MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ALANINDA GÜNCEL ÇALIŞMALAR

EDİTÖR
PROF. DR. GÜLDEN BAŞYİĞİT KILIÇ

DOI:10.5281/zenodo.10849336

Makina Mühendisliği Alanında Güncel Çalışmalar

Editör

Prof. Dr. Gülden Başyiğit Kılıç

İmtiyaz Sahibi
Platanus Publishing®

Editör
Prof. Dr. Gülden Başyiğit Kılıç

Kapak & Mizanpaj & Sosyal Medya
Platanus Yayın Grubu

Birinci Basım
Mart, 2024

Yayımcı Sertifika No
45813

ISBN
978-625-6454-95-8

© copyright
Bu kitabın yayım hakkı Platanus Publishing'e aittir.
Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin
alınmadan hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Platanus Publishing®

Adres: Natoyolu Cad. Fahri Korutürk Mah. 157/B,
06480, Mamak, Ankara, Türkiye.
Telefon: +90 312 390 1 118
web: www.platanuskitap.com
e-mail: platanuskitap@gmail.com



PLATANUS PUBLISHING®

İçindekiler

1. BÖLÜM 5

KOMPOZİT YAPILARDAKİ HASARLARIN BELİRLENMESİNDE TİTREŞİM VERİLERİ ve DERİN ÖĞRENME YAKLAŞIMI

İlyas BOZKURT

2. BÖLÜM 37

İÇ HAVA KALİTESİNİN İNSAN BEYNİNE ETKİSİ

Ahmet ÇOŞGUN

Burcu Banu ATEŞ

3. BÖLÜM 61

PNÖMATİK MANİPÜLATÖRLERİN İŞ GÜCÜ AZALTMA VE GÜVENLİĞİ ARTIRMADAKİ ROLÜ

Ömer ARAT

Barış ERMAN

Ali KİBAR

4. BÖLÜM 91

CFD INVESTIGATION OF THE THERMAL EFFECT OF MATERIAL VARIATION ON THE EXHAUST MANIFOLD

Haydar KEPEKÇİ

Mehmet Emin AGCA

1. BÖLÜM

KOMPOZİT YAPILARDAKİ HASARLARIN BELİRLENMESİNDE TİTREŞİM VERİLERİ ve DERİN ÖĞRENME YAKLAŞIMI

İlyas BOZKURT[1]

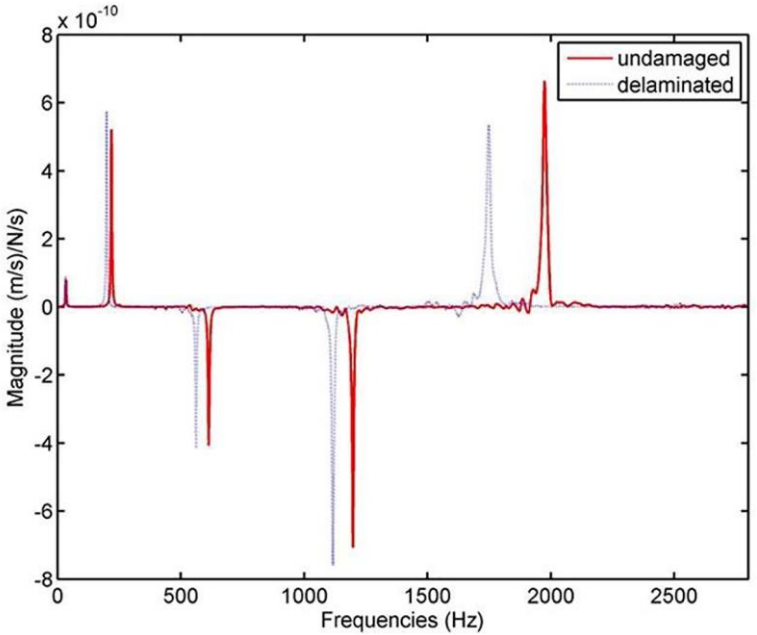
[1]Dr., Muş Alparslan Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0001-7850-2308

Özet

Teknolojinin gelişmesiyle beraber kompozit malzemelerdeki hasarları doğru bir şekilde tahmin etmek için yapay zekanın kullanılmasına büyük ilgi duyulmaktadır. Yapay zekanın alt dalı olan derin öğrenme teknolojisindeki hızlı ilerlemeyle birlikte titreşim tabanlı yapı sağlığı izleme tekniğinde de kullanılmaya başlanmıştır. Bu çalışmada, kompozit yapılardaki hasarların teşhisinde yapay zekâ ve titreşim verilerinin kullanımı incelenmektedir. Çalışmada derin öğrenme, genel olarak tanıtılmış daha sonra hasarların tahmin etme süreci ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır. Bununla birlikte kompozit hasarlarının tahmin edilmesinde kullanılan çeşitli makine öğrenmesi algoritmalarına ve derin öğrenme tekniklerine ayrıntılı bir şekilde yer verilmiştir. Ayrıca çalışmada kompozitlerdeki hasar türlerinin belirlenmesinde kullanılan her yöntemin teorik temelleri, güçlü ve zayıf yönleri belirtilmiştir. Bununla birlikte derin öğrenme yaklaşımının Türkiye'de ve Dünyada kullanılması ile ilgili son durum hakkında istatistiksel bilgiler verilmiştir. Son olarak çalışmada bu alandaki temel zorluklara değinilmiş ve hasar belirlenmesinde gelecekteki araştırma alanları önererek daha ileri araştırmalar için çok kıymetli bilgiler sunulmuştur. Bu çalışmanın bu alanda gelecekte araştırma yapacak araştırmacılara önemli bir referans olması amaçlanmaktadır.

1. Giriş

Titreşim, sıvı akışı, manyetik alanlar, ötelenen ve dönen elemanlar, dengesizlikler, etkileşimler ve sürtünme temasları dahil olmak üzere birçok farklı kaynaktan kaynaklanır. Titreşim modu zamanla değişebilen yapısal özelliklere, geometriye ve sınır koşullarına bağlıdır. Sonuç olarak, titreşim tepkisinin geçici değişimi büyük istatistiksel sapmalar gösterir. Ölçülen değerlerin yorumlanmasındaki zorluklara rağmen yanıt, bir yapının durumu hakkında önemli bilgiler sağlar. Mühendislik teknolojisindeki ilerlemeler yapıların boyutunu ve karmaşıklığını artırmıştır. Beklenmedik hasarlardan kaynaklanan maliyetleri en aza indirmek için sürekli yapı sağlığı izleme tekniklerinin kullanım ihtiyacı artmaktadır. Yapısal bütünlüğü izlemek için titreşimin kullanılması sağlam, verimli ve basit uygulamaya olanak tanır. Ancak titreşimin hasar incelemesi için kullanılması, çok disiplinli araştırma alanlarının anlaşılmasını gerektirir. Worden ve Manson'a göre (2007) yapı sağlığın izlenmesinde temel konu, bir sistemin normal durumdan çıkıp çıkmadığının belirlenmesidir. Ramasamy ve Sampathkumar (2014), hasarı tespit etmek için dört seviyeli bir yöntem önermiştir: (1) yapıdaki hasarın varlığının belirlenmesi; (2) yapıdaki hasarın yerinin belirlenmesi; (3) hasar derecesinin sayısallaştırılması; (4) hasardan etkilenen bir yapının yaşam beklentisinin tahmini. **Şekil 1**'de görüldüğü gibi rijitliği ve yapı stabilitesini azaltan hasar nedeniyle doğal frekanslar daha düşük değerlere kaymıştır. Dolayısıyla sistemdeki hasarlar nedeniyle yapının rijitliği bozulur ve bu etki sinyal dalgalarında düşüş olarak kendini gösteri (Fan vd., 2011).



Şekil 1. Kompozit numunedeki delaminasyon hasarı nedeniyle frekans kaymaları (Fan vd., 2011).

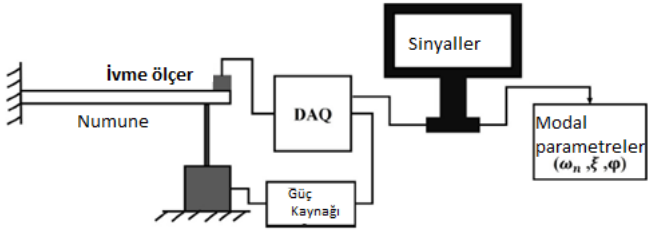
Araştırmacılar makine öğrenmesini yapı sağlığı izlemede uygulamak için çeşitli girişimlerde bulunulmuşlardır. Hızlı gelişmeler, titreşime dayalı sağlık teşhisi için derin öğrenmenin [3] uygulanmasına yol açmıştır. Kar ve Mohanty (2008) ile Singh ve Sa'ad Mohammed (2004) dişli kutusu ve asenkron makinelerdeki kusurları tespit etmek için titreşim sinyalinin Fourier ve dalgacık dönüşümlerini kullandılar. Konar vd., (2008) inceleme için öğrenme modelleri olarak özelliklerin seçilmesinin ve kullanımının verimliliğini araştırmıştır. Karmaşık mühendislik sistemlerinin hasar teşhisi için veriye dayalı yöntemler kullanılmaktadır

(Bozkurt vd., 2023). Test edilen sistemin kinematiği ve fiziğinin çok az anlaşılmasını gerektirirler (Pawar vd., 2008) Bu veriye dayalı yaklaşım iki adım gerektirir: özellik çıkarma ve hata sınıflandırıcı tasarımı. Zaman, frekans ve zaman-frekans analizi, dönen bir makinenin titreşim tepkilerinin özelliklerini çıkarmak için yaygın olarak kullanılır. Bu yöntem laboratuvar ölçeğinde çok doğru bir teşhis performansı sağlar. Bu yüksek doğruluk düzeyi, gerçek işletim sistemlerine uygulandığında fiziksel özelliklere, boyuta veya konuma bağlıdır. Titreşim aynı zamanda kompozit laminat yapıların sağlığını izlemek için de kullanıldı. Geçici tepkileri analiz etmek için doğal frekans, sönüm, mod şekilleri eğriliği, transfer fonksiyonu ve frekans tepkisi kullanılır. Bir yapıya iletilen yüksek frekanslı güdümlü dalganın yayılımı için uçuş süresi kullanılarak kusurların teşhisi yapılmıştır. Düşük frekanslı titreşimin lokalizasyon açısından dezavantajları vardır çünkü tüm yapı uyarılır. Hassas ölçüm için yüksek frekanslı yüzey dalgası yayılımından yararlanılabilir ancak yüksek voltajlı bir güç kaynağının gerekliliği, izleme sisteminin maliyetlerini artırır. Yapıların kırılmasını analiz etmek için ters analiz yöntemi önerildi. Çatlak büyüdükçe yapının ömrü azalır. Bir yapıdaki bilinmeyen bir hasarın yerini tahmin etmek için ters problemler kullanılarak yapıda olması muhtemel hatalar teşhis edilebilir (Khatir vd., 2019). Bir hata sınıflandırıcısının tasarımı, çevrimiçi eğitim için durum izlemeyi gerektirir. Sınırlı kullanılabilirlik nedeniyle sahada arıza verilerinin elde edilmesi zordur. Eğitim için gerekli veriler, laboratuvar test ortamlarından veya eğitim için etiketlenmiş verileri elde etmek üzere daha küçük bir sistemden oluşturulur. Test ortamı verilerinin,

gerçek sistem verilerinde beklenenler olacağı garanti edilmez. Bu boşluğu doldurmak için birçok derin öğrenmeye dayalı yaklaşım önerilmiştir. Makine öğrenimi teknolojisindeki son gelişmeler, uygulamasını hızla titreşim tabanlı yapısal sağlık izlemeye kadar genişletti. Bu inceleme, gerçek uygulamalara yönelik son girişimleri özetlemektedir. Bu bilgi, inceleme ve bakım gerektiren belirli sistemlere yönelik ilgili yöntemlerin teklif edilmesinde faydalı olacaktır. Titreşim özelliklerine göre sağlık takibi için derin öğrenmeyi kullanan çalışmalar tanıtılıyor.

2. Titreşim Verilerini Kullanarak Erken Yapı Sağlığı İzleme

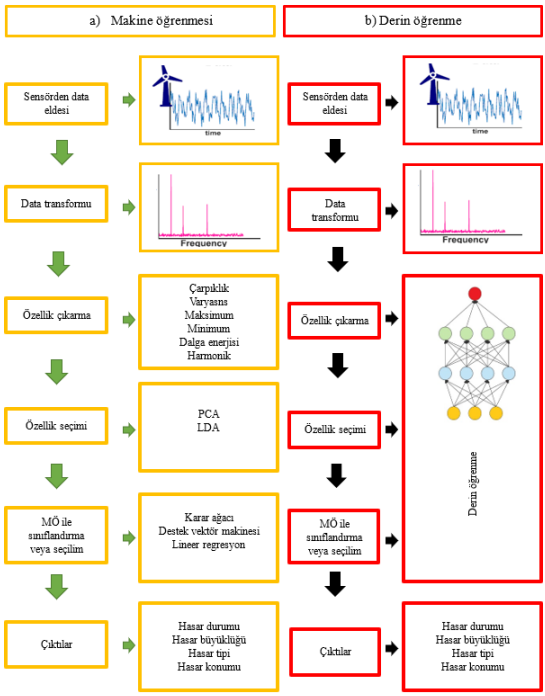
Yapılarda yıkıcı hasarların önlenmesi için etkin denetim yöntemleri ve erken tespit çok önemlidir. Hasar çok büyümeden hasarın tespiti kullanım ömrünü, güvenilirliğini artıracak ve bakım maliyetini azaltacaktır. Tam hasar tespit süreci dört aşamada yapılabilir: hasarın varlığı, hasarın konumu, hasarın büyüklüğü ve kullanım ömrünün tahmin edilmesidir. Hasarların önlenmesi ve erken teşhisi için araştırmacılar birçok yöntem geliştirmişlerdir. Tahribatsız muayene teknikleri malzemelerin ve yapıların iç yapısını ve yüzey özelliklerini bozmadan incelenmesini sağlayan bir yöntemdir (Zhang vd., 2013; Ng vd., 2011) Fakat uygulama alanındaki zorluklardan dolayı kullanılamayabilir. Ayrıca kompozitlerdeki delaminasyonun,



Şekil 2. Deneysel modal analiz test kurulumunun şematik diyagramı (Fan ve Qiao, 2011)

maliyetli ve zaman alıcı tahribatsız muayene teknikleriyle bile tanımlanması zordur (Sha vd., 2020) Yapı sağlığı izleme (Structural health monitoring), malzemelerdeki yükleme durumunu izlemek ve hasarları teşhis etmek için kullanılan en son teknolojidir. Yapı sağlığı izleme yönteminde titreşime dayalı yöntemler (Doherty, 1987), fiber Bragg ızgara yöntemi (FBI) (He vd., 2022) akustik emisyon yöntemi (AEY) (Nikbakht vd., 2022), empedansa dayalı yöntem (Demi vd., 2018), Lamb dalgası yöntemi (Kessler vd., 2022) vb. gibi gelişmiş farklı türlerde yöntemler kullanılmaktadır. Üretim sırasında optik fiberlerin yerleştirilmesindeki zorluk nedeniyle FBI tekniğinin kullanımı araştırmacıları sınırlandırmaktadır. Ayrıca, malzemedeki yüklemeden kaynaklı değişiklikleri yakalamak için çok ince FBI ızgaraları gereklidir. AEY'de hasar, akustik sinyaller oluşturup yaymadığı sürece bu yapıdaki hasarı tespit etmek çok zordur. Ayrıca, AEY'de sinyali çevredeki gürültüden ayırt etmek için uzman personele ihtiyaç vardır. Öte yandan empedans tabanlı ve Lamb dalga yöntemleri, hasarın yerini ve boyutunu kesin olarak tespit etmek için çok sayıda dönüş-

türücüye ihtiyaç vardır. Buda ayrıca yüksek maliyet gerektirir. Yapı sağlığı izleme tekniklerinde karşılaşılan bu olumsuzlar nedeniyle araştırmacılar hasar tespitinde titreşime dayalı yönteme yoğunlaşmışlardır. Bu yaklaşımlarla karşılaştırıldığında, titreşime dayalı yöntem yapısal hataları ve hasarı teşhis etmek için önerilmektedir (Doherty, 1987). Çünkü kompozit yapılarda mevcut olan hasar, dinamik davranışta ve modal parametrelerde değişikliklere neden olur ve bu sayede hasarlar belirlenebilir. Vibrasyon analizinin şematik diyagramı Şekil 2'de gösterilmiştir. Makine öğrenmesi ve derin öğrenme arasında işleyiş farkları Şekil 3'de gösterilmiştir. Waldron vd., (2002) yük ile uyarılan bir yapının titreşim yer değiştirmesini ve hızını görselleştiren operasyonel sapma şekillerini kullanmışlardır. Sağlıklı ve hasarlı kasalarda iki alüminyum kirişi



Şekil 3. Yapısal Sağlığı İzleme iş akışı: geleneksel MÖ yaklaşımında, özellik çıkarma ve seçme elle yapılır ve ardından bir MÖ modeli gelir (a); Derin öğrenme modelleri, özellik çıkarma ve seçme işlemlerini otomatikleştirerek uçtan uca tahminler gerçekleştirir (b).

