturing. *ISRN Mechanical Engineering*, 2012, 208760.
- Xiao, Z., Fang, J., Sun, G., & Li, Q. (2015). Crashworthiness design for functionally graded foam-filled bumper beam. *Advances in Engineering Software*, 85, 81–95.
- Xie, Y., Mao, Y., Heng, Y., Tao, J., Xiang, L., Qin, X., & Wei, Q. (2025). Mechanical responses of triply periodic minimal surface gyroid lattice structures fabricated by binder jetting additive manufacturing. *Journal of Materials Research and Technology*, 35, 2803–2814.
- Xu, M., Guo, H., Wang, Y., Hou, Y., Dong, Z., & Zhang, L. (2023). Mechanical properties and microstructural characteristics of 316L stainless steel fabricated by laser powder bed fusion and binder jetting. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 4427–4439.
- Yap, C. Y., Chua, C. K., Dong, Z., Liu, Z., Zhang, D., Loh, L. E., & Sing, S. L. (2015). Review of selective laser melting: Materials and applications. *Applied Physics Reviews*, 2, 041101.
- Yin, H., Zhang, W., Zhu, L., Meng, F., Liu, J., & Wen, G. (2023). Review on lattice structures for energy absorption properties. *Composite Structures*, 304.
- Yu, G.-C., Wu, L.-Z., & Feng, L.-J. (2015). Enhancing the thermal conductivity of carbon fiber reinforced polymer composite laminates by coating highly oriented graphite films. *Materials & Design*, 88, 1063–1070.
- Yu, X., Zhang, Q., Kontopoulou, A., Allegri, G., Schenk, M., & Scarpa, F. (2022). In-plane elasticity of beetle elytra inspired sandwich cores. *Composite Structures*, 300, 116155.
- Zhang, X., Jiang, L., Yan, X., Wang, Z., Li, X., & Fang, G. (2023). Regulated multi-scale mechanical performance of functionally graded lattice materials based on multiple bioinspired patterns. *Materials & Design*, 226.
- Zhao, M., et al. (2022). Design and mechanical performances of a novel functionally graded sheet-based lattice structure. *Additive Manufacturing*, 52, 102676.
- Ziaee, M., & Crane, N. B. (2019). Binder jetting: A review of process, materials, and methods. *Additive Manufacturing*, 28, 781–801.

Bölüm 14

İÇ YÜZEYİNDE DİKDÖRTGEN KESİTLİ DÜZ KANATÇIKLAR BULUNAN BİR BORUDA NANOAKIŞKAN AKIŞININ AKIŞ VE ISIL KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ

Enes Yasin CANVERDİ¹, Tolga DEMİRCAN²

1 Makine Müh., Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü. enesyasincanverdi06@gmail.com

2 Doç. Dr., Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü. tolgademircan@gmail.com ORCID No: <http://orcid.org/0000-0003-4805-6428>

1.Giriş

Dünyamızda enerjiye olan talep sürekli olarak artmaktadır. Bu durum farkı enerji kaynaklarına yönelme gereksinimi doğurmaktadır. Günümüzde enerji üretiminin büyük bir kısmı fosil kaynaklı yakıtlar aracılığı ile gerçekleşmektedir. Ancak fosil yakıtların kısıtlı rezerve sahip olmaları, çevreye ve canlılara olan zararları vb. olumsuz özellikleri nedeniyle, son yıllarda yenilenebilir enerji kaynakları önem kazanmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından birisi olan güneş enerjisi, güneş toplayıcıları aracılığı ile toplanarak elektrik enerjisine dönüştürülebilmektedir. Günümüzde birçok farklı güneş toplayıcı tipi bulunmaktadır. Bu çalışmada, parabolik oluk tipi güneş toplayıcıları üzerine yoğunlaşmıştır. Parabolik oluk tipi güneş toplayıcıları, güneşten gelen güneş ışınlarının yansıtıcı bir yüzey aracılığı ile toplayıcı tüp üzerine odaklanarak yansıtılması prensibi ile çalışmaktadırlar. Bu sayede, toplayıcı tüp içerisinde geçen akışkan yüksek sıcaklıklara ulaşabilmektedir. Genellikle bu tüp içinde yağ, su vb. akışkanlar dolaşmaktadır. Ancak özellikle son yıllarda, güneş toplayıcılarında nanoakışkanlarında kullanıldığı uygulamalara rastlanılmaktadır.

Nanoakışkanlar, bir baz akışkan içerisine nano boyutta partüküllerin belirli oranlarda ilave edilmesi ile oluşturulmaktadır. Bu katı partüküller, baz akışkan içerisinde çözülmeden asılı olarak kalmakta ve yüksek iletkenlikleri nedeniyle oluşan nanoakışkanın ısı iletkenliğini artırmaktadır. Bundan dolayı, günümüzde nanoakışkanlar birçok ısı uygulama alanında kullanılmaktadır. Baz akışkanların içine nano partiküllerin istenilen oranda eklenmesi ile, oluşan nanoakışkanın ısı iletim katsayısı, yoğunluğu, ısı tutma kapasitesi, viskozitesi vb. temel özellikleri kontrol edilebilmektedir. Bu sayede gerçekleşen ısı transferi artırılabilir.