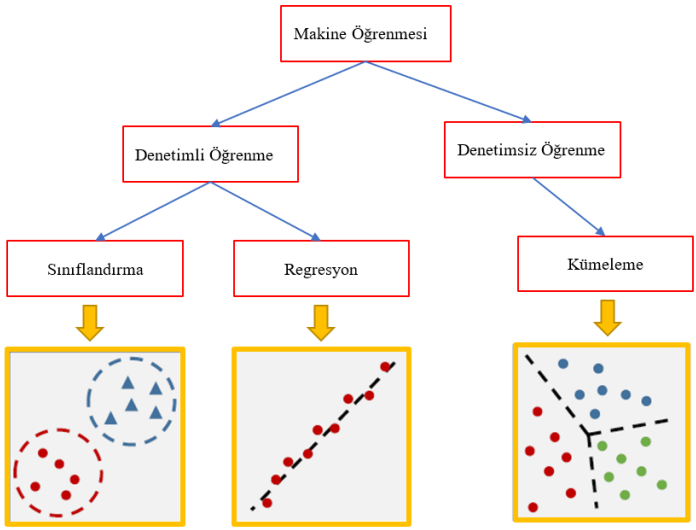
test etmişlerdir. Titreşimi ölçmek için taramalı lazer Doppler titreşim ölçer cihazı kullanmışlardır. Sonlu elemanlar simülasyonları, hasar lokalizasyonunun daha yüksek frekans aralığında daha doğru olduğunu göstermiştir.

Birçok durumda yapı sağlığının izlenmesinde yapay sinir ağları kullanılmıştır. Paya ve ark. (1997), bir model aktarma organından gelen altı farklı tipte titreşim sinyalinin

ön işlemesine dalgacık dönüşümünü başarıyla uygulamışlardır. Yapay sinir ağları, insan beyninin düşünce sürecinden ilham almaktadır. Nöronlar beyinde birbirine bağlıdır ve düğümler YSA'da aynı görevi görür. YSA'lar farklı hata türlerini belirlemek ve tekli ve çoklu hatalar arasında ayrım yapmak için kullanılmıştır. Lemistre ve Balageas (2001), hasarı lokalize etmek için *Lamb dalgalarını* kullanmışlardır. Dönüştürücü ve alıcı olarak görev yapmak karbon/epoksi reçine plakanın hasar görmesinden kaynaklanan zaman gecikmesini belirlemek için ayrık dalgacık dönüşümü uygulamışlardır. Zhan ve ark. (2018), bir sarım makinesindeki ani kısa devrenin transformatör tankına uyguladığı darbeli titreşimi teşhis etmişlerdir. Transformatöre uygulanan darbe sinyali büyük bir doğrusal olmama özelliğine sahip olduğundan, zaman-frekans alanındaki analize *Hilbert-Huang* dönüşümünü uygulamışlardır. Hasar, 800–1000 Hz bandındaki tepkinin büyük olması nedeniyle sarım makinesinde meydana gelmiştir. Darbe tepkisi, bir sistemin doğal frekans tepkisini belirlemek için analiz edilmiştir; bu, frekans alanındaki normal ve anormal koşulların karşılaştırılmasında avantajlıdır. Bir makinenin ürettiği titreşimden kaynaklanan gürültü aynı zamanda sağlığın izlenmesi için de kullanılmaktadır. Derin öğrenmeye yönelik eğitim süreci büyük miktarda veri gerektirdiğinden, yeterince büyük bir veri kümesinin güvenliğinin sağlanmasının zor olduğu alanlarda bunu uygulamak için çeşitli girişimlerde bulunulmuştur (J.P. McCrory vd., 2015; Kessler vd. 2007; Oliveira vd., 2008; Li vd., 2014). Simülasyonlar, gerçek verileri ayırt etmek amacıyla büyük miktarda eğitim verisi toplamak için kullanılmıştır.

3. Makine Öğrenmesinin Titreşim Verileriyle Sistem Tanımlamasına Uygulanması

Makine öğrenimi, açık programlama olmadan kalıpları öğrenmek ve tahminler veya kararlar almak için yapay zekâ modellerinin büyük veri kümeleri üzerinde eğitilmesini içerir. Makine öğreniminin bir alt kümesi olan derin öğrenme, karmaşık verileri etkili bir şekilde işlemek için çok katmanlı yapay sinir ağlarından yararlanır. Makine öğrenmesi, algoritmaların geçmiş verilerden öğrenmesini sağlayan yapay zekanın bir alt alanıdır. MÖ algoritmaları, bu yetenekten yararlanarak verilerden elde edilen bilgiyi kapsayan modeller geliştirebilir. Bu modeller daha sonra açık programlama talimatları olmadan kararlar almak için kullanılır. Verilerden öğrenme ve yeni örneklere genelleme yeteneği, makine öğreniminin temel bir özelliğidir ve çeşitli alanlardaki geniş uygulama yelpazesine katkıda bulunur. Verilerden öğrenme ve açık talimatlar olmadan bilinçli kararlar verme yeteneği, makine öğreniminin temel bir özelliğidir.



Şekil 4. Makine öğrenimi algoritmalarının bölümleri.

Şekil 4'de gösterildiği gibi, makine öğrenme algoritmaları genel olarak dört kategoriye ayrılabilir:

a. Denetimli Öğrenme,

b. Denetimsiz Öğrenme,

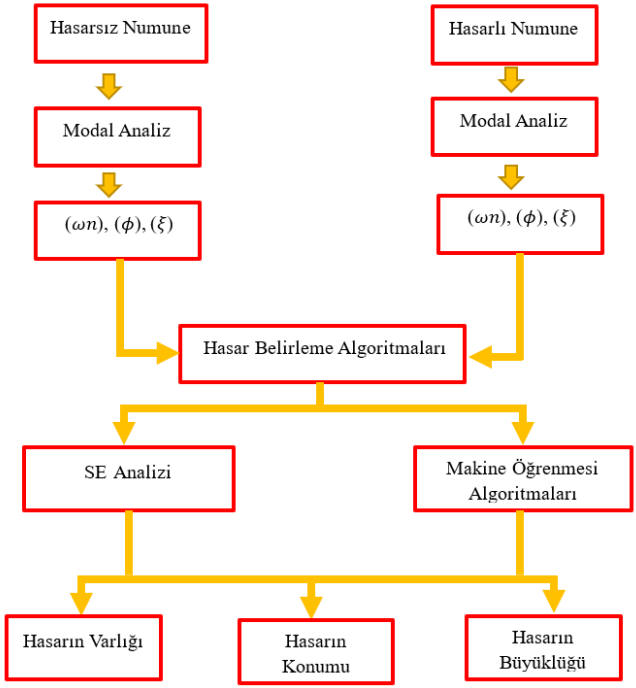
c. Yarı Denetimli Öğrenme,

d. Takviyeli Öğrenme.

Denetimli öğrenmede algoritma, yeni veriler için tahminler yapmak üzere eğitim veri kümelerinden öğrenir. Denetimli öğrenme hem regresyon hem de sınıflandırma görevleri için de kullanılabilir. Kompozit yapılarda hasar tahmini alanında en yaygın kullanılan öğrenme yaklaşımıdır [17]. Denetimsiz öğrenmede algoritma, etiketli veriler kullanılarak açıkça eğitilmeden verilerdeki kalıpları tanımayı

öğrenir. Yarı denetimli öğrenme, eğitim sürecine hem etiketli hem de etiketsiz verileri (ağırlıklı olarak etiketsiz verilere odaklanarak) dahil ederek, denetimli ve denetimsiz öğrenme arasında bir ara yaklaşımı temsil eder. Takviyeli öğrenme, dinamik ortamlarla etkileşime girme, tahminlerde bulunmak için deneme yanılma yoluyla öğrenme yeteneğine sahip farklı bir makine öğrenme algoritması türüdür [27]. Bununla birlikte, takviyeli öğrenme, malzeme özelliklerinin tahmininde henüz yaygın olarak kullanılmamaktadır.

Titreşim tepkisine maruz kalan numenlerin titreşim verileri kullanılarak makine öğrenmesi algoritmaları yardımıyla hasarlar tahmin edilecektir. Vibrasyon analizine dayalı çalışma metodolojisi Şekil 5'de gösterilmektedir. Bunun için ilk olarak hasarlı ve hasarsız numuneler titreşim testine tabi tutularak titreşim tepkileri ham veri olarak veri seti halinde elde edilecektir.



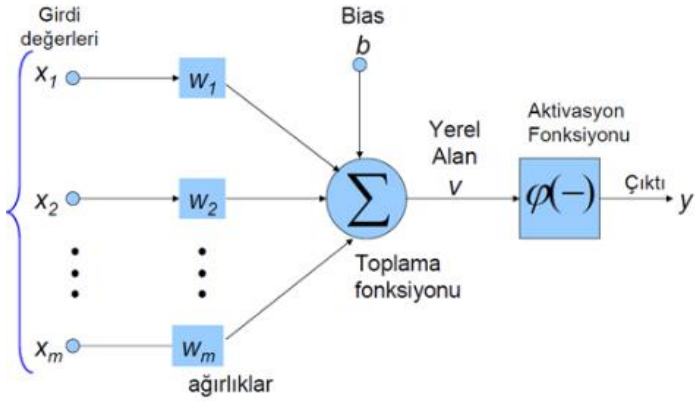
Şekil 5. Vibrasyon analizine dayalı hasar tespit metodolojisinin şematik diyagramı.

Buradaki çok fazla veri *Fourier Dönüşümü* (FD) kullanılarak işlenir ve faydalı veri haline getirilir. Eğitim verileri doğru şekilde etiketlenmesinin sebebi, girdiler ve çıktılar arasında en uygun eşleştirme fonksiyonunu belirlemektir. Burada, optimal haritalama fonksiyonu, yapının hasar durumunu gösterebilecek ayırt edici özellikleri tanımlayabilmelidir. İkinci adımda, bir önceki adımda eğitilen MÖ modelinin bilinmeyen özelliklerle karşılaştığında performansı değerlendirilerek yapıda hasar olup olmadığı tespit edilir. Daha sonra SE ile desteklenen veriler ile MÖ kullanılarak

hasarın varlığı, konumu ve büyüklüğü hakkında bilgi sahibi olunabilecektir.

4. Derin Öğrenmeye Kısa Giriş ve Titreşim Analizinde Gelecekteki Uygulamaları

1957'de Frank Rosenblatt, şu anda sinir ağı (Şekil 6) olarak bildiğimiz şeyin ilk prototipi olan algılayıcıyı yarattı (Rosenblatt, 1957). Basit desenleri tanıyabilen iki katmanlı işlem birimlerine sahipti. Sinir ağları, daha fazla araştırma ve geliştirme yapmak bir yana, 1969'da MIT'deki profesörlerin basit bir XOR fonksiyonunu bile öğrenemediğini gösterdiğinde tarihinin karanlık bir aşamasına girdi.



Şekil 6. Yapay sinir ağı hücresi.

Ayrıca özellikle Derin sinir ağı motivasyonunu zayıflatan bir bulgu daha vardı. Evrensel yaklaşım teoremi, tek bir gizli katmanın herhangi bir sürekli problemi çözebildiğini göstermişti (Cybenko, 1969). Derin sinir ağının (DSA) zayıflığı matematiksel olarak da ispatlandığında geçerliliğini

daha da yitirdi. Çünkü öğrenmek için tek bir gizli katman kullanılabilirken, bu verimli değildi ve şu anda bildiğimiz birden fazla gizli DSA katmanının hiyerarşik soyutlamasının sağladığı kolaylık ve yetenekten çok uzaktı. Ancak Derin sinir ağının ilerlemesini engelleyen yalnızca evrensel yaklaşım teoremi değildi. O zamanlar DSA'yı eğitmenin de bir yolu yoktu. Bu faktörler yapay zekanın fazla ilgi görmemesine ve sonuç olarak da fazla ilerlemesine neden oldu. Geri yayılım öğrenme algoritmasının ortaya çıkışıyla DSA'da bir atılım meydana geldi. 1970'lerde bu teori önerildi ancak 1980'lerin ortalarına kadar tam olarak anlaşılamadı ve sinir ağlarına uygulanamadı (Le vd., 2015). Kendi kendini yönlendiren öğrenme, geri yayılım algoritmasının daha derin anlaşılması ve uygulanmasıyla mümkün oldu. Özellik çıkarıcıların otomasyonu, DSA'lardaki önceki nesil makine öğrenimi tekniklerinden ayıran şeydir. DSA, özellik çıkarıcıların herhangi bir manuel tasarımı olmadan veri kümelerinden gösterimleri öğrenmek için algoritmalarla eğitilmiş, çok katmanlı bir algılayıcı olarak modellenen bir tür sinir ağıdır. Derin Öğrenme adından da anlaşılacağı gibi, daha az birim katmanına sahip sığ öğrenme modelinin aksine, daha yüksek veya daha derin sayıda işlem katmanından oluşur. Sığ öğrenmeden derin öğrenmeye geçiş, daha karmaşık ve doğrusal olmayan işlevlerin sığ mimarilerle verimli bir şekilde haritalanamaması nedeniyle haritalanmasına olanak sağlamıştır. Makine öğrenmesinin (MÖ) ve özellikle Derin Öğrenmenin son 10 yılda benimsenmesi ve ilerlemesi veri patlamasına bağlanabilir. MÖ, eğitim, fi-

nans, yönetişim, sağlık hizmetleri, üretim, pazarlama ve diğerlerinden hayatımızın tüm alanlarını etkilemeye ve başrol oynamaya devam edecektir.

Derin öğrenme, bilgisayar bilimleri alanında son zamanların belki de en önemli gelişmesidir. Etkisi neredeyse tüm bilimsel alanlarda hissedilmiştir. Derin öğrenmeyi ilerletmek için dünyanın önde gelen ekonomileri ve teknoloji şirketleri arasında bir yarış vardır. Derin öğrenmenin uygulama alanlarına bakıldığında; film reytinglerini tahmin etmek, kredi başvurularını onaylama kararı, araba teslimatında geçen süre, alışveriş mağazalarında tüketici pisikolojisi vb. insan seviyesindeki yetenek ve performansı aştığı birçok alan bulunmaktadır. 27 Mart 2019'da derin öğrenmenin üç öncüsü (*Yoshua Bengio, Geoffrey Hinton ve Yann LeCun*), bilişimin "Nobel Ödülü" olarak da anılan *Turing Ödülü*'ne layık görüldü (Metz, 2015). Pek çok şey başarılmış olsa da derin öğrenmede gidilecek daha çok yol var. Derin öğrenme, kanser, yeni ilaçların keşfi, doğal afetlerin tahmini gibi hastalıkların daha doğru teşhisi ile insan yaşamını iyileştirme potansiyeline sahiptir. Örneğin, derin öğrenme ağının 2.032 hastalığın 129.450 görüntüsünden öğrenebildiğini ve 21 kurul sertifikalı dermatologla aynı seviyede teşhis koyabildiğini bildirdi (Esteva, 2017). Google AI, prostat kanserini derecelendirmede ABD kurul onaylı

genel patologların ortalama doğruluğunu %70 ila %61 oranında geçmeyi başardı (Nagpal, 2018).