Literatür incelendiğinde, nanoakışkanlar veya güneş toplayıcıları üzerine yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda verilmektedir. Tarkan [1] bir otomobil radyatöründe su-grafen bazlı nano boyutta akışkan kullanmıştır ve bu şekilde soğutma performansını deneysel olarak incelemiştir. Deney düzeneğini motor soğutma sistemine benzer bir şekilde tasarlamıştır. Dört farklı tip nanoakışkan kullanmıştır. 4 ila 16 l/dk arasında 6 farklı hacimsel debi ile deneylerini gerçekleştirmiştir. Sonuç olarak %0,002 konsantrasyonuna sahip nanoakışkan kullanıldığında ısı aktarım hızında %47, toplam ısı geçiş katsayısında %52 ve Nusselt sayısında

%34 artış temin etmiştir. %0,02 konsantrasyonun üzerine çıktıklarında ise motor soğutma performansının azaldığını gözlemlemiştir. Akdağ ve Akçay [2] eliptik bir boru demeti üzerinden nanoakışkan geçirilmesi durumunda gerçekleşen ısı geçişini sayısal olarak incelemişlerdir. Birbirinden değişik kesit alana sahip olan eliptik boruları aşamalı olarak yerleştirilerek, iki boyutlu analizler gerçekleştirmişlerdir. Reynolds sayısını ve eliptik kanalın en/boy oranını değiştirerek analizler yapmışlardır. Yapılan incelemelerde hacimsel karşım oranını ve kullanılan nanoakışkanın tipini sabit olarak belirlemişlerdir. Sonuç olarak ısı geçişindeki artışın eliptik kanal kesitinden ve Reynolds sayısından oldukça etkilendiğini göstermişlerdir. En/boy oranını değerinin 1 ve Reynolds sayısının 1000 olduğu durumda, en yüksek ısı geçiş performansı elde ettiklerini belirtmişlerdir.

Martin ve Boran [3] bir ısı borusunda CuO/su ve CuO+Fe/su nanoakışkan tipleri kullanıldığında gerçekleşen ısı transferini deneysel olarak incelemişlerdir. Deneylerin sonucunda nanoakışkan kullanımının saf suya göre daha fazla ısı verim sağladığını tespit etmişlerdir. Isı transfer akışkanı olarak CuO/su ve CuO+Fe/su nanoakışkanı kullanımı durumunda, sadece su kullanımına oranla sırasıyla %68 ve %87 verim artışı gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Tüzün [4] mikro ve mini kanala sahip ısı değiştiricilerinde nanoakışkan olarak Al_2O_3 kullanarak, farklı hacimsel oranlar için gerçekleşen ısı geçişinin değişimini incelemiştir. Kanal çaplarını iki dairesel boru için sıra ile 1 mm, 0,1 mm olarak belirlemiştir. Nanoakışkanın hacimsel oranlarını %1, %2, %5, %8 olacak şekilde değiştirerek, basınç düşüşü ve ısı geçiş değerlerini elde etmiştir. Sonuç olarak, %8 hacimsel oranındaki Al_2O_3 -su nanoakışkanı kullanıldığı durum için, 1mm çapa sahip olan kanalda gerçekleşen ısı transferinin en yüksek seviyede olduğunu gözlemlemiştir.

Perçin [5] bir ısı eşanjöründe basınç düşüşünü ve nanoakışkan kullanımının ısı etkilerini incelemiştir. Bu kapsamda farklı hacimsel oranlara sahip hBN-su nanoakışkanı kullanılarak, değişik debi değerleri için incelemelerde bulunmuştur. Sonuç olarak hBN-su nanoakışkanının kullanımı ile saf su kullanımına göre ısı transfer katsayısında %16,7'lik bir artış gözlemlemiştir. Naik ve ark. [6] çift borulu sarmal bir ısı eşanjöründe, gerçekleşen ısı transferinin iyileştirilmesi amacıyla nanoakışkan kullanımını sayısal olarak incelemişlerdir. Bu kapsamda nanoakışkanın hacimsel oranını %2 ile %8 arasında değiştirerek üç boyutlu sayısal analizler gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak, nanoakışkan içerisinde bulunan

nanoparçacığın hacimsel oranının artması ile ısı eşanjöründe gerçekleşen ısı transferinin arttığını gözlemlemişlerdir. Kaushik ve ark. [7] spiral bir boruda nanoakışkan kullanımının akış yapısı ve ısı transferi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu kapsamda Al_2O_3 , ZnO ve CuO nano partiküllerinin suya ilave edilmesi ile oluşturulan nanoakışkanları kullanmışlardır. Sonuç olarak alüminyum nano partikülü katkılı nanoakışkan kullanımının, diğer nanoakışkanlara oranda daha yüksek termal performans sağladığını gözlemlemişlerdir.

Gnanavel ve ark. [8] bir çift borulu ısı eşanjöründe ısı transferini iyileştirmeyi amacıyla, nanoakışkan kullanımını ve spiral bir yay eklentisinin ısı performans üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Nanoakışkan olarak su, titanyum dioksit, berilyum oksit, çinko oksit ve bakır oksit kullanmışlardır. Sonuç olarak artan Reynolds sayısı ile Nusselt sayısının arttığını gözlemlemişlerdir. Nanoakışkan kullanımının ısı performansı artırdığını belirtmişlerdir. Nakhchi ve ark. [9] delikli silindirik türbülatorler eklenmiş çift borulu ısı eşanjörlerinde CuO ilaveli nanoakışkanının kullanımının ısı performans ve entropi üretimi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Delikli silindirik türbülator kullanımının termal sınır tabakayı bozduğunu ve gerçekleşen ısı transferini artırdığını belirtmiştir. Awais ve ark. [10] bir ısı değiştiricisinde serpantin boru geometrisinin ve nanoakışkan kullanımının ısı transfer performansı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Farklı hacimsel karışım oranları, farklı akış hızları ve farklı enine kesitlere sahip serpantin borular için sayısal analizler yapmışlardır. Sonuç olarak, düşükten yükseğe (LH) enine kesite sahip serpantin borunun diğer kesitlere sahip boru tiplerine göre daha yüksek ısı transfer performansı sağladığını belirtmişlerdir. Yüksek hacimsel konsantreye sahip nanoakışkan kullanımının ısı transfer katsayısını olumlu yönde etkilediğini gözlemlemişlerdir.

Maddah ve ark. [11] çift borulu bir ısı eşanjöründe Al_2O_3 - TiO_2 hibrit nanoakışkanının kullanılması durumunda eşanjörün ısı performansını incelemişlerdir. Sonuç olarak ısı transfer akışkanı olarak nanoakışkanların kullanımının, geleneksel ısı transfer akışkanı olan suyun kullanılmasına kıyasla ekserji verimliliğini artırdığı sonucuna varmışlardır. Abu-Hamdeh ve ark. [12] helisel olarak sarılmış bir boruya sahip bir ısı değiştiricisi için ekserji analizi yapmışlar ve elde ettikleri sonuçları iç içe geçmiş boru tip bir ısı değiştiricisi ile kıyaslamışlardır. Elde ettikleri veriler yardımıyla, ekserji performans katsayısı ve ekserji verimliliğinin tahmini için yeni denklemler

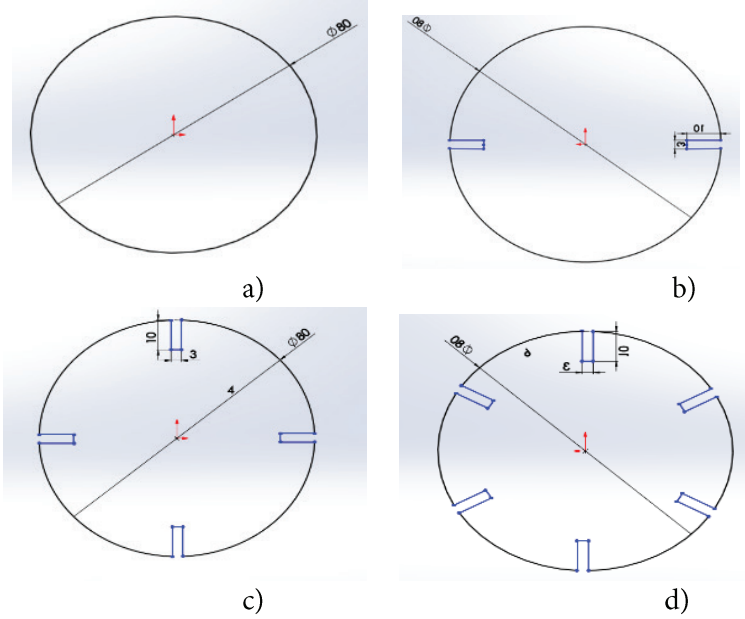
önermişlerdir. Sonuç olarak boyutsuz serpantin çapının iki katına çıkarılması durumunda yarım daire kesitli, çeyrek daire kesitli ve iç içe borulu ısı değiştiricilerinde, ekserji veriminin sırasıyla %21,8, %25,7 ve %21,1 oranında, ekserji performans katsayısının ise yine sırasıyla %8, %9,3 ve %14,8 oranında azaldığını tespit etmişlerdir. Heidary ve ark. [13] düz bir kanalda nanoakışkan kullanıldığı durumda zorlamış konveksiyonla gerçekleşen ısı transferinde manyetik alan etkisini sayısal olarak incelemişlerdir. Farklı Reynolds sayıları, nanoakışkan hacim oranları ve Hartmann sayıları için incelemelerde bulunmuşlardır. Sonuç olarak kullanılan nano parçacıklar ve manyetik alan varlığından dolayı, kanal içindeki ısı transferinin %75'e kadar artabileceğini belirtmişlerdir. Sundar ve ark. [14] bir plakalı ısı eşanjöründe, nanoelmas/su nanoakışkan akışını incelemişler ve ısı eşanjörünün entropi ve ekserji verimliliğini belirlemek için analizler yapmışlardır. Sonuçlar su ile karşılaştırıldığında nanoakışkanın %1 hacimsel karışım oranı için, ısı transfer katsayısı ve Nusselt sayısının sırasıyla %55,47 ve %35,11 arttığını, termal entropi üretiminin ise %20,66 azaldığını belirtmişlerdir.

Yukarıda verilen literatür incelemelerinden de görüldüğü üzere, literatürde ısı değiştiriciler ve nanoakışkanlar üzerine yapılmış çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalarda ısı değiştirici tipi, geometrisi, akışkan tipi, akışkan giriş sıcaklığı, giriş debisi vb. birçok farklı parametrenin ısı transferi üzerindeki etkilerinin incelendiği görülmüştür. Bu çalışma kapsamında, literatür incelemesinde fazla rast gelinmemiş olan hegzagonal bor nitrür (hBN) nano partikülünün su içine ilave edilmesi ile oluşan nanoakışkan ısı transfer akışkanı olarak tercih edilmiştir. Bu kapsamda farklı kanatçık sayılarına sahip 4 farklı model ve 4 farklı hacimsel karışım oranı için incelemeler yapılmıştır. Bu sayede bir boruya düz kanatçık ilavesinin ve nanoakışkan kullanımının ısı taşınım katsayısı ve Nusselt sayısı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada bir boru içerisinde ısı transfer akışkanı olarak nanoakışkan kullanımının ısı performans üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu amaçla 0,08 m çapında ve 2 m uzunluğunda bir boru ele alınmış ve Model-A geometrisi oluşturulmuştur. Bu borunun iç kısmına boru uzunluğu boyunca 2, 4 ve 6 adet kanatçık eklenerek, sırasıyla Model-B, Model-C ve Model-D geometrileri oluşturulmuştur. Borunun dış yüzeyine 1100 W/m^2 'lik

bir ısı akısı uygulandığı kabul edilmiştir. Borunun içerisinde su-hBN nano akışkanının aktığı düşünülmüştür. Belirlenen dört model geometri için farklı hacimsel konsantrasyonlara sahip nanoakışkan akışları için sayısal analizler yapılmıştır. İncelenen geometriler Şekil 1’de verilmektedir.



Şekil 1. Model geometrileri a)Model-A, b)Model-B, c)Model-C ve d)Model-D

İncelenen parametrelerin ısı performans üzerindeki etkilerinin sayısal olarak incelenebilmesi için, belirlenen sınır şartları için problemin temel diferansiyel denklemlerinin çözülmesi gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında incelenen problemin süreklilik, momentum ve enerji denklemlerinin genel hali sırasıyla Eşitlik 1, Eşitlik 1 ve Eşitlik 3’de verilmektedir [15].