Sinir Ağları aşağıdaki farklı türlere göre sınıflandırılabilir.

- Denetimsiz önceden eğitilmiş ağlar (UPN'ler);
- Evrişimsel sinir ağları (CNN'ler);
- Tekrarlayan sinir ağları;
- Özyinelemeli sinir ağları (RNN'ler).

İleri beslemeli sinir ağında, bilgi giriş katmanından çıkış katmanına (üzerinden) yalnızca bir yönde akar. Herhangi bir daire veya geridöngü oluşturmazlar. İleri beslemeli sinir ağlarının aksine, RNN'deki işlem birimleri bir döngü oluşturur. Bir katmanın çıktısı, tipik olarak ağdaki tek katman olan bir sonraki katmanın girdisi haline gelir, böylece katmanın çıktısı, bir geri besleme döngüsü oluşturarak kendi başına bir girdi haline gelir. Bu, ağın önceki durumlar hakkında belleğe sahip olmasına ve bunu mevcut çıktıyı etkilemek için kullanmasına olanak tanır. Bu farkın önemli bir sonucu, ileri beslemeli sinir ağından farklı olarak, RNN'nin bir dizi giriş alabilmesi ve aynı zamanda bir dizi çıkış değeri üretebilmesidir; bu da onu konuşma tanıma, çerçeve gibi zaman aşamalı giriş verilerinin sırasını işlemeyi gerektiren uygulamalar için çok kullanışlı hale getirir. Örneğin, 3 kelimelik bir cümle dizisi bir girdi oluşturuyorsa, o zaman her kelime bir katmana karşılık gelir ve böylece ağ, 3 katmanlı bir RNN'ye 3 kez açılır veya açılır.

Tablo 1. Derin öğrenme tekniklerinin karşılaştırılması.

Tek-nik	Avantaj	Dezavantaj
Otomatik kodlayıcı	Uygulaması kolay Kayıp/maliyet takibi kolay	Eğitim için büyük miktarda veriye ihtiyaç duyulması Öğrenme için gereksiz bilgiye ihtiyaç duyulması
DBN	Tek boyutlu verileri analiz etmesi iyi Ham verilerden global özelliğin çıkarılması mümkün	Verimsiz ve çok yavaş
CNN	Çok boyutlu verileri analiz etmesi iyi Yerel özelliği çıkarmak için uzmanlaşmıştır	Çok fazla hesaplama süresi gerektiren karmaşık ağ yapısına sahip
RNN	Sıralı verilerde daha iyi performans Özelliği zaman değişimlerinden hesaplamak iyi	Uygulaması ve eğitilmesi zor

Denetimsiz önceden eğitilmiş ağlar yönelik tipik mimariler arasında otomatik kodlayıcı, DBN ve GAN bulunur. Radyal tabanlı fonksiyon sinir ağı, sınıflandırma, fonksiyon yaklaşımı, zaman serisi tahmin problemlerinde kullanılır. Giriş, gizli ve çıkış katmanlarından oluşur. Gizli katman bir radyal temel fonksiyonu (gauss fonksiyonu olarak uygulanan) içerir ve her düğüm bir küme merkezini temsil eder. Ağ, girişi bir merkeze atamayı öğrenir ve çıkış katmanı, sınıflandırma veya çıkarım yapmak için radyal temel fonksiyonun çıkışlarını ve ağırlık parametrelerini birleştirir. Kohonen kendi kendini organize eden sinir ağı, denetimsiz öğrenmeyi kullanarak ağ modelini giriş verilerine göre kendisi

düzenler. Tamamen bağlı iki katmandan, yani giriş katmanı ve çıkış katmanından oluşur. Çıktı katmanı iki boyutlu bir ızgara olarak düzenlenmiştir. Aktivasyon fonksiyonu yoktur ve ağırlıklar, çıktı katmanı düğümünün niteliklerini (konumunu) temsil eder. Ağırlıklara göre girdi verileri ile her çıktı katmanı düğümü arasındaki Öklid mesafesi hesaplanır. Modüler sinir ağı, büyük ağı daha küçük bağımsız sinir ağı modüllerine böler. Daha küçük ağlar, daha sonra tüm ağın tek bir çıktısının parçası olarak birleştirilen belirli görevleri yerine getirir. **Tablo 1**'de derin öğrenme tekniğinin avantajlarını ve dezavantajlarını açıklamaktadır. Titreşim sinyallerini kullanan derin öğrenme durumunda, ön işlemenin yanı sıra uygun mimarinin belirlenmesi de sonuçlar üzerinde büyük etkiye sahiptir.

Hasar tespiti, sinyalin sağlıklı mı yoksa sağlıksız mı olduğunu tespit etmek için en temel teşhis seviyesidir. Hasarın genellikle sistemin dinamik tepkisini değiştirdiği ve normal koşullardan sapmaların izlenmesiyle hasarın varlığının tespit edilmesine olanak sağladığı varsayılır. Bu yaklaşım, denetimsiz öğrenme kullanılarak gerçekleştirilebilir ve hasar tespitinin gerçek hayattaki problemlere geniş ölçüde uygulanabilir olmasını sağlar. 1. seviyedeki verilerin kullanılabilirliği ve bunun sonraki Rytter seviyeleri için temel oluşturma önemi göz önüne alındığında, hasar tespiti konusunda zengin bir literatür bulunmaktadır. Anormallik tespit algoritmaları, etiketlenmemiş verileri kullanarak aykırı değerleri veya anormal koşulları tespit eder ve bu nedenle hasar tespitinde rahatlıkla kullanılır. Markou ve Singh (2003), anormallik tespit algoritmalarını istatistiksel bir yaklaşımla ve derin öğrenme tabanlı bir yaklaşımla incelediler. Vos ve

ark. (2022) tek sınıflı bir MÖ algoritması kullanarak yalnızca sağlıklı verilere dayanarak anormallik tespiti gerçekleştirmiş ve ardışık zaman serileri için LSTM tarafından çıkarılan özellikleri ve ardışık olmayan zaman serileri için istatistiksel özellikleri kullanarak tahmin doğruluğunun arttığını bildirmiştir. Santos ve diğ., (2016) çerçeveli bir yapıdaki doğrusal ve doğrusal olmayan hasarı tespit etmek için dört çekirdek tabanlı denetimsiz algoritma önerdiler. Çekirdek tabanlı modeller, otoregresif modellerden çıkarılan özelliklerle beslendi ve karşılaştırmalı algoritmalardan daha iyi performans gösterdi. DL tabanlı anormallik tespiti de literatürde başarıyla uygulanmıştır. Derin otomatik kodlayıcıların yeniden yapılandırma hatasına dayanarak rüzgâr türbini anormallikleri tespit edildi (Bel-Hadj ve Weijtjens, 2023). Benzer şekilde, veri seti olarak çok sensörlü ham zaman serisini kullanan derin otomatik kodlayıcılar tarafından uçak hatası tespit edildi (Reddy ve diğ., 2016).

5. Makine Titreşimlerini Kullanarak Sağlığın İzlenmesi

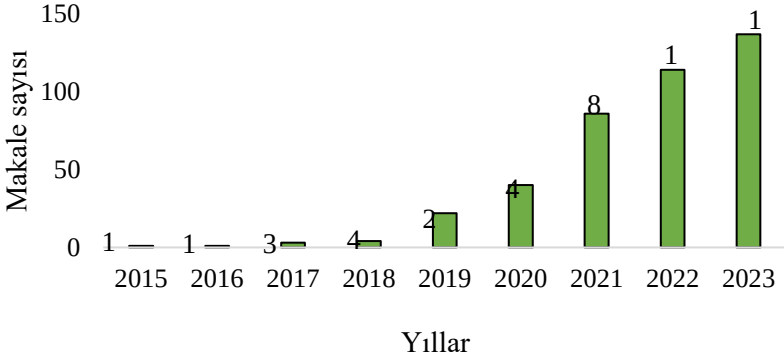
Güç kaynakları, bakım gereksinimlerinin tahmin edilmesi gereken önemli cihazlardır. Titreşim, güç dönüşümü sırasında üretilen manyetik alanlar nedeniyle oluşur. Harmonik titreşim, harici bir uyarma cihazı olmadan meydana gelir. Titreşim özellikleri güç dönüşümünün verimliliğine bağlıdır. Elemanların dönüşü ayrıca uyarma cihazları olmadan harmonik titreşimler üretir. Dönen bileşenlerin titreşim özellikleri üzerinde güçlü bir etkisi olduğundan, sonuçta ortaya çıkan sinyal işlemenin ilgili değişiklikleri dikkate alması gerekir. Ortam uyarımı büyük yapıları izlemek için

kullanılmıştır. Yapısal titreşim, çevredeki ortamdaki değişiklikler (örneğin, çalışan araçlar, rüzgar ve yakındaki yapılarla etkileşim) tarafından tetiklenir. Titreşim tepkisinin hesaplanması, geçici titreşim enerji transferlerinin dikkate alınmasını gerektirir. Ayrıca çevredeki ortamın titreşim özellikleri anlaşılmalı ve izlenen yapıyla ilişkilendirilmelidir. Sistem, bir darbe veya rastgele sinyalle güçlendirilen dış kuvvetler tarafından uyarıldığında, frekans bandı boyunca uyarılma meydana gelir. Uyarım, davranışı belirli bir modda gözlemlemek için önceden belirlenmiş bir frekansta gerçekleştirilebilir. Bu doğrudan uyarım, istenen mekanik deformasyonlar için sonuçların ve varsayımların yorumlanması açısından avantaj sağlar. Zhao ve diğ., (2019) derin öğrenmeyi kullanarak makinelerin sağlığının izlenmesini derin öğrenme yöntemi ile gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarının amacı, yapıların izlenmesine yönelik bir titreşim yaklaşımı sağlamak ve titreşim tepkisinin nedenine ve yorumlanmasına göre uygun yöntemi belirlemektir.

6. Türkiye'de ve Dünya'da Kompozit Yapılardaki hasarların belirlenmesinde Derin Öğrenme Algoritmaları Kullanım Trendi

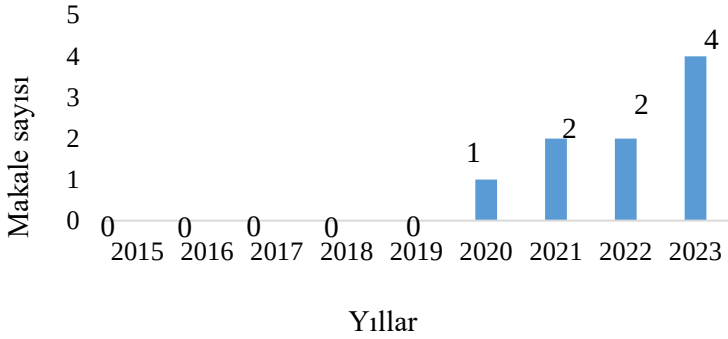
Yüz tanıma, hisse senedi ticareti, oyun oynama, yeni malzemeler tasarlama ve üretme gibi birçok gerçek dünya sorunu "akıllı" çözümler gerektirir. Geleneksel olarak bu tür çözümler çoğunlukla insan zekâsı tarafından sağlanır. Yapay zekâ ve makine öğrenimindeki son gelişmeler, çeşitli uygulamalarda insan yeteneklerine rakip olan ve bazen bunları aşan algoritmalar sunmuş ve böylece yapay zekâya

büyük bir ilgi yaratmıştır. Özellikle havacılık ve savunma sanayisinde çokça kullanılan ve hasar olabilitesinde büyük facialara sebep olacak kompozitlerdeki hasarların teşhisinde derin öğrenme ve vibrasyon yaklaşımı kullanılmaktadır. Vibrasyon verileri ve derin öğrenme ile hasar teşhisi yeni bir alan olup bu alandaki çalışmalar ve araştırmacı sayısı henüz çık sınırlıdır. Ama gün geçtikte araştırma sayılarının da artığı gözlenmiştir. Aşağıda Şekil 7'de Dünya'da kompozit yapılarda hasarın belirlenmesinde derin öğrenme algoritmaları kullanım trendi sunulmuştur. Bu bilgiler, çok sayıda farklı akademik disiplin için kapsamlı atıf verileri sunan birden çok veri tabanına abonelik tabanlı erişim sağlayan '*Web of science*' web sitesinde alınmıştır. Grafik incelendiğinde 2015 ve 2016 yıllarında kompozit yapılarda derin öğrenme kullanımının çok sınırlı kaldığı ve bu alanda yapılan çalışma sayısının iki yılda sadece iki olduğu görülmektedir. 2016-2018 yılları arasında oransal olarak artış fazla olsa da sayı olarak çok az olduğu ve sadce iki yılda toplam 7 çalışma yapıldığı görülmektedir. 2019-2020 yılları arasında sayı olarak en fazla artışın yaşandığı olduğu söylenebilir.



Şekil 7. Dünya'da kompozit yapılardaki hasarların belirlenmesinde derin öğrenme algoritmaları kullanım trendi (2015-2023).

Toplamda 62 çalışma bu alanda literatüre kazanılmıştır. 2021-2022 yılları arasında ise toplamda 200 çalışma yapılmıştır. 2023'ün aralık sonunda yapılan son literatür taramasına göre 2023 yılında yapılan çalışma sayısı 137'dir. Bu alanda çalışmaların son yıllarda çok artığı ve bu trend ile önümüzdeki yıllarda bu sayıların 300-500 bandı arasında olabileceği öngörülmektedir. Dünyada durum böyle iken Türkiye'de de bu alanda çalışma sayılarında artış bulunmaktadır. Aşağıda Şekil 8'de Türkiye'de kompozit yapılarda hasarın belirlenmesinde derin öğrenme algoritmaları kullanım trendi sunulmuştur. Grafik incelendiğinde 2015 ve 2019 yıllarında kompozit yapılarda derin öğrenme ile ilgili çalışmaların yapılmadığı görülmektedir. 2023 yılında en fazla çalışmanın yapıldığı yıl olarak toplamda 4 çalışma yapılmıştır. Önümüzdeki yıllarda bu alana yönelimin daha fazla olacağı ve bu alandaki çalışma sayısının 10'u geçeceği tahmin edilmektedir.



Şekil 8. Türkiye'de kompozit yapılardaki hasarların belirlenmesinde derin öğrenme algoritmaları kullanım trendi (2015-2023).

7. Sonuçlar ve Tartışma

Yapılarda yıkıcı hasarların önlenmesi için etkin denetim yöntemleri ve erken tespit çok önemlidir. Hasar çok büyümeden hasarın tespiti kullanım ömrünü, güvenilirliğini artıracak ve bakım maliyetini azaltacaktır. Sonuç olarak, bu çalışmada kompozit yapılardaki hasarların titreşim verileri ve derin öğrenme yöntemleri kullanılarak belirlenmesi hakkında genel bilgiler verilmiştir. Bununla beraber derin öğrenme teknikleri, uygulamadaki avantajlar dezavantajlar, algoritmalar arasındaki farklara ayrıntılı bir şekilde değinilmiştir. Çok sayıda derin öğrenme algoritmaları olmasına rağmen, uygulama alanında farklılık, yapısal formların çeşitliliği, hizmet ortamlarındaki kullanım türü nedeniyle hangi tip derin öğrenme algoritmanın kullanımı zordur. Bu nedenle en iyi yöntemin seçilebilmesi için problemin mate-

matik alt yapısını ve ihtiyaç duyulan parametreleri iyi bilmek son derece önemlidir. Bu çalışmanın sonuç maddeleri şu şekilde sıralanabilir;

- Hasar teşhisi için yapısal titreşimlerin kullanılması, kurulum tepkilerinin içsel teşhisi açısından avantajlıdır. Pratik uygulamalar için doğrusal olmama, durağan olmama ve zaman değişimi ile ilgili sorunların çözülmesi gerekmektedir.
- Titreşim tepkileri zaman alanında elde edilir. Ham veriler kategorizasyon ve özellik çıkarımı için kullanılır. Sinyal işleme için (örneğin, Fourier dönüşümü, Hilbert dönüşümü ve dalgacık dönüşümü) yöntemleri kullanılır.
- Derin öğrenmeye dayalı algoritmalar genellikle büyük verileri kullanır. Dolayısıyla sağlamlık açısından avantajlıdırlar.
- Derin öğrenme, katmanın nasıl oluşturulduğuna bağlı olarak çeşitli şekillerde üretilebilen çok katmanlı bir sinir ağıdır. Derin öğrenme algoritmaları konuyu karakterize eden kendi özelliklerini oluşturdu. Yüksek doğruluklu sonuçların hızlı ve verimli bir şekilde üretilmesi beklenmektedir. Bu nedenle ses, video, fotoğraf ve sensör ölçümleri gibi yapılandırılmamış verileri analiz etmek için derin öğrenmenin kullanımı artıyor.
- Denetimsiz öğrenme için veri etiketlemeye gerek yoktur. Veri etiketleme, belirli uygulamalarda

çok fazla zaman ve çaba gerektirir. Derin öğrenmenin, karmaşık titreşim sorunlarını çözmek ve etkili yapı sağlığı izlemesine katkıda bulunmak için bir araç olması beklenmektedir.

- Makine öğrenmesi ve özelde derin öğrenme algoritmaları henüz gerçek potansiyelleri ortaya çıkarılmamıştır. Dolayısıyla bu yöntemlerin havacılık ve uzay endüstrisinden sağlık ve tarım sektörüne kadar birçok sektörde yeniliklerle kullanılması ve her geçen gün ilginin artması gelecekteki çalışmalar açısından oldukça umut vericidir.
- MÖ algoritmaları ile çok fazla sayıda data hızlı bir şekilde işlenerek zamandan, iş yükünden ve maliyetten tasarruf sağlanabilecektir.
- Çok karmaşık ve karışık dataları bile kolaylıkla tasnif etme özelliğine sahip olan MÖ kullanımı akademide çok farklı disiplinlerde kullanımı artmaktadır.

KAYNAKLAR

A. Esteva et al., ‘‘Dermatologist-level classification of skin cancer with deep neural networks,’’ Nature, vol. 542, no. 7639, p. 115, 2017.

A. Santos, E. Figueiredo, M. Silva, C. Sales, J. Costa, Machine learning algorithms for damage detection: Kernel-based approaches, J. Sound Vib. 363 (2016) 584–599.

Bozkurt, I., Kaman, M. O., Albayrak, M. (2023). Low-velocity impact behaviours of sandwiches manufactured from fully carbon fiber composite for different cell types and compression behaviours for different core types. Materials Testing, 65(9), 1349-1372.

C. Metz, Turing Award Won by 3 Pioneers in Artificial Intelligence. New York, NY, USA: New York Times, 2019, p. B

Demi, A., Hongping, Z., Luo, H., Wang, C. 2018. ‘Mechanical impedance based embedded piezoelectric transducer for reinforced concrete structural impact damage detection: A comparative study’. Constr. Build Mater., 165, 472–483.

Doherty, J.E. 1987. ‘Nondestructive Evaluation’, Experimental Mechanics; Kobayashi, A.S., Ed.; Society for Experimental Mechanics Inc.: Englewood Cliffs, NJ, USA.

F. Rosenblatt, ‘‘The perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain,’’ Psychol. Rev., vol. 65, no. 6, pp. 386–408, 19

Fan, W., Qiao P. 2011. “Vibration-based damage identification methods: A review and comparative study’’. Struct Health Monit;10(1):83–111

Fan, W., Qiao P. 2011. “Vibration-based damage identification methods: A review and comparative study’’. Struct Health Monit;10(1):83–111

G. Cybenko, ‘‘Approximation by superpositions of a sigmoidal function,’’ Math. Control, Signals Syst., vol. 2, no. 4, pp. 303–314, 198

He, M., Ramakrishnan, K.R., Wang, Y., Zhang, Z., Fu, J. 2022. ‘A combined global-local approach for delamination assessment of composites using vibrational frequencies and FBGs’. Mech. Syst. Signal Proc., 167, 108577.

J.P. McCrory, S.K. Al-Jumaili, D. Crivelli et al., Damage classification in carbon fibre composites using acoustic emission: a comparison of three techniques. Compos. B Eng. 68, 424–430 (2015)

K. Nagpal et al., ‘‘Development and validation of a deep learning algorithm for improving Gleason scoring of prostate cancer,’’ CoRR, Nov. 2018

K. Vos, Z. Peng, C. Jenkins, M.R. Shahriar, P. Borghesani, W. Wang, Vibration-based anomaly detection using LSTM/SVM approaches, Mech. Syst. Signal Process. 169 (2022) 108752.

K.K. Reddy, S. Sarkar, V. Venugopalan, M. Giering, Anomaly detection and fault disambiguation in large flight data: A multi-modal deep auto-encoder approach, in: Annual Conference of the PHM Society, vol. 8, 2016, pp. 1–8.

Kar, C.; Mohanty, A.R. Vibration and current transient monitoring for gearbox fault detection using multiresolution Fourier transform. J. Sound Vib. 2008, 311, 109–132.

Kessler, S., Spearing, S., Soutis, C. 2002. ‘Damage detection in composite materials using Lamb wave methods’. Smart Mater. Struct.,11, 269–278.

Khatir, S.;Wahab, M.A. Fast simulations for solving fracture mechanics inverse problems using POD-RBF XIGA and Jaya algorithm. Eng. Fract. Mech. 2019, 205, 285–300.

Konar, P.; Panigrahy, P.S.; Chattopadhyay, P. Tri-Axial Vibration Analysis Using Data Mining for Multi Class Fault Diagnosis in Induction Motor. In Proceedings of the Conference on Mining Intelligence and Knowledge Exploration, Hyderabad, India, 9–11 December 2016; pp. 553–562.

L. Li, S.V. Lomov, X. Yan et al., Cluster analysis of acoustic emission signals for 2D and 3D woven glass/epoxy composites. Compos. Struct. 116, 286–299 (2014)

Lemistre, M.; Balageas, D. Structural health monitoring system based on di
racted Lamb wave analysis by multiresolution processing. Smart Mater. Struct. 2001, 10, 504.

M. Markou, S. Singh, Novelty detection: A review—part 2: Neural network based approaches, Signal Process. 83 (12) (2003) 2499–2521.

Ng, SC., Ismail, NH., Ali A. 2011. "Non-destructive Inspection of multi-layered composite using ultrasonic signal processing". Microelectron Syst Educ; 2011: 012045.

Nikbakht, M., Yousefi, J.,Toudeshky, H.H.; Minak, G. 2017. 'Delamination evaluation of composite laminates with different interface fiber orientations using acoustic emission features and micro visualization'. Compos. Part B Eng., 113, 185–196.

P.M. Pawar, S.N. Jung, Support vector machine based online composite helicopter rotor blade damage detection system. J. Intell. Mater. Syst. Struct. 19(10), 1217–1228 (2008)

Paya, B.; Esat, I.; Badi, M. Artificial neural network-based fault diagnostics of rotating machinery using wavelet transforms as a preprocessor. Mech. Syst. Signal Process **1997**, 11, 751–765.

R. De Oliveira, A. Marques, Health monitoring of FRP using acoustic emission and artificial neural networks. Comput. Struct. 86(3–5), 367–373 (2008)

Ramasamy, P., Sampathkumar, S.: Prediction of impact damage tolerance of drop impacted wgfrp composite by artificial neural network using acoustic emission parameters. Compos. Part B Eng. 60, 457–462 (2014).

S. Kessler, P. Rani, Pattern recognition for damage characterization in composite materials. in 48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ ASC structures, structural dynamics, and materials conference (2007), p. 2411

Sha, G., Radzienski, M., Soman, R., Cao, M., Ostachowicz, W., Xu, W. 2020. "Multiple damage detection in laminated composite beams by data fusion of Teager energy operator-wavelet transform mode shapes''. Compos. Struct., 235, 111798.

Singh, G.K.; Sa'ad Ahmed, S.A.K. Vibration signal analysis using wavelet transform for isolation and identification of electrical faults in induction machine. Electr. Power Syst. Res. 2004, 68, 119–136.

Waldron, K.; Ghoshal, A.; Schulz, M.; Sundaresan, M.; Ferguson, F.; Pai, P.; Chung, J. Damage detection using finite element and laser operational deflection shapes. Finite Elem. Anal. Des. 2002, 38, 193–226.

Worden, K.; Manson, G. The application of machine learning to structural health monitoring. Philos. Trans. R. Soc. A 2007, 365, 515–537

Y. Bel-Hadj, W. Weijtjens, Anomaly detection in vibration signals for structural health monitoring of an offshore wind turbine, in: European Workshop on Structural Health Monitoring, Springer, 2023, pp. 348–358.

Y. Le Cun, Y. Bengio, and G. Hinton, ''Deep learning,'' Nature, vol. 521, no. 7553, pp. 436–444, May 2015

Zhan, C.; Ji, S.; Liu, Y.; Zhu, L.; Shi, Y.; Ren, F. Winding Mechanical Fault Diagnosis Technique of Power Transformer Based on Time-Frequency Vibration Analysis. In Proceedings of the 2018 Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Perth, Australia, 23–26 September 2018; pp. 1–6.

Zhang, Z., Shankar, K., Ray, T. 2013. “Vibration-based inverse algorithms for detection of delamination in composites”. Compos Struct; 102: 226–236.

Zhao, R.; Yan, R.; Chen, Z.; Mao, K.;Wang, P.; Gao, R.X. Deep learning and its applications to machine health monitoring. Mech. Syst. Signal Process. 2019, 115, 213–237.

2. BÖLÜM

İÇ HAVA KALİTESİNİN İNSAN BEYNİNE ETKİSİ

Ahmet ÇOŞGUN[1]
Burcu Banu ATEŞ[2]

[1]Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Termodinamik Anabilimdalı Kampüs, Antalya, Türkiye
Orcid:0000-0002-0243-5476
[2] Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Termodinamik Anabilimdalı Yüksek lisans Öğrencisi, Antalya,

ÖZET

Günümüzde, çoğumuz iç mekanlarda daha fazla zaman geçiriyoruz ve iç hava kalitesi ile sağlık arasındaki ilişki giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Temiz hava ile sağlıklı zihin arasındaki derin bağlantıları inceleyerek, iç mekanlarda hava kalitesinin beyin sağlığı üzerindeki etkilerinin açıklanması amaçlanmaktadır.

İç mekan hava kirliliğinin çeşitli sağlık sorunlarına neden olabileceği öncelikli vurgulanmaktadır. Partikül madde, kimyasal maddeler ve diğer hava kirlilik faktörleri, solunan hava aracılığıyla vücuda girebilir ve uzun vadede beyin fonksiyonları üzerinde olumsuz etkilere yol açabilmektedir. İç hava kalitesinin azalmasının bilişsel fonksiyonlarda düşüş, hafıza kaybı ve duygu durum bozuklukları gibi sorunlara katkıda bulunabileceği bilinmektedir.

Sonuç olarak, bu bölüm çalışmasında, iç hava kalitesi beyin sağlığı arasındaki derin bağlantılar vurgulanarak, toplumun bu konudaki farkındalığını artırmak ve sağlıklı iç mekanlar oluşturmak teşvik edilmiştir. Temiz hava, sağlıklı zihin için temel bir unsurdur ve bu bağlamda alınacak önlemler, bireylerin ve toplumların genel sağlığını olumlu yönde etkileyebilmektedir.

GİRİŞ

Günümüzde iç hava kalitesi Tüm dünyayı etkileyen Covid 19 ismiyle de anılan pandemi ile Dünya Sağlık Örgütü tarafından da bu hastalığa neden olan virüs havada yayılımında, havada tutulmasında (toz partikülleri üzerinde) , sı-

cakılık, havanın hareketi, havanın nem düzeyi vb gibi, konular iç hava kalitesinin önemi bir kez daha ortaya çıkmıştır. Özellikle yetersiz hava kalitesine neden olan çeşitli etmenler bulunmaktadır. Binaların yapımında veya yenilenmesinde kullanılan yapıştırıcılar ya da solventler gibi kirletici maddeler bu etmenlerden biridir. Binada servis sistemlerinin yetersiz, yanlış tasarlanması sızıntı oluşturan noktalarda nem birikmesine iklimlendirme veya ısıtma sistemlerinin kanallarında mikropların(Virüsler, bakteriler, mantarlar) yerleşmesine yol açmaktadır. Bu konuda, Amerika Birleşik Devletleri'nde yapılan muhtelif araştırmalar mevcuttur. Enerji tasarrufu ve korunumuna yönelik çalışmalar da iç hava kalitesinin azalmasına neden olmuşlardır. Örneğin binanın sızdırmazlık düzeyi artırılmış, havalandırma oranı azaltılmış, iç ortam konforunu etkileyen yeni kirletici maddeler ortaya çıkmış ve fark edilmemiştir. Tüm bu faktörler, çoğu kişinin gününün büyük bir kısmını geçirdiği iç mekanlarda, havada bulunan zararlı maddelerin artışına neden olduğu gibi ortamda bulunan virüs, bakteri ,mantar vb maddelerin iç ortam içerinde yayılımı ile artışına, hava kalitesinin bozulmasına neden olmaktadır**[1].**

Araştırmalar, temiz iç hava sirkülasyonunun, zihinsel sağlık üzerinde olumlu bir etki yaratabileceğini ortaya koymaktadır. Doğal havalandırma, hava temizleyici sistemleri ve bitki tabanlı iç mekan peyzajı gibi yöntemler, iç mekanlarda hava kalitesini iyileştirerek beyin sağlığını destekleyebilmektedir. Ayrıca çalışma ortamlarında ve evlerde bu yöntemlerin uygulanabilirliği üzerine pratik öneriler de karşımıza çıkmaktadır.

1.Temiz Hava, Sağlıklı Zihin: İç Hava Kalitesi ile Beyin Sağlığı Arasındaki Derin Bağlantılar

Günümüzde, sağlığımızı etkileyen pek çok faktörün farkındayız, ancak iç hava kalitesi gibi göz ardı edilen bir unsurun, özellikle beyin sağlığı üzerindeki etkileri giderek daha fazla önem kazanmaktadır. İç mekan hava kalitesi, bulunduğumuz ortamın içindeki hava koşullarını ve havanın içerdiği kirleticileri ifade etmektedir.

Şekil 1'de hava kirliliğinin dünya üzerindeki etkisi temsil eden bir resim aşağıda gösterilmiştir.



Resim 1: *Hava kirliliğinin dünyaya etkisinin temsili gösterimi****[1].***

Tüm binalarda mühendisliği ilgilendiren bölüm, bina içi çevre kalitesidir. Bina içi çevre kalitesini etkileyen en önemli faktörde iç hava kalitesidir. İç ortam hava kalitesi havasız, koku içeren ortamlar sağlıksız olmakla birlikte, kullanıcı konforunun azalmasına, çalışma performanslarının düşmesine neden olmaktadır.

Araştırmalar düşük hava kalitesi ile bazı kullanıcıların karşılaştıkları, akut veya kronik sağlık sorunları arasında bağlantı olduğunu göstermektedir. Karşılaşılan sorunların yarıdan fazlası, yetersiz ya da uygun olmayan havalandırmadan ve ısıtma – soğutma – iklimlendirme sistemlerinin eksikliklerinden kaynaklanmaktadır.