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial P}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

Reynolds sayısı, ısı taşınım katsayısı ve Nusselt sayısı sırasıyla Eşitlik 4, Eşitlik 5 ve Eşitlik 6'da verilen denklemler [16] aracılığı ile bulunabilir.

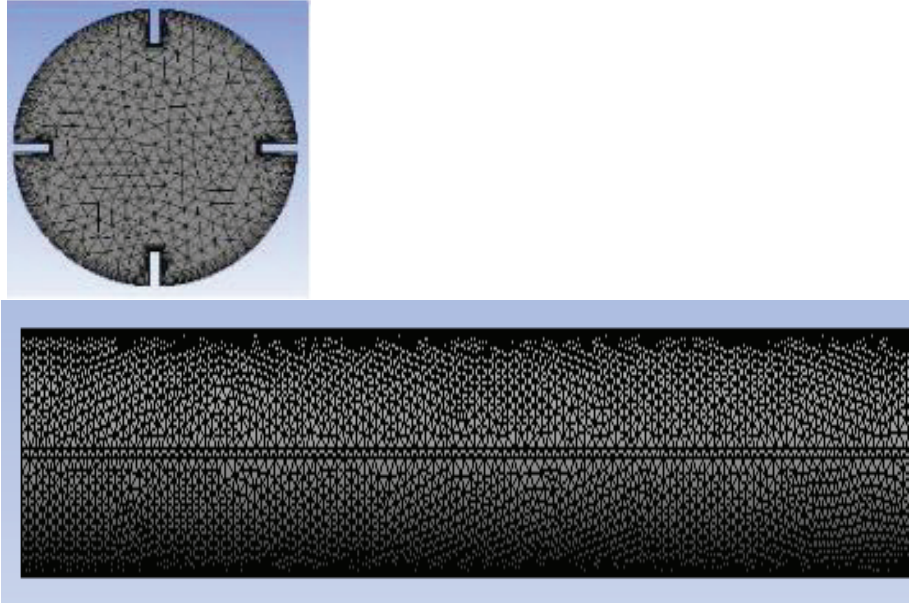
$$Re = \frac{\rho_{nf} V D_h}{\mu_{nf}} \quad (4)$$

$$h = \frac{q''}{\Delta T} = \frac{q''}{T_w - T_b} \quad (5)$$

$$Nu = \frac{h D_h}{k_{nf}} \quad (6)$$

Çalışmada kullanılan her model için aynı sınır şartları kullanılmıştır. Tüm modellerde borunun dış yüzeyleri duvar olarak kabul edilerek sabit 1100 W/m² ısı akısının uygulandığı kabul edilmiştir. Borunun giriş kesitinden hBN-su nanoakışkan karışımının 0,1256 m/s sabit hızla ve 300 K sabit sıcaklıkla boru içerisine girdiği kabul edilmiştir. Boru çıkışına ise atmosfer basıncı uygulanmıştır.

Bu çalışmada incelenen problemin süreklilik, momentum ve enerji denklemleri verilen sınır şartları için hesaplamalı akışkanlar dinamiği yardımıyla, Fluent paket programı aracılığı ile sayısal olarak çözülmüştür. Bu çözüm sırasında SIMPLE algoritması kullanılmıştır. Nanoakışkanın modellenmesi için Multiphase (Mixture) yaklaşımı tercih edilmiştir. Diferansiyel denklemlerin çözümü sırasında, yakınsama kriteri 10⁻⁶ olarak alınmıştır. Farklı eleman sayısına sahip ağ yapıları denenerek, Model-A, Model-B, Model-C ve Model-D için, sırasıyla 104893, 663642, 1142756 ve 1526376 eleman sayısına sahip ağ yapıları optimum ağ yapısı olarak belirlenmiştir. Dört adet kanatçığa sahip Model-C geometrisi için kullanılan ağ yapısının sol ve ön görünüşü Şekil 2'de verilmiştir.