1.2.İç Hava Kalitesini Etkileyen Faktörler:

a) Havanın İzafi Nem Oranı:

Nem, HVAC sistemlerinde hava kalitesini etkileyen en önemli problemlerden biridir. Hava içinde yeteri kadar nem yok ise (%20 civarında veya daha düşük) insanlarda bazı şikayetlere sebebiyet verebilmektedir. Nemlendirme ve nem alma sistemleri patojenik organizmaların (bakteri ve mantar) üremesini önleyecek şekilde temiz tutulmalıdır**[2].**

a.1.Elektronik ekipmanlar:

Elektronik data processing ünitelerinde izafi nem kontrolünün yapılması istenmektedir**[1].**

a.2.Statik Elektrik: Ortamdaki izafi nemin artması, elektrostatik akümülasyonu azaltır. Fakat yün ve bazı sentetik malzemeler daha yüksek izafi nem ihtiyacı duymaktadır**[1,3].**

b) İç Hava Kirleticileri:

İç binayı kirleten bazı etkenler vardır**[4].**

- Sigara Kokusu, -Mantar, -Buharlaşabilir Organik Bileşikler ve Yarı Buharlaşabilir Organik Bileşikler: (VOCs), (SVOCs), -Haşere İlaçları vb.,

- -Nitrojen Oksitler, -Karbon Monoksit (CO) ,
- Karbon Dioksit (CO2) , -Radon.
- Şekil 2’ de Dış ortamda kirletici gazların salınımı aşağıdaki görsel ile verilmiştir.



Şekil 2 :Kirletici gazların havaya salınımının görünümü[5].

Hava kalitesini kontrol altına almak için uygulanan stratejiler[6].

- Kirletici kaynakların kontrolü,
- Local egzost havalandırması,
- Genel havalandırma,
- Hava temizleyiciler (filtreler v.b.).

c. Dış Hava Kalitesi:

Dış havanın kısa ve uzun süreli hava konsantrasyonlarının aşılmaması gereken değerleri vardır**[7].** Evlerimiz, iş yerlerimiz ve diğer kapalı alanlar olmak üzere insanlar zamanının büyük bir kısmını iç mekanlarda geçirmektedir ve iç hava kalitesinin bu zaman dilimindeki sağlığımız üzerindeki etkisi göz ardı edilememektedir. İç hava kalitesinin beyin sağlığı üzerindeki etkilerini anlamak, karmaşık ve çok yönlü bir konsepttir. Bu bölüm çalışmasında, iç hava kalitesi ile beyin sağlığı arasındaki bağlantı daha ayrıntılı bir şekilde incelenerek bu etkilerin altında yatan mekanizmalara ve bilimsel araştırmalara yer verilmektedir.

2.İç Hava Kalitesinin Beyin Sağlığına Etkileri

2.1.Bilişsel Yetenekler Üzerindeki Etkiler:

Okullarda vb. binalarda iç mekân ilişkisi ve ilgili detaylar en etkili biçimde, önceden planlanmalıdır. Havalandırma ve aydınlatma sağlık koşullarına uygun şekilde yapılmalıdır. İç mekanlardaki hava kalitesi, özellikle bilişsel fonksiyonlarımız üzerinde belirgin etkilere sahiptir. Çeşitli bilimsel çalışmalar, düşük iç hava kalitesinin dikkat, konsantrasyon, hafıza ve problem çözme yeteneklerini olumsuz etkileyebileceğini göstermektedir. Toksinler, kimyasal maddeler ve partiküllerin solunması, beyin işlevlerini yavaşlatabilmekte ve düşüncelerin berraklığını azaltabilmektedir**[8].**

2.2 Beyin Gelişimi ve Çocuklar:

Özellikle çocuklar için iç hava kalitesi önemlidir. Çocuklar hava kirliliğinin olumsuz etkilerine, erişkinlere göre

daha fazla duyarlıdır. Çünkü alveollerin % 80'i postnatal olarak oluşmakta ve akciğerlerin tam gelişimi 6- 8 yaşına kadar devam etmektedir. Çocukların dakikadaki solunum sayılarının daha hızlı olması ve fiziksel aktivitelerinin fazlalığı nedeniyle erişkinlere kıyasla daha fazla solunumsal toksik maddeyle karşılaşmaktadırlar**[9].**

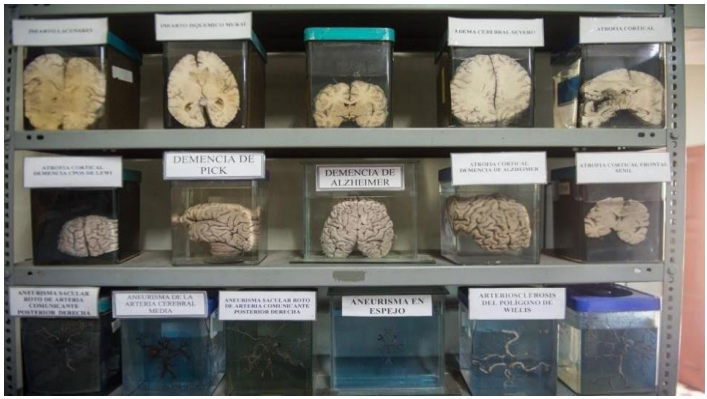
Zararlı kimyasal maddelerin veya alerjenlerin yoğun olduğu iç mekanlarda büyüyen çocuklar, bilişsel gelişimleri üzerinde risk altında olabilmektedir. Okullardaki kötü hava kalitesi, öğrencilerin öğrenme yeteneklerini sınırlayabilmektedir. İyi bir iç hava kalitesi, özellikle çocuklar için daha iyi öğrenme koşulları sağlayabilir ve akademik başarıyı olumlu yönde etkileyebilmektedir.

Sınıftaki kimyasal toksinler ve biyolojik maddeler sağlıkla ilgili tehlikelerin ve olumsuz eğitim koşullarının ortaya çıkmasına neden olabilmektedir. Kreş ve anaokullarındaki iç hava kalitesindeki olumsuzluklar çocukların sağlık, öğrenme derecesi ve verimliliğini de etkilemektedir. Etkiler geçici veya uzun süreli olabilir ve hafif rahatsızlık veren belirtilerden ciddi ve sürekli rahatsızlıkların ortaya çıkmasına kadar uzanabilmektedir**[9].**

2.3.Hava Kirleticileri ve Nörolojik Hastalıklar:

İç mekanlarda solunan hava kirleticileri, nörolojik hastalıkların riskini artırabilmektedir. Bazı çalışmalar, uzun süreli hava kirleticilerine maruz kalan kişilerin Alzheimer ve Parkinson gibi nörolojik hastalıklara yakalanma riskinin daha yüksek olduğunu öne sürmektedir.

Aşağıda şekil 3'de bazı nörolojik hastalıkların sebep olduğu insan beynindeki değişim görülmektedir.



Şekil 3:*Hastalıkların insan beyninde meydana getirdiği şekilsel değişiklikler****[10].***

Hava kirliliğinin inme ve beyin üzerindeki etkileri önemsenmesi gereken ve acil bir konudur. Konunun önemi nedeniyle, Dünya Nöroloji Federasyonu (WFN) tarafından, her yıl 22 Temmuz'da kutlanan "Dünya Beyin Günü" konusu, toplumsal farkındalık oluşturmak üzere bu yıl "Beyin Sağlığı İçin Temiz Hava" olarak belirlenmiştir, bu konuda bütün dünyada yapılacak bilgilendirme ve farkındalık çalışmaları desteklenmektedir**[11].**

Hava kirliliği bütün dünya nüfusunu etkileyen bir olaydır. Zararlı bio-aerosoller tarafından kontaminasyon (polen, mikrop ve toksinler) ve kimyasal bileşikler (insan yapımı veya doğal kaynaklı), işyerlerinde uzun süreli, havadaki belirli kimyasallara maruz kalmak, birçok nörolojik hastalığının oluşmasına neden olmaktadır.

Son zamanlarda yapılan araştırmalarda hava kirliliğinin inmeye yol açtığı açık bir şekilde kanıtlanmıştır. "Küresel Hastalık Yükü" hesaplanması için 1990 – 2013 yılları arası 188 ülkede yapılan çalışmalarda hava kirliliğinin %30'a kadar inmeye sebep olabildiği sonucu ortaya çıkmıştır**[12].**

Hava kirliğinin zararlı etkileri en çok gelişmekte olan ülkeler ve daha önce inme geçmişi veya damar hastalıkları olan kişilerde daha fazla görülmektedir. Bilindiği gibi inme dünyada en yaygın olarak ölüm ve fonksiyon kaybına neden olan hastalık gruplarından birini oluşturmaktadır**[13].**

Sonuç olarak iç hava kalitesi ortam sıcaklığı, nemi ve hava hareketi kapalı mekanlarda yapılan eylemin türüne bağlı olarak verimliliğin artmasına bedensel ve zihinsel üretim hızını etkileyerek çalışma performansının yükselmesine neden olmaktadır. Mekâna taze hava alan açıklıklar ile çıkış açıklıklarının düzenlenmesi ve mekân içi donatı ve bölücü boyutları ile bunların yerleşimine dikkat edilmesi ile mekan içi hava hareketi etkili yani verimli hale gelebilmektedir. İç hava kalitesinin kabul edilebilir sınır-limit değerleri aşması biyolojik ve psikolojik açıdan sağlık sorunlarına yol açmaktadır.

a)Biyolojik sorunlar: üst solunum yollarında tahriş, ciğerlerde astım ve benzeri semptomlar, baş ağrısı, baş dönmesi, bulantı, kusma, ciltte hassasiyet kızarıklık, kaşıntı, koku ve tat duyusunda değişiklikler olarak;

b)Psikolojik sorunlar: Mental rahatsızlıklar ve Zihinsel yorgunluk olarak belirtilebilir. Zihinsel yorgunluk: hafıza kaybı ve konsantrasyon eksikliği olarak örneklenebilmektedir**[14].**

Araştırmalar, hava kalitesi ile nörolojik hastalıklar arasındaki karmaşık ilişkiyi anlamaya yönelik daha fazla çalışmaya ihtiyaç olduğunu göstermektedir.

Bilimsel Araştırmaların Katkısı

Bilimsel araştırmalar, iç hava kalitesinin beyin sağlığına etkilerini belirlemek için önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle hava kalitesi ile bilişsel işlevler, zihinsel sağlık ve nörolojik hastalıklar arasındaki ilişkiyi anlamak için birçok çalışma yürütülmüştür. Hava kirliliğinin sağlık etkileri maruziyetin artmasına bağlı olarak ortaya çıkarken, herhangi bir sağlık etkisinin görülmeyeceği güvenli bir eşik değer yoktur. Bununla birlikte Avrupa ve Amerika Birleşik Devletleri'nde yapılan çalışmalarda olumsuz sağlık etkilerinin görüldüğü konsantrasyon aralığı PM2.5 için 3–5 μg/m³ olarak tahmin edilmektedir. PM2.5 için uzun vadeli limit değeri olarak yıllık ortalama 10 μg/m³ konsantrasyon seçilmiştir. Bu değer, Amerikan Kanser Derneği'nin (ACS) çalışmasında hayatta kalma üzerinde önemli etkilerin gözlendiği aralığın alt ucunu temsil etmektedir. Tüm bu çalışmalarda, PM2.5'e uzun süre maruz kalma ile ölüm arasında güçlü ilişkiler olduğu bildirilmiştir**[15].**

Harvard Üniversitesi'nde yapılmış bir çalışmada, kirli hava içinde bulunan çok sayıdaki toksik maddenin nörolojik fonksiyonları ve fetüsü etkilediği belirtilmiştir **[16].**

Barselona'da 12 aylık bir araştırmada çocukların beyin gelişimi, bellek ve dikkat düzeyleri okulda yüksek ve düşük trafik kirliliğine maruz kalma durumuna göre değerlendirilmiştir. Çalışma toplam 39 okuldan yaşları 7-10 arası 2715 çocuğa 1 yıl boyunca 3 ayda bir bilgisayar aracılığıyla test

uygulanarak gerçekleştirildi. Yoğun kirliliğe maruz kalan okullarda okuyan çocuklarda bilişsel düzey 12 ayda %7,5 gelişme gösterirken, trafiğe uzak okullarda okuyanlarda bu gelişmenin %11,5 olduğu saptanmıştır **[17].**

Okulu yoğun trafiğin olduğu yerlerde olan ve yoğun hava kirliliğine maruz kalan çocukların bilişsel gelişimlerinin daha yavaş olduğu görülmüştür**[18].**

Aşağıda dış hava kalitesini etkileyen aynı zamanda iç hava kalitesinde dolaylı yollardan ulaşan kirli hava için aşağıda Şekil 4'de trafikten kaynaklı hava kirliliğinin temsili resmi bulunmaktadır.



Şekil 4 : Egzoz gazlarından kaynaklı kirliliğin temsili resmi [18]

3.İç Hava Kalitesinin Beyin Sağlığına Etkisi Konusunda Yapılan Bilimsel Çalışmalardan Bazı Örnekler

3.1.Uzun Süreli Hava Kirliliği ve Bilişsel Gerileme İlişkisi:

Gelişmekte olan ülkelerdeki nüfusun çoğu, hava kalitesinin güvenli seviyelerde olmadığı ortamlarda yaşamaktadır. Yapılan araştırmalar hava kirliliğinin insan sağlığına çeşitli şekillerde zarar verdiğini ortaya koymaktadır. Ancak çok az araştırma, hava kirliliğinin özellikle yaşlı insanların bilişsel yetenekleri üzerindeki etkisine odaklanmaktadır. Bireysel bilişsel performans ile bilişsel testin yapıldığı anda yerel çevresel stresörlere maruziyetin eşleştirildiği önceki araştırmaların sonuçları kesin değildir. Ayrıca bu çalışmalar, hava kirliliğine ya geçici maruziyetin ya da kümülatif maruziyetin etkilerini dikkate almaktadır. Bu iki etkinin birlikte çalışıldığı araştırma sayısı çok azdır.

2018 yılında Çin' yayımlanan bir araştırmada; çalışma uzun süreli hava kirliliğinin yaşlı bireylerde bilişsel gerileme riskini artırdığını göstermektedir. Bu çalışmada, iç mekan hava kalitesinin dış hava kirliliği ile bağlantılı olabileceğini düşündürmektedir**[19].**

3.2.İç Mekan Bitkileri ve Hava Kalitesi:

NASA'nın Yer Bilimleri Bölümü'nün yaptığı bir araştırma, iç mekan bitkilerinin, evlerdeki hava kalitesini iyileştirebileceğini ve bu iyileştirmenin insanların zihinsel ve fiziksel sağlığına olumlu etkileri olabileceğini göstermektedir. Özellikle bazı bitkilerin iç mekanlardaki toksinleri filtrelediği ve oksijen ürettiği bilinmektedir.

Aşağıda Şekil 5'de NASA'nın çalışmasının kapak resmi görünümü bulunmaktadır.



1989'da NASA tarafından yayımlanan çalışmanın kapağı

Şekil 5 :NASA tarafından yapılan çalışmanın kapak resmi görünümü[20].

NASA bu çalışmada test için 3 farklı kimyasal (uçucu organik karbonlar)

kullanmıştır; benzen, formaldehit, trikloretilen. Deneyde toplam 12 farklı bitki seçilmiştir. Deney ortamına bu kimyasallar salınmış, deneyde ayrıca bitki olmadan sadece toprağın da kimyasalları azaltıp azaltmadığı ölçülmüştür. Aynı zamanda gözden kaçırılmamalıdır ki, deney ortamında bitkilere ek olarak karbon filtre de kullanılmıştır.

NASA'nın deney sonucunda özet kısma baktığımızda, bitkilere ek olarak aktive edilmiş karbon filtresinin de hava kirliliğinde önemli rol oynadığı not düşülmüştür **[21].**

Aşağıda Şekil 6’ temiz havada uygun koşullarda yetiştirilen bitki görseli bulunmaktadır.



Şekil 6: *Taze havada yetiştirilen canlı bitki görünümü [21]*

4.Temiz Hava Solunumunun Kognitif Fonksiyon Üzerine Etkisi:

Harvard Üniversitesi'nde yapılan bir çalışma, temiz hava solumanın bilişsel fonksiyonları artırabileceğini öne sürmüştür. Araştırmacılar, iç mekanlarda taze hava almanın konsantrasyonu artırabileceğini ve beyin sağlığını olumlu yönde etkileyebileceğini göstermektedir.