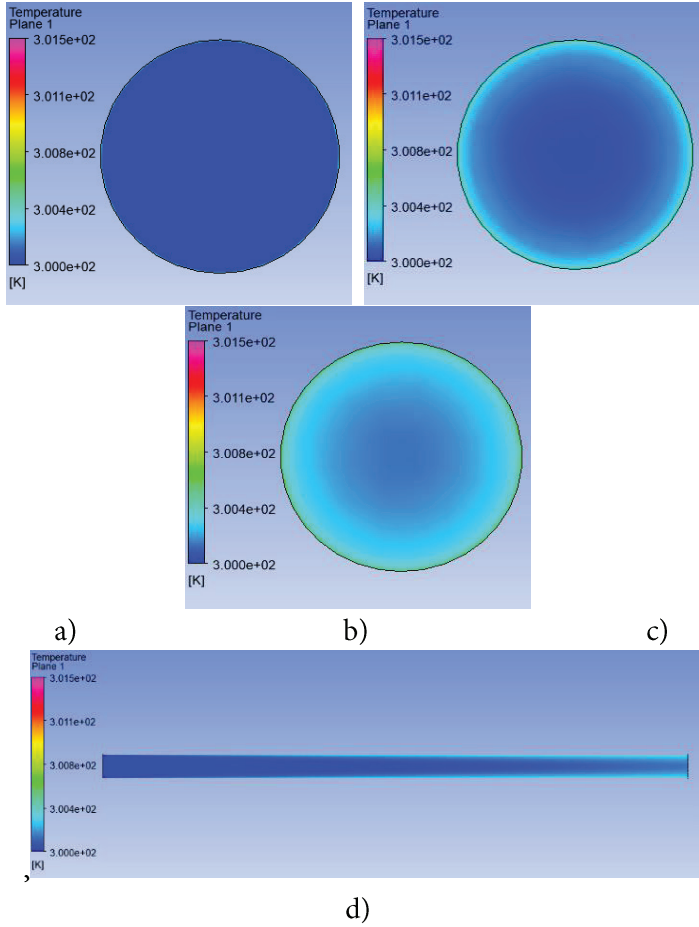
Şekil 2. Model-C'nin ağ yapısı

3. Bulgular ve Tartışmalar

Bu çalışmada incelenen dört farklı model geometri için, farklı nanoakışkan hacimsel karışım oranlarında sayısal analizler yapılmıştır. Elde edilen veriler yardımıyla bir borunun iç kısmına akış boyunca dikdörtgen kanatçıklar eklenmesinin ve farklı hacimsel karışım oranlarında nanoakışkan kullanımının ısı etkileri belirlenmeye çalışılmıştır. Bu kapsamda incelenen parametrelere göre, akışın sıcaklık dağılımının, ortalama sıcaklığının, Nusselt sayısının, ısı taşınım katsayısının vb. değişimleri irdelenmiştir. Bu kapsamda elde edilen bazı şekil ve grafikler aşağıda verilmiştir.

Nanoakışkanın hacimsel oranı %3 olduğu durumda, Model-A geometrisinde girişten, akış yönünde tam ortadan, çıkıştan alınan dik kesitler ve akış boyunca alınan enine kesit için sıcaklık dağılımları Şekil 3'de verilmektedir. Şekil 3a incelendiğinde giriş kesitinde sıcaklığın tüm kesit boyunca giriş sıcaklığında olduğu ve değişmediği görülmektedir. Şekil 3b'de borunun akış yönünde tam ortası olan 1m mesafede alınan kesit için sıcaklık dağılımı görülmektedir. Bu kesit incelendiğinde, borunun duvar yüzeyleri ile

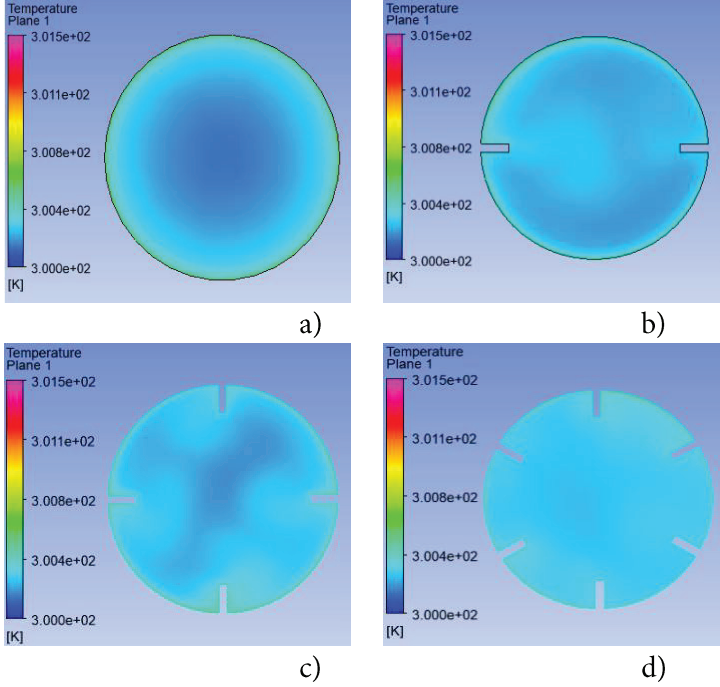
boru merkezi arasında sıcaklık farkının olduğu, dolayısıyla kesit boyunca farklı sıcaklık bölgeleri olduğu gözlemlenmektedir. Şekil 3c'de ise borunun çıkış kesitinde, sıcaklık değerlerinin boru dış yüzeylerinden boru merkezine doğru azaldığı görülmektedir. Şekil 3d'de akış boyunca enine alınan bir kesit için sıcaklık dağılımı verilmektedir. Şekil incelendiğinde ısı sınır tabaka oluşumu görülebilmektedir. Ortalama sıcaklık değeri boru girişinden, boru çıkışına doğru artış göstermektedir.



Şekil 3. Model-A ve %3 hacimsel oranda farklı kesitler için sıcaklık dağılımları a)giriş b)orta c)çıkış d)akış boyunca

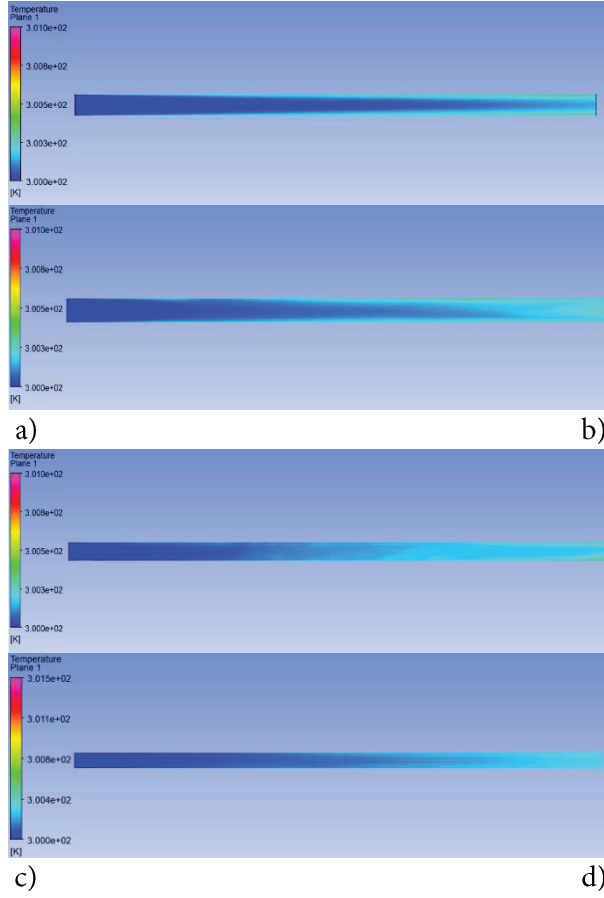
Şekil 4'de ise kullanılan dört model için %4 hacimsel oran durumunda çıkış kesitinde alınan sıcaklık değerleri birlikte verilmektedir. Şekilden de görüleceği üzere modeller için elde edilen sıcaklık dağılımları birbirlerine benzer bir yapıdadır. Genel olarak boru yüzeylerine yakın bölgelerde daha

yüksek sıcaklıklar gözlemlenirken, boru merkezine doğru sıcaklık değerleri bir miktar azalış göstermektedir. Ancak boru içerisine eklenen kanatçık sayısı artırıldığı zaman, yüzey sıcaklıklarının ve ortalama akışkan sıcaklığının arttığı gözlemlenmiştir.



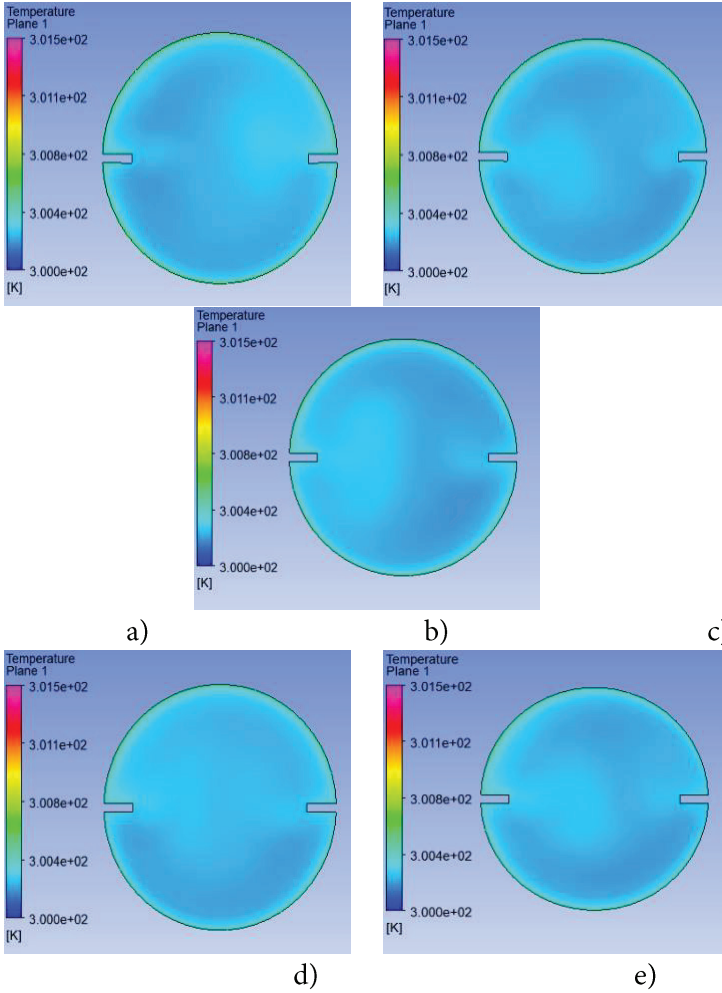
Şekil 4. Hacimsel oran %4 olduğunda farklı model geometrileri için çıkış kesitinden alınan sıcaklık dağılımları a) Model-A, b) Model-B, c) Model-C, d) Model-D

Şekil 5’de ise belirlenen 4 model için hacimsel oran %4 olduğu durumunda borunun x düzlemi boyunca elde edilen sıcaklık dağılımlarının görünümü verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere tüm modellerde benzer bir sıcaklık dağılımı söz konusudur. Genel olarak boru girişinde soğuk olarak giren akışkanın sıcaklığı akış yönünde artış göstermekte ve boru çıkışında en yüksek değerine ulaşmaktadır. Boru boyunca oluşan ısıl sınır tabakalar görülmektedir. Borunun kanatçık sayısının artması ile birlikte sıcaklığın boru çıkışına doğru daha çok arttığı ve çıkışa doğru ısıl sınır tabaka kalınlığının arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 5. Hacimsel oran %4 olduğunda farklı model geometrileri için akış kesiti boyunca sıcaklık dağılımı a) Model-1, b) Model-2, c) Model-3, d) Model-4

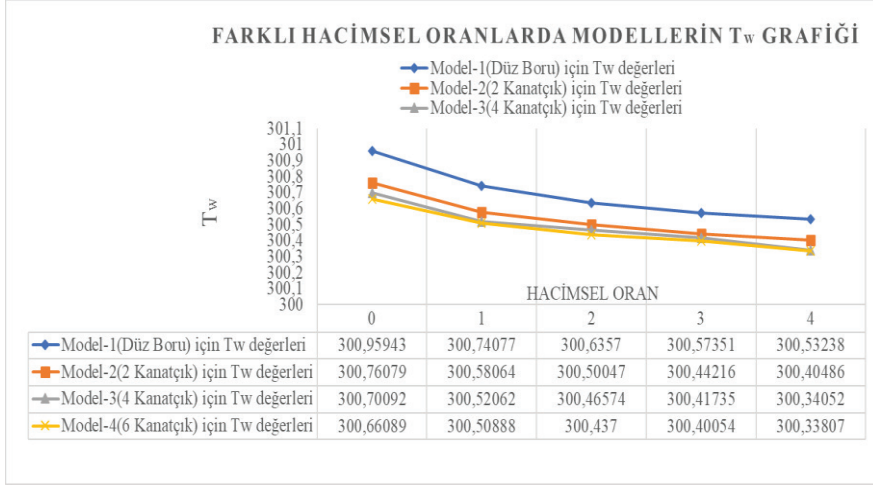
Şekil 6'da ise Model-2 geometrisinin 1,99 m'den alınan kesitler için farklı konsantrasyon oranlarındaki sıcaklık dağılımları birlikte verilmiştir. Şekiller incelendiğinde tüm konsantrasyon oranları için benzer bir sıcaklık dağılımı gözlemlenmektedir. Genel olarak boru yüzeylerine yakın bölgelerde maksimum akışkan sıcaklığı, boru merkezinde ise minimum boru sıcaklığı gözlemlenmiştir. Hacimsel konsantrasyon oranının artışı ile beraber akışkan sıcaklığın bir miktar arttığı ve ısı sınır tabaka kalınlığının arttığı görülmektedir. Dolayısıyla akışın konsantrasyon oranının artmasının ısı transferini olumlu yönde etkilediği söylenebilir.