Harvard Üniversitesi’nden bilim insanları tarafından yapılan yeni araştırmada, ofislerdeki hava kalitesiyle, çalışanların bilişsel fonksiyonları arasında korelasyon bulunmuştur. Çok uluslu araştırmada düşük havalandırma hızları ve artan partikül miktarlarının bilişsel testlerde düşük performansa neden olduğu bulunmuştur. Yani havasız ortamlarda zihinsel kabiliyetler giderek düşmektedir. Araştırmacılar on

yılı aşkın bir süredir hava kirliliği ve bilişsel performans arasında ilişkiyi araştırmaktadır. Bu araştırmaların çoğunda, kognitif fonksiyon ve dış ortamda uzun süreli ince madde partikülü (PM2.5) maruziyetine odaklanılmaktadır **[22].**

Aşağıda iç hava kalitesine etki eden dış hava koşullarını Şekil 7' de kirli havanın insanlar üzerine etkisi temsil eden resimler verilmiştir.





Şekil 7 : Kirli havanın insanlar üzerine etkisini gösteren resimler [22].

5. Vitamin D ve İç Mekan Hava Kalitesi:

Bazı çalışmalar, düşük iç mekan hava kalitesinin D vitamini eksikliği riskini artırabileceğini göstermektedir. D vitamini eksikliği, bilişsel işlevler üzerinde olumsuz etkiler yapabilmekte ve demans riskini artırabilmektedir.

Dünya nüfusunun %80'i Dünya Sağlık Örgütü'nün belirlediği temiz hava kriterlerini karşılamayan havalar solumaktadır.

Hava kirliğinin en önemli ektilerinden biri olarak artmış ozon düzeylerine bağlı olarak güneşten gelen UVB dalgalarını absorbe etmektedir. UVB ışınları D vitamini sentezi için gerekli olduğundan, büyük şehirlerde yaşayanların çok önemli kısmında D vitamini eksikliği görülmektedir. Ozon konsantrasyonu artıkça D vitamini sentezi azalmaktadır. Eksikliğin diğer bir nedeni hava kirliliği nedeniyle insanların daha az dışarıya çıkmak istemesidir **[28].**

Anne karnındayken hava kirliliğine maruz kalan bebeklerin D vitamini düzeyleri de düşük bulunmaktadır. Havası kirli şehirde büyüyen çocukların D vitamin düzeyleri temiz havada yaşıtlarının neredeyse yarısıdır.

Nanopartiküller hem damarlar çevresinde hem de hava yolları çevresinde enflamasyona neden olmaktadır. Ayrıca hava yollarında ve/veya hava keseciklerinde nanopartiküller, yabancı cisim gibi davranarak bağışıklık yanıtını

harekete geçirmektedir. Ortaya çıkan enflamasyon endotel hücrelerinde fonksiyon kaybı ile birlikte oksijen radikallerini artırarak oksidatif strese ve pek çok enflamatuar sitokin salınmasına neden olmaktadır**[23].**

Bu bilimsel çalışmalar, iç hava kalitesinin beyin sağlığına olan etkilerini anlamak için önemli veriler sunmaktadır. İç mekanlarda hava kalitesini iyileştirmek, bilişsel işlevleri koruma ve beyin sağlığını destekleme açısından önemli bir adım olabilmektedir.

Teknolojik Gelişmeler ve İç Mekan Hava Kalitesi İyileştirmeleri

Son yıllarda teknolojik gelişmeler, iç mekan hava kalitesini izlemek ve iyileştirmek için yeni olanaklar sunmaktadır. Örneğin, akıllı hava temizleyicileri, iç mekan hava kalitesini ölçen ve gerektiğinde temizleyen cihazlar olarak yaygınlaşmıştır. Ayrıca, akıllı ev teknolojileri, iç mekan sıcaklık, nem, ve hava kalitesini izlemek ve kontrol etmek için kullanılmaktadır. Örneğin akıllı ev sistemlerinde kullanılan hava kalite sensörleri odadaki CO_2 seviyesini sürekli kontrol ederek ortamın hava kalitesinin belirlenmesine imkan tanımaktadır **[24].**

Aşağıda Şekil 8'de iç hava kalitesinin de ölçüm araçlarıyla kontrol edilebileceğinden bahsedilmektedir.



*Şekil 8 : İç hava kalitesinin ölçümünü gösteren bir görsel görünüm**[25].***

Bu nedenle hem akademik hem de ticari çevrelerde bir akıllı şehir uygulaması (green building) olan kapalı ortam

hava kalitesi izleme sistemleri üzerine birçok çalışmalar yapılmaktadır. Böylece tek bir ölçüm ortamına bağlı kalmayarak çoklu parametre ölçümüne imkân veren, web tabanlı, dağıtık mimariye sahip, esnek ve ölçeklenebilir bir kapalı ortam hava kalitesi izleme sistemleri önerilebilmektedir. Ayrıca çalışmada, kapalı ortamlardan elde edilen birbirinden bağımsız ölçüm ve ortam parametrelerinin (CO2 seviyesi, termal konfor değeri) birlikte analiz edilebilmesini ve sonuç olarak ortamın çevresel hava kalite bilgisinin elde edilebilmesini sağlayan bir bulanık model önerilmiştir. Bir örnekte, geliştirilen web tabanlı gerçek zamanlı izleme sistemi ile çeşitli senaryolar altında kapalı ortam hava kaliteleri ve termal konforları izlenmiştir. Sistemde bulunan ölçüm cihazları ile çevresel faktörler (sıcaklık, nem, hava akış hızı, CO2 konsantrasyonu) algılanmaktadır. Elde edilen ham bilgi metabolizma hızı, giyim gibi sübjektif faktörlerle birlikte değerlendirilerek anlamlı hale getirilmektedir. Son olarak, elde edilen ortam hava kalitesi ve termal konfor bilgileri bulanık mantık yöntemiyle analiz edilip, son kullanıcıya sınıf ortamının genel çevresel kalitesi bilgisi sunulmaktadır. Her ölçüm senaryosunun ardından ortamdaki kişilere uygulanan değerlendirme ölçeği tipinde anketlerle önerilen sistemin ortamın hava kalitesi hakkında ne kadar başarılı sonuçlar ürettiği gözlemlenmiştir **[26].** İnsanlar zamanlarının %90 ‘ını iç ortamda geçirmektedir. Dolayısıyla iç ortam hava kalitesi dış ortamla kıyaslandığında 2-10 kat daha kirlidir. **[27].**

SONUÇ :

İyi bir İç hava kalitesinin, sağlıklı değerlerde tutulması için kirleticiler bertaraf edilerek gerekli önlemler alınmalıdır. Kirli hava olarak nitelenen zararlı gazların oransal olarak yüksek olduğu durumlarda sağlık açısından pek çok risk teşkil ettiği bilinmektedir. Bunların açıkça göze çarpan etkilerinden biri şüphesiz ki beyin üzerindeki etkisidir. İç hava kalitesi ve beyin sağlığı arasındaki ilişki karmaşık ve çok yönlü bir konudur dolayısıyla her iki alan için de detaylı ve derin bir araştırma gerektirmektedir. Bu alandaki bilimsel çalışmalar ve teknolojik gelişmeler, iç mekan hava kalitesini izlemek ve iyileştirmek için önemli adımlar attırmıştır. İnsanların iç mekanlarda temiz hava soluması ve sağlıklarını korumak için iç hava kalitesini iyileştirmek, gelecekteki nesillerin beyin sağlığını olumlu bir şekilde etkilediği, uygun değerlerde olmayan hava kalitesinin bilişsel düzeyde düşüşe neden olduğu, sağlık sorunlarına yol açtığı görülebilmektedir. Halen Türkiye de İç hava kalitesinin beyin üzerine etkili bir yüksrk lisans ve doktora çalışması bulunmaması nedeniyle akademik çerçevede bu konuda lisansüstü çalışmaların önü açık olduğunu belirtiriz.

KAYNAKLAR:

[1].https://www.dersteknik.com/2012/04/kirli-cevrede-yasamak-zor-4snf-fen- ve.html?ysclid=lr2fun3txb968341834 (Erişim tarihi:10.03.2024).

[2].https://www.mfa.gov.tr/ic-hava-kalitesi-ve-hasta-bina-sendromu.tr.mfa#:~:text=%c4%b0nsan%20konforu%20ve%20%c3%bcret kenli%c4%9fi%20i%c3%a7in%20solunan%20havan%c4%b1n%20%254 0-60,bilim%20adamlar%c4%b1%20taraf%c4%b1ndan%20yap%c4%b1lan

%20ara%c5%9ft%c4%b1rmalar%20sonucunda%20saptanm%c4%b1%c5

%9f%20bulunmaktad%c4%b1r (Erişim tarihi:10.03.2024).

[3].https://elektromekaniksefi.com/faq/evdeki-statik-elektrik-nasil-giderilir.html?ysclid=lr2g52h645426993875 (Erişim tarihi:11.03.2024).

[4].https://tr1.kartanonrouva.net/indoor-air-pollution-sources-and-tips-to-deal- with-it-2490 (Erişim tarihi:15.03.2024).

[5].https://haberton.com/hava-kirliliginin-norolojik-hastaliklara-etkileri/ (Erişim tarihi:10.02.2024).

[6].https://tr.linkedin.com/pulse/hava-kalitesini-y%c3%b6netmenin-8-yolu- hu%c5%9f-m%c3%bchendislik-ltd-%c5%9fti- (Erişim tarihi:11.01.2024).

[7].https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/7f2a4ea3bedd425_ek.pdf (Erişim tarihi:01.03.2024).

[8].BARBAROĞLU A., “Eğitim ortamları açısından okul öncesi eğitim kurumları”, Abant izzet baysal üniversitesi eğitim fakültesi dergisi, 18 (3), 1313-1330,(2018).https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/554889) (Erişim tarihi:10.12.2023).

[9].https://www.forbes.com/sites/quora/2017/09/19/how-does-the-brain-store- and-retrieve-memories/?sh=bdf6ade4f992 (Erişim tarihi:17.03.2024).

[10].https://noropsikoloji.org/dunya-beyin-gunu/(Erişim tarihi:05.01.2024).

[11].https://hsgmdestek.saglik.gov.tr/depo/birimler/cevre-sagligi/2-ced/halka_yonelik_bilgiler/hava_kirliligi_saglik_risk_degerlendirme.pdf (Erişim tarihi:04.02.2024).

[12].https://noroloji.org.tr/haber/425/beyin-sagligi-icin-temiz-hava-sart-basin- aciklamasi-22-temmuz-dunya-beyin-gunu (Erişim tarihi:01.03.2024).

[13].http://tojdac.org/tojdac/volume8-ıssue1_files/tojdac_v08i1107.pdf (Erişim tarihi:01.01.2024).

[14].WHO, (2005), air quality guidelines global update 2005. particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide (Erişim tarihi:01.01.2024)

[15].WARNOCK, C. (2014), harvard draws links between autism and air pollution (Erişim tarihi:01.02.2024)

[16].SUNYER, J. ET AL. (2015), association between traffi c-related air pollution in schools and cognitive development in primary school children: a prospective cohort study. plos med. 12 (3). (Erişim tarihi:01.03.2024)

[17].https://www.ttb.org.tr/userfiles/files/hava-kirlilig%cc%86i-ve- sag%cc%86l%c4%b1k-etkileri-kara-rapor-2019.pdf (Erişim tarihi:01.01.2024)

[18].https://www.medikaynak.com/n/hava-kirliligi-bilissel-dususle- iliskilendirildi (Erişim tarihi:01.02.2024)

[19].https://gastroeko.com/2022/05/27/ev-havasini-en-iyi-temizleyen-7-bitki/ (Erişim tarihi:01.03.2024)

[20].https://www.oggusto.com/dekorasyon/bitki-ve-outdoor-yasam/havayi- temizleyen-bitkiler (Erişim tarihi:01.02.2024).

[21].https://www.gercekbilim.com/harvard-arastirmasinda-havasiz-ofis- ortamlarinda-bilissel-yeteneklerin-dustugu-gosterildi/.(Erişim tarihi:02.02.2024).

[22].https://www.banutascifresko.com/yararli-bilgiler/covid-19/hava-kirliligi- d-vitamini-beyin-ve-covid-19 (Erişim tarihi:03.01.2024).

[23].https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/1152033(Erişim tarihi:01.01.2024).

[24].https://www.onurenerji.com.tr/hizmetler/olcumler/ic-hava-kalitesi- olcumu/ (Erişim tarihi:02.03.2024)

[25]. BALTA, D., "dağıtık sensör sistemleri mimarisi ile bulanık mantık temelli ve çevrimiçi kapalı ortam hava kalitesi izleme " Sakarya üniversitesi fen bilimleri enstitüsü doktora tezi(Erişim tarihi:01.12.2023),www. dağıtık sensör sistemleri mimarisi ıle bulanık mantık temelli ve çevrimiçi kapalı ortam hava kalitesi ızleme sistemi geliştirilmesi - proquest

[26].https://www.termodinamik.info/makale/ic-hava-kalitesi-ve-insan- sagligina-etkileri (Erişim tarihi:01.03.2024).

[27].https://acikerisim.medipol.edu.tr/xmlui/bitstream/handle/20.500.12511/75 40/ g%c3%bcrol-cansu-2019.pdf?sequence=1&isallo wed=y**(Erişim tarihi:01.03.2024).**

3. BÖLÜM

PNÖMATİK MANİPÜLATÖRLERİN İŞ GÜCÜ AZALTMA VE GÜVENLİĞİ ARTIRMADAKİ ROLÜ

Ömer ARAT[1]
Barış ERMAN[2]
Ali KİBAR[3]

[1]Mak. Müh., Er-Ha Mühendislik, ORCID: 0009-0008-9894-9631
[2] Elk. Müh. Er-Ha Mühendislik, ORCID: 0009-0009-2127-8259
[3] Doç. Dr., Kocaeli Üniversitesi, ORCID: 0000-0002-2310-1088

1. Giriş

Endüstriyel ortamlarda iş gücü azaltma ve iş güvenliği artırma konuları, işletmelerin verimliliklerini artırmak ve çalışanlarını korumak için sürekli olarak üzerinde durdukları konulardır. Bu bağlamda, pnömatik manipülatörler gibi otomasyon teknolojileri, iş süreçlerinde önemli bir dönüşüm sağlamaktadır. Pnömatik manipülatörler, işletmelerin üretim hattında manuel iş yükünü azaltarak, tekrarlayan ve ağır kaldırma gibi potansiyel tehlikeleri ortadan kaldırarak iş güvenliğini artırma potansiyeline sahiptir.

Geleneksel olarak, ağır yükleri taşımak veya hassas parçaları konumlandırmak gibi işlemler genellikle insan işçiler tarafından gerçekleştirilmektedir. Ancak, bu tür görevlerde çalışanların maruz kaldığı riskler ve olası sakatlanma vakaları endişe verici boyutlara ulaşabilmektedir. Pnömatik manipülatörler, bu riskleri azaltarak iş güvenliğini artırırken, aynı zamanda işçilerin verimliliğini de artırmaktadır. Bu teknolojiler, yüksek hassasiyet ve güvenilirlikle çalışarak, işletmelerin üretim süreçlerinde daha konsantre ve verimli bir şekilde faaliyet göstermelerine olanak tanır.

Pnömatik manipülatörlerin kullanımı, işçilerin fiziksel olarak zorlayıcı görevlerden kurtarılmasını ve daha ergonomik çalışma koşullarının sağlanmasını sağlar. Böylece işçilerin memnuniyeti artırılırken, aynı zamanda uzun vadede sakatlanma riskleri azaltılmaktadır. Dolayısıyla, pnömatik manipülatörlerin iş gücü azaltma ve güvenliği artırma konularındaki rolü, hem işletmelerin rekabet avantajı elde etmesine hem de çalışanların sağlığı ve refahının korunmasına yönelik önemli bir katkı sağlamaktadır. Bu çalışmada,

pnömatik manipülatörlerin bu önemli rolünü daha detaylı olarak ele alacak ve endüstriyel uygulamalardaki örnek uygulamaları inceleyeceğiz.

2. Endüstriyel Süreçlerdeki Değişim

Endüstriyel süreçler, teknolojik gelişmeler, rekabet koşulları ve müşteri beklentilerindeki değişimlere paralel olarak sürekli değişim içerisindedir (Cugno, Castagnoli, & Büchi, 2021). Bu değişim, verimlilik, hız ve esneklik gibi faktörlerle birlikte giderek daha kompleks hale gelmektedir. Bu sebeple, geleneksel yöntemlerin modern ve yenilikçi çözümlerle birleştirilmesi gerektirmektedir. Gelişen teknolojiyle endüstriyel süreçlerdeki değişim, otomasyonun ve robotik sistemlerin yaygın bir şekilde kullanılmasını zorunlu hale getirmiştir. Bu durum, işletmelerin daha verimli ve rekabetçi olmalarını sağlamaktadır. Endüstriyel süreçlerdeki değişimle birlikte, işletmelerin üretkenliklerini artırmak ve maliyetleri düşürmek için daha esnek ve verimli çözümler arayışı hızla artmaktadır (Soori, Arezoo, & Dastres, 2023). Pnömatik manipülasyon, bu bağlamda önemli bir rol üstlenmekte olup sahip olduğu birçok avantajlar ile öne çıkmaktadır. Bu üstünlükler aşağıdaki gibi sıralanabilir (Ali, Noor, Bashi, & Marhaban, 2009):

İş gücü azaltma: Pnömatik manipülatörler, endüstriyel işlemlerdeki yük kaldırma ve taşıma görevlerini üstlenerek iş gücünü önemli ölçüde azaltarak işletmelerin daha etkili ve verimli bir şekilde çalışmalarına imkân sağlamaktadır. Belirli görevleri gerçekleştirmek için insan gücüne olan bağımlılığı düşürerek işletmelerin daha az personel ile daha

fazla iş yapabilme kabiliyeti kazanmasıyla maliyetleri düşürebilmektedir.

Hassasiyet ve kontrol: Pnömatik manipülasyon sistemleri, yüksek hassasiyetle çalışabilme özelliğine sahiptirler. Bu durum özellikle üretim süreçlerinde detaylı ve hassas operasyonların gerçekleştirilmesinde büyük bir avantaj sağlar. Aynı zamanda, bu sistemlerin kontrolü kolaydır ve operatörlere geniş bir kontrol yelpazesi sunar. Şekil 1'de yüksek hassasiyette operatörün kontrolü ile taşıma fikstürleri gösterilmektedir. Bazı durumlarda ürünün hassas bir şekilde tutulması gerekmekteyken bazen de hareket hassasiyeti önemli olmaktadır. Pnömatik manipülatörler bunlar ve bunlara benzer birçok taşıma sistemlerinde çok geniş bir kullanım alanına sahiptir.



Şekil 1. Yüksek hassasiyete sahip pnömatik manipülatörler.

Hızlı ve güvenli operasyonlar: Pnömatik manipülatörler, hava basıncı kullanarak çalıştıkları için hızlı tepki sürelerine sahiptirler. Bu özellik manipülatörlere anında hareket etme yeteneğiyle üretim süreçlerinin hızlandırılmasını sağlar. Ayrıca, otomatik güvenlik sistemleri entegre edilerek operatörlerin güvenliği artırılabilmektedir. Hızlı tepki süreleri, üretim süreçlerinin hızlandırılmasına ve daha verimli bir üretim akışının sağlanmasına imkân sağlamasının yanında; malzeme taşıma, yerleştirme ve montaj gibi işlemlerin daha hızlı gerçekleştirilmesini sağlar. Böylece, genel üretim süreçlerinin daha verimli ve hızlı bir şekilde yürütülmesi sağlanır.

Esneklik ve uyum: Pnömatik manipülasyon sistemleri, çeşitli endüstriyel uygulamalara kolayca uyarlanabilir, hızlı bir şekilde devreye alınabilir ve ayarlanabilir. Bu esneklik, işletmelerin üretim hatlarını çeşitlendirmelerine ve değişen taleplere hızla yanıt vermelerine olanak tanır. Böylece, üretim hatlarının değişen taleplere veya üretim gereksinimlerine hızla uyarlanmasını sağlar.

3. Pnömatik Manipülasyonun Temel İlkeleri

Pnömatik sistemlerde mekanik hareket elde etmek için basınçlı hava kullanılmaktadır. Endüstriyel ortamlarda yaygın olarak kullanılan bu sistemler, çeşitli bileşenlerin bir araya gelmesiyle işlevlerini yerine getirirler. Temel bileşenler arasında basınçlı hava kaynağı, basınç regülatörleri, valfler, silindirler ve hava filtreleri bulunur. Bu bileşenler, kontrol edilebilir bir basınç altında çalıştırılarak mekanik hareket sağlanır. Hava ile çalıştıkları için çok hızlı tepki sü-

relerine sahiptir. Bu özellik, üretim süreçlerinde hızlı operasyonların mümkün olmasını sağlar. Genellikle düşük maliyetli, bakımı kolay ve enerji tüketimi diğer sistemlere göre daha düşüktür. Hava kullanımı, hidrolik sistemlere kıyasla daha hafif bir çalışma ortamı sağlayarak sistemleri daha taşınabilir/yerleştirilebilir kılar ve hareket kabiliyetini artırır.

Pnömatik manipülatörler, pnömatik sistemlerin bir alt kategorisi olarak tasarlanmıştır ve endüstriyel süreçlerde malzeme taşıma, kaldırma ve yerleştirme gibi görevleri yerine getirmek üzere kullanılır. Bir hava kompresörü tarafından üretilen basınçlı hava, pnömatik manipülasyon sistemine iletilir. Basınç regülatörleri, hava basıncını kontrol ederek sistemde istenen güç düzeyine ulaşılmasını sağlar. Valfler, basınçlı havanın manipülatörün çeşitli kısımlarına yönlendirilmesini kontrol eder ve bu sayede manipülatörün hareketi sağlanır. Pnömatik silindirler veya benzeri aktüatörler, basınçlı havayı mekanik harekete dönüştürerek manipülasyon işlemlerini gerçekleştirir. Bu prensipler doğrultusunda, pnömatik manipülasyon sistemleri endüstriyel süreçlerde çeşitli görevleri etkili bir şekilde yerine getirir.

4. Pnömatik Manipülasyonun İş Gücü Azaltma Yetenekleri

Endüstriyel süreçlerde iş gücünü azaltma ve verimliliği artırma konusunda pnömatik manipülasyon sistemleri önemli avantajlara sahiptir. Bu sistemlerin iş gücü azaltma yetenekleri aşağıdaki başlıklar altında özetlenebilir:

4.1. Yük taşıma ve ileri teknolojiler

Pnömatik manipülasyon sistemleri, endüstriyel süreçlerde yük taşıma konusunda çeşitli ileri teknolojilerle entegre edilebilen esnek ve güçlü çözümler sunmaktadır (Ali et al., 2009). Bu sistemler, endüstriyel ortamlarda geniş bir yük taşıma kapasitesine sahiptir. Hafif montaj parçalarından ağır sanayi ekipmanlarına kadar geniş bir yelpazede ürün taşıma yetenekleri birçok endüstriyel uygulamalarda verimli bir şekilde kullanılabilir hale getirmektedir. Programlanabilir kontrol sistemleri aracılığıyla esnek hareket kabiliyetine sahiptir. Bu sayede, çeşitli yüklerin farklı konumlara yerleştirilmesi veya taşıması için gerekli olan hareketler kolaylıkla gerçekleştirilerek üretim süreçlerindeki çeşitlilik ve değişen taleplere mükemmel uyum sağlanır. İleri teknolojilerle entegre edilen pnömatik manipülasyon sistemleri, otonom taşıma yeteneklerine sahip olmaktadır. Bu durum endüstriyel tesislerde malzeme taşıma, depolama ve yerleştirme görevlerini otomatikleştirmeyi mümkün kılar. Otonom sistemler, verimliliği artırırken operatör müdahalesini ve dolayısıyla hatasını minimize eder.

Pnömatik manipülasyon sistemleri, yük taşıma işlemlerinde hassasiyeti artırmak için çeşitli sensör teknolojileri ile entegre edilebilmektedir. Gelişmiş sensörler, çevresel koşulları izler ve değişikliklere uyarlama yeteneği sağlar. Böylece hassas taşıma ve yerleştirme görevlerinde başarı artırılmış olur. Pnömatik manipülasyon, enerji verimliliği sağlayan tasarımlarıyla dikkat çeker. Yük taşıma işlemlerinde enerjiyi verimli bir şekilde kullanarak işletme maliyetlerini optimize ederek uzun süreli kullanımlarda ekonomik avantajlar sağlar.

4.2. İnsan ile iş birliği ve iş güvenliği

Pnömatik manipülasyon sistemleri, endüstriyel süreçlerde iş güvenliğini artırmak ve insanlarla iş birliği içinde çalışabilmek adına çeşitli özelliklere sahiptir (Yi Han, 2022). Özellikle son teknoloji sensör ve kontrol sistemleri ile entegre edildiğinde, insanlarla güvenli bir şekilde iş birliği yapabilir. Bu iş birliği, endüstriyel tesislerde operatörlerle etkileşim halinde olan robotik sistemlerin daha esnek ve adaptif olmasını sağlar. Operatörler, pnömatik manipülatörlerle birlikte çalışarak ortak görevleri gerçekleştirir. Hassas kontrol yetenekleri sayesinde insanlarla etkileşimde bulunabilir. Özellikle dokunmatik duyarlı sensörlerle entegre edilen sistemler operatörlerin daha ince ve detaylı işlere odaklanmasına yardımcı olur. Çeşitli güvenlik sensörleri ve kameralarla donatılarak çevresel algılama yetenekleri artırılabilir. Operatörlerle etkileşimde bulunurken çevresel tehlikeleri algılayabilir ve güvenli duruşlara geçebilirler. Özellikle acil durum duruşları, operatör güvenliğini maksimumda tutar.

Pnömatik manipülasyon sistemleri, operatörlere eğitilebilir ve adaptif olma özelliği sunar. Belirli görevlere uygun hale getirmek için eğitilebilir ve programlanabilir. Bu durum, iş süreçlerini optimize etmek ve hataları azaltmak için önemlidir. Geribildirim ve izleme özellikleri ile donatılmasıyla işlemlerin gerçek zamanlı olarak izlenmesi, performansın değerlendirilmesi ve olası hataların önceden tespit edilmesi sağlanır. Sensörler ve geri bildirim mekanizmaları, operatör hatalarını algılar ve sistemde düzeltmeleri otoma-

tik olarak uygular. Böylece hataların etkileri minimize edilerek operatör hatalarının otomatik olarak düzeltilmesi mümkün olmaktadır.

4.3. İnsan kaynaklı hataların azaltılması

Pnömatik manipülasyon sistemleri, endüstriyel süreçlerde insan kaynaklı hataları azaltma konusunda önemli avantajlar sunar. Özellikle belirli ve tekrarlanabilir görevlerde otomasyon büyük bir önem arz etmektedir. İnsanların monoton veya tekdüze görevlerde yapabileceği hatalar, otomatikleştirilmiş pnömatik sistemlerle azaltılabilmektedir. Böylece, üretim hattındaki işlemlerin daha tutarlı ve hatasız olması sağlanır. Şekil 2'de gösterildiği gibi özel fikstür tasarımlarıyla otomasyonda tekdüze iş akışı sağlanabilmektedir. Fikstür hareketlerinin belirli bir alan içerisinde farklı eksenlere hareket etmesiyle hem iş gücü azaltılmakta hem de iş akışı hızlandırılmaktadır.



Şekil 2. Tekdüze iş akışı saplanan işlemler.

Hassas kontrol yetenekleri sayesinde yapılacak olan işlemlerin doğruluğunun artırılmasında pnömatik manipülatörler önemli rol oynarlar. İnsanların manuel olarak gerçekleştirdiği hassas işlemlerdeki hatalar, pnömatik sistemlerin ölçülen ve programlanmış hareketleriyle azaltılarak ürün kalitesi ve doğruluğu artırılmış olur. İnsan kaynaklı hataların sebep olduğu güvenlik ihlallerini önlemek adına belirli güvenlik önlemleri, pnömatik sistemlerde programlanabilir. Bu şekilde, güvenlik protokolleri kullanılarak operatör hatalarından kaynaklanan riskler azaltılır.

5. Güvenliği Artırmada Pnömatik Manipülasyonun Rolü

Güvenlik, endüstriyel işletmelerde en önemli önceliklerden biridir. Pnömatik manipülasyon sistemleri, iş güvenliğini artırmada önemli bir rol oynamaktadır. İnsanlarla güvenli bir şekilde iş birliği yapılarak operatörlerin ve robotların aynı çalışma ortamında bulunabileceği müşterek iş süreçleri mümkün olmaktadır. Böylece insan-robot etkileşimi planlı ve güvenli bir şekilde gerçekleştirilebilir.

Dahili güvenlik sensörleri ile donatılmış olan sistemler sayesinde beklenmeyen durumlar algılanır ve sistem üzerinde acil durum durmaları tetiklenir. Bu özellik, anlık tehlikelere hızlı bir şekilde müdahale edilmesini sağlar. Ayrıca, belirli güvenlik kuralları ve önlemleri programlanarak sistemlerin güvenli ve kontrollü bir şekilde çalışması sağlanır. Böylece, operatörler ve çevre güvenliği için önlemler alınmış olur.

Hassas kuvvet algılama teknolojileri ile donatılan pnömatik manipülatörler sayesinde çevredeki engellerin algılaması ve uygun önlemlerin alması sağlanır. Böylece, manipülatörün herhangi bir temas anındaki olası tehlikelere karşı güvenlik artırılmış olur. Belirlenmiş güvenli çalışma alanlarına ve kısıtlamalara uygun olarak programlanarak, sistemin belirlenen bölgelerde güvenli bir şekilde çalışması sağlanır ve böylece operatörler potansiyel tehlikelerden korunmuş olur. Ayrıca, eğitilebilir güvenlik parametreleri sisteme entegre edilebilmektedir. Sistemlerin çalışma şeklini ve

tepkilerini belirleyen güvenlik parametrelerinin eğitilmesiyle manipülatörün işletme gereksinimlerine uygun olarak özelleştirilmesi sağlanır.

5.1. Tehlikeli Ortamlarda Kullanım

Tehlikeli ortamlarda, iş güvenliği önlemleri titizlikle ele alınmalıdır. Pnömatik manipülasyon sistemleri, bu tür zorlu koşullarda güvenliği sağlamak ve iş süreçlerini optimize etmek için özel tasarımlarla donatılabilmektedir. Patlayıcı veya yanıcı ortamlarda kullanılan sistemler uygun malzemelerden üretilmiş olması gerekmektedir. Sistemler, uluslararası standartlara ve sertifikalara uygun olarak tasarlanmalıdır. Tehlikeli gazları algılama yeteneğine sahip pnömatik manipülasyon sistemleri, bu ortamlarda potansiyel tehlikeleri önceden tespit eder. Algılama sonrasında otomatik tepki sistemi devreye girerek operatörleri ve çevreyi güvenli bir şekilde korur. Tehlikeli ortamlarda sıcaklık ve basınç değişimleri çok yaygındır. Pnömatik sistemler, aşırı sıcaklıklara ve basınçlara dayanıklı malzemelerle tasarlanmasıyla dayanıklılık artırılarak güvenlik sağlanır.

Pnömatik manipülasyon sistemleri, tehlikeli durumları algıladığında otomatik ikaz ve durdurma sistemlerine sahip olmalıdır. Bu durum, anlık müdahale ve potansiyel riskleri minimize etme açısından kritiktir. Tehlikeli ortamlarda, operatörlerin fiziksel olarak bulunması riskli olabilir. Bu gibi durumlarda, pnömatik manipülasyon sistemleri uzaktan kontrol ve izleme özellikleri içermelidir. Operatörler, güvenli bir uzak mesafeden sistemleri yönetebilmelidir. Tehlikeli kimyasallar endüstride yaygın olarak bulunakta-

dır. Eğer pnömatik sistemler tehlikeli kimyasalların bulunduğu ortamlarda kullanılacaksa kimyasal dirence sahip olmalı ve korozyona karşı dayanıklı malzemeler içermelidir.