Şekil 6. Model 2’de farklı hacimsel oranlar için sıcaklık dağılımı a) %0, b) %1, c) %2, d) %3, e) %4

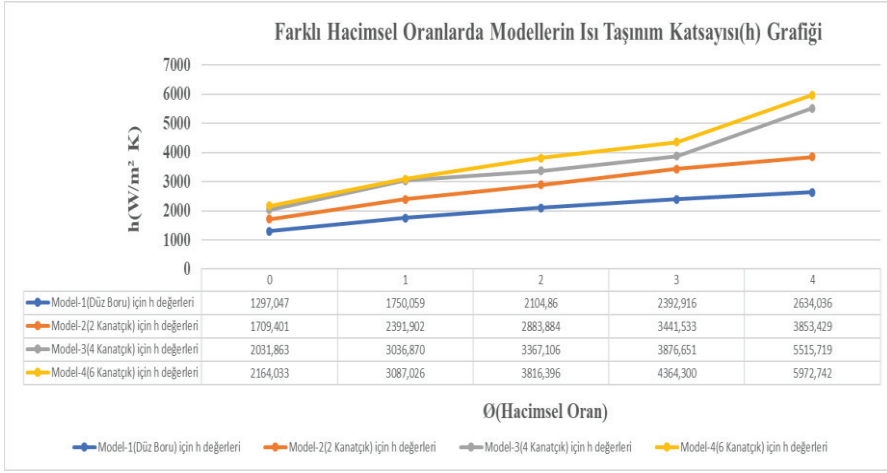
Şekil 7’de farklı model geometrileri için boru ortalama yüzey sıcaklığının hacimsel konsantrasyon oranı ile değişimi birlikte verilmiştir. Şekil incelendiğinde tüm modeller için, hacimsel konsantrasyon oranının artışı ile boru ortalama yüzey sıcaklığının azaldığı görülmektedir. Bu durum hacimsel konsantrasyon oranının artışı ile boru yüzeyinden akışkana doğru daha yüksek bir ısı transferi gerçekleşmesi ile ilişkilidir. Sabit konsantrasyon oranı için modeller karşılaştırıldığında, kanatçık sayısının artışı ile boru duvar

sıcaklığının azaldığı belirlenmiştir. En düşük yüzey sıcaklığı altı kanatçığa sahip modelin en yüksek konsantrasyon oranı için gerçekleşmiştir.



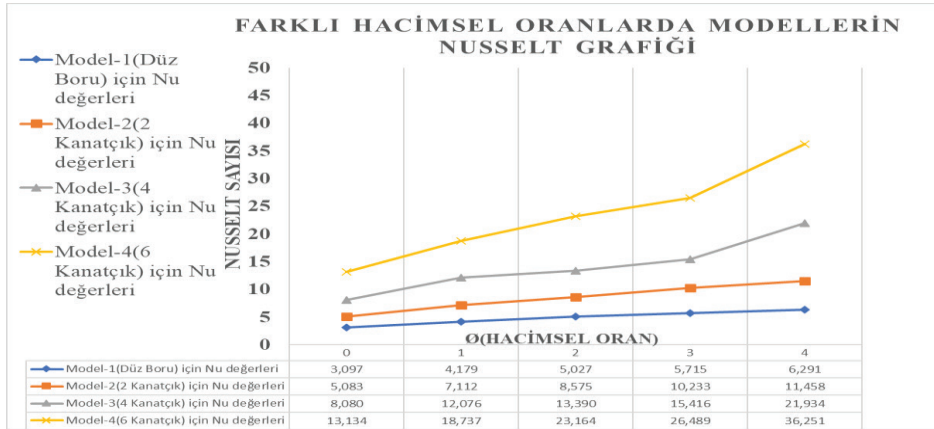
Şekil 7. Farklı model geometrileri için yüzey sıcaklığının hacimsel konsantrasyon oranı ile değişimi

Farklı kanatçık sayısına sahip modeller için ısı taşınım katsayısının (h) hacimsel konsantrasyon oranı ile değişimi Şekil 8'de verilmiştir. Şekil incelendiğinde nanoakışkanın hacimsel konsantrasyon oranı arttıkça ısı taşınım katsayısının da arttığı gözlenmiştir. Tüm modeller için çizilen eğriler benzer bir profil göstermiştir. Sabit hacimsel konsantrasyon oranı için, kanatçık sayısının artması ile ısı taşınım katsayısının değerinin de arttığı belirlenmiştir. %4 hacimsel konsantrasyon oranı için, Kanatçıksız olan Model-1 ile 6 kanatçığa sahip olan Model-4 kıyaslandığında ısı taşınım katsayısının yaklaşık olarak %126 kadar arttığı görülmektedir.



Şekil 8. Farklı model geometrileri için ısı taşınım katsayısının (h) hacimsel konsantrasyon oranı ile değişimi

Şekil 9’da ise farklı kanatçık sayısına sahip geometriler için Nusselt sayısının hacimsel karışım oranı ile değişimi verilmektedir. Nanoakışkanın hacimsel karışım oranının artışı ile ortalama Nusselt sayısının artış göstermiştir. Bu durumun hacimsel oranın artması ile nanoakışkan içine katılan nano partikül miktarının artması, dolayısıyla nanoakışkanın iletim katsayısının artması kaynaklı olduğu söylenebilir. Şekilde kanatçık sayısının artmasının da Nusselt sayısını artırdığı görülmektedir. En yüksek Nusselt sayısı değeri, 6 kanatçıklı model-4 için hacimsel konsantrasyon oranının %4 olduğu durumda gözlemlenmiştir. Boru iç yüzeyine kanatçık eklenmesi ve nanoakışkan kullanılmasının ısı transferini olumlu yönde etkilediği söylenebilir.



Şekil 9. Farklı model geometrileri için Nusselt sayısının hacimsel konsantrasyon oranı ile değişimi

4. Sonuçlar

Bu çalışmada parabolik oluk tipi güneş toplayıcılarında Hegzagonal bor nitrür (hBN) nano akışkanının kullanımının ısı performans üzerindeki etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Bu amaçla parabolik güneş toplayıcısının tüp borusunun içine farklı sayıda kanatçıklar eklenerek 4 farklı model geometrisi oluşturulmuştur. Bu model geometrilerde hBN/su nanoakışkanının farklı hacimsel karışım oranları için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yardımı ile analizler yapılmıştır. Analizlerden elde edilen veriler kullanılarak, kanatçık sayısının ve nanoakışkan karışım oranının değişiminin, parabolik oluk tipi güneş toplayıcılarının ısı performans üzerindeki etkileri irdelenmiştir. Sonuç olarak, toplayıcı tüp boru içindeki kanatçık sayısının ve nanoakışkan hacimsel karışım oranının artışının ısı transferi üzerinde olumlu bir etkiye neden olduğu gözlemlenmiştir. İncelenen parametre aralığında en yüksek ısı transferinin Model-4 (6 kanatçık) geometrisi ve %4 hacimsel konsantrasyon oranı için gerçekleştiği belirlenmiştir.

Kaynakça

1. Koca, T. (2020) Otomobil radyatöründe su bazlı grafen nanoakışkan kullanımının ısı verimliliğe etkisinin deneysel olarak incelenmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 3, 1157-1166.
2. Akdağ, Ü. ve Akçay, S. (2019). Eliptik boru demeti üzerinden geçen nanoakışkanların laminar akışının ısı transferine etkisi. *İzmir: 14. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, 770-780.
3. Martin, K. ve Boran, K. (2021). Isı borulu havadan havaya ısı değiştiricisinde CuO+Fe/Saf su ve CuO/Saf su nano akışkanlarının kullanımının ısı performansına etkisinin incelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 24(3), 763-770.
4. Tüzün, A. H. (2019). Mikro ve mini kanallı ısı değiştiricilerde nanoakışkan kullanılmasının ısı transferi ve basınç kaybına etkisinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli.
5. Perçin, S. (2019). İç içe borulu ısı değiştiricisinde su-hbn nanoakışkanları kullanılarak ısı performansına ve basınç düşümüne etkilerinin deneysel incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Batman Üniversitesi, Batman.
6. Naik, B., Hosmani, A.H., Kerur, S.M., Jadhav, C.C., Benni, S., Annigeri, S., Javali, T., Aralikatti, P. (2021) Numerical analysis of two tube helical heat exchanger using various nano-fluids, *Materials Today: Proceedings*, 47(11), 3137-3143.
7. Kaushik, S., Singh, S., Panwar, K. (2021). Comparative analysis of thermal and fluid flow behaviour of diverse nano fluid using Al₂O₃, ZnO, CuO nano materials in concentric spiral tube heat exchanger, *Materials Today: Proceedings*, 46(15), 6625-6630.
8. Gnanavel, C., Saravanan, R., Chandrasekaran, M. (2020). Heat transfer augmentation by nano-fluids and Spiral Spring insert in Double Tube Heat Exchanger - A numerical exploration, *Materials Today: Proceedings*, 21(1), 857-861.
9. Nakhchi, M.E., Hatami, M., Rahmati, M. (2021). Effects of CuO nano powder on performance improvement and entropy production of double-pipe heat exchanger with innovative perforated turbulators. *Advanced Powder Technology*, 32(8), 3063-3074.

10. Awais, M., Saad, M., Ayaz, H., Ehsan, M.M., Bhuiyan, A.A. (2020). Computational assessment of Nano-particulate ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Water}$) utilization for enhancement of heat transfer with varying straight section lengths in a serpentine tube heat exchanger. *Thermal Science and Engineering Progress*, 20(1),100521.
11. Maddaha, H., Aghayari, R., Mirzaee, M., Ahmadi, M.H., Sadeghzadeh, M., Chamkha, A.J. (2018). Factorial experimental design for the thermal performance of a double pipe heat exchanger using $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ hybrid nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 97, 92-102.
12. Abu-Hamdeh, N.H., Almitani, K.H., Alimoradi, A. (2021) Exergetic performance of the helically coiled tube heat exchangers: Comparison the sector-by-sector with tube in tube types. *Alexandria Engineering Journal*, 60(1), 979-993.
13. Heidary, H., Hosseini, R., Pirmohammadi, M., Kermani, M.J. (2015) Numerical study of magnetic field effect on nano-fluid forced convection in a channel. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 374, 11-17.
14. Sundar, L.S., Punnaiah, V., Sharma, K.V., Chamkha, A.J., Sousa, A.C.M. (2021) Thermal entropy and exergy efficiency analyses of nanodiamond/water nanofluid flow in a plate heat exchanger. *Diamond and Related Materials*, 120, 108648.
15. Dal, A.R. (2019) Düz plakalı borulu bir ısı değıştiricisinin optimum kanatçık aralığının sayısal analizi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(1), 479-501.
16. Çengel, Y. A., Cimbala J. M. 2006. Fluid Mechanics Fundamentals and Applications, 1st, McGraw-Hill, New York, 288s.