5.2. Otomatik Acil Durdurma ve Güvenlik Protokolleri

Tehlikeli ortamlarda kullanılan pnömatik manipülatörlerde, otomatik acil durdurma ve güvenlik protokolleri, operatörlerin ve çevrenin güvenliğini sağlamak için kritik bir rol oynar. Bu protokoller, olası tehlikeli durumları önceden algılamak ve hızlı bir şekilde müdahale etmek için tasarlanmıştır. Çeşitli sensörler aracılığıyla tehlikeli durumlar algılanmaktadır. Bu sensörler arasında termal algılayıcılar, gaz dedektörleri, basınç sensörleri ve hareket sensörleri sayılabilir. Algılanan tehlikeli durumlarda sistem sesli uyarılar, ışık sinyalleri veya ekranda görsel uyarılar şeklinde otomatik ikazlar üretir. Böylece, operatörlerin hızlı bir şekilde bilgilendirilmesi, acil durum müdahalesini kolaylaştırır.

Otomatik acil durdurma mekanizmaları hareketli sistemlerin olmazsa olmaz bileşenlerinden birisidir. Algılanan tehlike durumunda sistem, tüm hareketleri durdurarak potansiyel riski en aza indirir. Bu mekanizmalar, sistem üzerindeki enerjiyi anında keserek güvenliği sağlar. Acil durumda operatör müdahalesi gerekebilir. Bu nedenle sistemler, operatörlere güvenli müdahale arayüzleri sunar. Bu arayüzler sayesinde operatörler, acil durdurma sonrasında sistemi güvenli bir şekilde yeniden başlatabilir. Güvenli iletişim protokolleri kullanarak operatörlerle ve diğer sistem-

lerle etkileşimde bulunulur. Bu protokoller, veri bütünlüğünü korur ve sistemler arası güvenli iletişimi sağlar. Operatörlerin doğru ve etkili bir şekilde tepki verebilmesi için eğitim ve simülasyon araçları önemlidir. Pnömatik manipülasyon sistemleri, kullanıcılarına tehlikeli durumlarla başa çıkma becerilerini geliştirmeleri için interaktif eğitim ve simülasyon imkanları sunar.

5.3. Ergonomik Avantajlar

Pnömatik manipülasyon sistemleri, endüstriyel süreçlerde iş gücü azaltmanın yanı sıra ergonomik avantajlar sunarak çalışanların iş verimliliğini ve iş güvenliğini artırır. Bu avantajlar hem operatörlerin çalışma koşullarını iyileştirme hem de uzun vadeli sağlık etkilerini en aza indirme potansiyeline sahiptir.

Yüksek hassasiyetli hareket kontrolü sağlanarak, operatörlerin manipülasyon işlemlerini daha doğru ve hassas bir şekilde gerçekleştirmelerine olanak tanınır. Hassas kontrol, endüstriyel süreçlerde hata oranını düşürür ve kaliteyi artırır. Operatörlerle iş birliği yapabilme yeteneğiyle, doğrudan etkileşimde bulunarak daha karmaşık görevleri gerçekleştirilmesi sağlanır. İş birliği içinde çalışmayla operasyonel esneklik artırılmış olur. Çalışanlar için sürekli aynı monoton işlerin yapılması uzun vadede sorunlar teşkil etmektedir. Tekrarlayan ve monoton işleri gerçekleştirmekten kaynaklanan kas ve eklem yorgunluğu otomatize edilmiş pnömatik manipülatörler kullanılarak büyük oranda azaltılır. Ayrıca, operatörlerin sürekli aynı hareketleri yapmaktan kaynaklı oluşabilecek yorgunluk ve stres azalır, bu da uzun vadeli sağlık avantajları sağlar.

Ergonomik tasarım prensiplerine uygun olarak geliştirilen pnömatik manipülasyon sistemleri, operatörlerin sistemle etkileşimini kolaylaştırır (Van Damme, Daerden, & Lefeber, 2005). Bu şekildeki bir ergonomik tasarım, işçi konforunu artırır ve olası kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarını önler. Otomatik pnömatik manipülasyon, operatörleri potansiyel tehlikelerden korumasıyla ön plana çıkmaktadır. Tehlikeli veya zorlu ortamlarda çalışma ihtiyacının azalmasıyla iş güvenliği artırılmış olur. Operatörlerin manuel müdahalesi gerekmeyen otomatize sistemler, güvenli bir çalışma ortamı sağlar. Operatörlere hızlı bir şekilde eğitim alma ve sistemle etkileşime geçme olanağı sunar. Kolay entegrasyon, iş süreçlerinin hızla iyileştirilmesine ve yeni teknolojilere geçişe olanak tanır.

6. Endüstriyel Uygulamalarda Pnömatik Manipülasyon

Pnömatik manipülasyon sistemleri, çeşitli endüstriyel uygulamalarda geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Bu sistemler, iş süreçlerini optimize etme, maliyetleri düşürme ve üretim verimliliğini artırma konularında önemli avantajlar sunar. Endüstriyel uygulamalarda pnömatik manipülasyonun kullanımına bazı örnekleri şu şekilde sıralanabilir:

6.1. Üretim ve Montaj Hattı

Pnömatik manipülatörler, üretim hatlarında otomatik montaj ve manipülasyon işlemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Parça taşıma, yerleştirme ve montaj süreçlerinde hızlı ve hassas işlemler pnömatik manipülatörler sayesinde kolaylıkla gerçekleştirilebilmektedir. Şekil 3'te montaj hattında yapılan ürünlerin taşınmasıyla ilgili özel

manipülatör fikstür tasarımları gösterilmektedir. Şekil 3'te soldaki resimde özel olarak tasarlanmış elektromıknatıs fikstür pnömatik manipülatöre akuple edilmiştir. Bu sayede metal malzemeler tek bir operatör tarafından kolaylıkla taşınabilmektedir. Bu üretim ve montaj hatları için özel olarak tasarlanmış manipülatör ile üretim hattının hızlanması ve verimliliğin artırılması sağlanmaktadır. Şekil 3'te sağdaki üründe ise kreyn mantığı kullanılarak geniş bir alanda yük taşıması gerçekleştirilebilmektedir.



Şekil 3. Montaj hattı özel fikstürler.

6.2. Ambalaj Endüstrisi

Pnömatik manipülasyon sistemleri, otomatik paketleme ve paletleme uygulamalarında etkili bir şekilde kullanılır. Ürünlerin düzenlenmesi, paketlenmesi ve paletlenmesi süreçlerinde manipülasyonun otomatikleştirilmesi, üretim hızını önemli ölçüde artırmaktadır. Şekil 4'te ambalaj endüstrisinde kullanılan özel manipülatör örneği görülmektedir. Bu örnekte ürünün konumu farklı 90° aralıklarla farklı konumlandırılarak yerleştirme işlemi yapılabilmektedir.



Şekil 4. Ambalaj sektörüne özel manipülatör.

6.3. Otomotiv Endüstrisi

Otomotiv montaj hatlarında, pnömatik manipülasyon sistemleri parça yerleştirme, vida sıkma, kaynak uygulamaları gibi bir dizi görevlerde kullanılarak üretim süreçlerinin optimize edilmesi ve kalitenin artırılması sağlanır. Otomotiv sektöründe yapılan üretimin veya montaj yapılan tüm ürünler için özel tasarım manipülatör kullanımı mevcuttur. Şekil 5'te otomotiv endüstrisinde bir örnek olarak araba jantının özel bir fikstür tasarımıyla taşınması gösterilmektedir. Montaj hattında araç lastiği, camı, kapısı, motoru gibi tüm parçalar için ayrı ayrı tasarım yapılması mümkün olmaktadır. Bu şekilde, her bir mamul için özel tasarım fikstürler tasarlanarak pnömatik manipülatörle hızlı ve güvenli bir şekilde taşınması sağlanmaktadır.



Şekil 5. Otomotiv sektöründe kullanılan manipülatör fikstür.

Otomotiv sektöründe pnömatik manipülatörler geniş bir şekilde kullanılarak üretim süreçlerinin optimizasyonu ve verimliliği artırılmaktadır. Bu sektörde mamulün taşınması, düzenlenmesi, üretim bandına bırakılıp ya da kaldırılması, sevkiyat ya da depo alanında yüklerin taşınması gibi birçok işlem pnömatik manipülatörlerle kolaylıkla gerçekleştirmektedir. Şekil 6'da otomotiv sektörüne ait parçaların özel fikstür yardımıyla pnömatik manipülatörlerle taşınmasına örnekler gösterilmektedir.



Şekil 6. Otomotiv endüstrisi uygulamaları.

Otomotiv üretim hatlarında, pnömatik manipülasyon sistemleri parça taşıma ve montaj işlemlerinde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu sistemler, otomobil parçalarını hızlı ve hassas bir şekilde taşıyarak montaj hattındaki iş süreçlerini optimize eder. Üretimi yapılan ya da yapılacak olan ürünlerin taşınmasıyla ilgili Şekil 7'de fikstür tasarımı gösterilmektedir. Bu şekildeki tasarımlarla parçanın taşınması ve üretim bandının hızlanması ve iş gücünün azalmasına çok büyük etkisi olmaktadır.



Şekil 76. Pnömatik manipülatörle parça taşıma.

Pnömatik manipülasyon, otomobil parçalarının vida sıkma ve kaynak gibi işlemlerinde de kullanılabilmektedir. Otomatik vida sıkma makineleri ve pnömatik kaynak manipülatörleri, montaj hatlarında güvenilir bir şekilde işlemleri gerçekleştirir. Otomobil parçalarının boyanması ve kaplanması sırasında pnömatik manipülasyon, parçaların taşınması ve doğru bir şekilde pozisyonlandırılmasında kullanılarak boya ve kaplama işlemlerinin daha hassas ve verimli olması sağlanır. Otomobil parçalarının kalite kontrolünde, otomatik test ekipmanları, pnömatik kontrollerle parçaların ölçümünü yapar ve kalite standartlarına uygunluğunu test eder. Otomobil lastiklerinin montajı ve dengeleme işlemlerinde pnömatik manipülasyon, lastik değişim makineleri ve

dengeleme ekipmanlarıyla entegre edilerek lastik montajının hızlı ve doğru bir şekilde gerçekleştirilmesi sağlanır.

Pnömatik manipülasyon sistemleri, otomotiv üretim hatlarında esneklik sağlar. Çeşitli otomobil modellerine uyumlu olarak kullanılabilen bu sistemler, üretim hattında değişikliklere hızlı bir şekilde uyum sağlayabilir. Otomotiv üretiminde, pnömatik manipülasyon sistemleri hijyen standartlarına uygun olarak tasarlanabilir. Ayrıca, otomatikleştirilmiş işlemler sayesinde işçi güvenliğini artırır ve tehlikeli görevlerden insanları uzak tutar.

6.4. Elektronik Üretiminde

Elektronik endüstrisinde, hassas parça manipülasyonu büyük önem taşır. Pnömatik manipülasyon sistemleri, bütünleşmiş devre yerleştirme, lehimleme ve test süreçlerinde kullanılarak üretim verimliliğini artırır. Şekil 8'de elektronik endüstrisinde pnömatik manipülatör kullanım örnekleri sunulmaktadır.



Şekil 8. Elektronik endüstrisünde manipülatör örnekleri.

6.5. Gıda ve İlaç Endüstrisinde Hijyenik Uygulamalar

Pnömatik manipülasyon, gıda ve ilaç endüstrilerinde hijyenik koşullar altında güvenli bir şekilde kullanılabilir. Gıda paketleme, sıvı dolum ve ilaç üretiminde manipülasyon sistemleri, ürün kalitesini ve güvenliğini sağlar. Gıda ve ilaçlama endüstrisinde paketleme, ambalajlama ve ürün koruma çok önemlidir. Ürün ambalajlarının taşınmasıyla ilgili fikstür örneği Şekil 9'da gösterilmektedir.



Şekil 9. Pnömatik manipülatörle ambalaj taşınması.

6.6. Lojistik ve Dağıtım Merkezlerinde Kargo Taşıma

Lojistik ve dağıtım merkezlerinde, pnömatik manipülasyon sistemleri, kargo taşıma, depolama ve paletleme işlemlerinde kullanılarak malzeme hareketliliğini optimize edilmesi ve lojistik süreçlerinin hızlandırılması sağlanır. Lojistik firmaları için zaman büyük bir önem arz etmektedir. Bu durum özel tasarım fikstürlü manipülatörler kullanılarak hızlı bir şekilde gerçekleştirilen işlemlerle zamandan büyük bir kazanç sağlanmaktadır. Yük taşıma, yük kaldırma, yük istifleme ve diğer tüm işlemlerin yapılması tek operatörle bile mümkün olabilmektedir. Bu durumun firmaya önemli katkılar sunacağı aşikardır. Şekil 8'de lojistik endüstrisinde düzenin ve yükün kaldırılması için tasarlanmış manipülatör örnekleri sunulmuştur.



Şekil 10. Lojistik endüstrisinde manipülatör örnekleri.

6.7. İnşaat ve Montaj Süreçlerindeki Uygulamalar

İnşaat ve montaj süreçleri, pnömatik manipülasyonun etkili bir şekilde kullanıldığı çeşitli uygulama alanlarına sahiptir. İnşaat sahasında büyük ve ağır yapı elemanlarının taşınması, pnömatik manipülasyon sistemleri kullanılarak daha güvenli ve verimli bir hale getirilerek yapı elemanları yüksek yerlere taşınabilir ve hassas bir şekilde konumlandırabilir. İnşaat projelerinde, büyük yapı elemanlarının montajı önemli bir aşamadır. Montaj süreçleri pnömatik manipülatörlerle hızlandırılır ve yapı elemanları doğru bir şekilde birleştirilerek kalite artırılır.

İnşaat sahalarında vinç ve kaldırma ekipmanları, pnömatik manipülasyonun önemli bir parçasıdır. Pnömatik kontrol sistemleri, yüksek güvenlik standartlarına uygun olarak tasarlanan bu ekipmanların kontrolünü sağlar. İnşaat projelerinde kullanılan demir çubukların bükülmesi ve şekillendirilmesi işlemleri, pnömatik manipülasyon sistemleri ile otomatikleştirilebilir. Böylece, demir çubukların hızlı ve hassas bir şekilde şekillendirilmesi sağlanır. İnşaat sahasında kullanılan malzemelerin taşınması ve depolanması, pnömatik taşıma sistemleri ile kolay bir şekilde yapılabilmektedir.

Pnömatik manipülasyon, inşaat sahasında güvenli çalışma ortamları oluşturmak için kullanılabilmektedir. Otomatikleştirilmiş ekipmanlar, işçileri potansiyel tehlikelerden koruyarak güvenlik standartlarına uygunluk artırılmış olur. İnşaat projelerindeki hassas montaj işlemleri, pnömatik manipülasyonun kullanımıyla daha kontrol edilebilir hale gelir. Pnömatik sistemler, yapı elemanlarını milimetre hassasiyetinde yerleştirilmesini sağlayabilmektedir.

6.8. Depolama ve Lojistikteki Rolü

Pnömatik manipülasyon sistemleri, depolama ve lojistik alanında çeşitli uygulamalarla iş süreçlerini optimize etme potansiyeli taşır. Pnömatik manipülasyon, depolama sistemlerinde otomatizasyonu destekleyerek ürün yerleştirme ve çıkarma süreçlerini hızlandırır. Otomatik depolama sistemleri, pnömatik kollar aracılığıyla ürünleri hassas bir şekilde taşıyarak depolama alanının maksimum verimlilikle kullanılması sağlanır.

Depolama tesislerinde, ürünlerin paketlenmesi ve sıralanması süreçleri pnömatik manipülasyon ile optimize edilebilmektedir. Pnömatik kavrama sistemleri, ürünleri güvenli bir şekilde kavrayarak hızlı paketleme ve sıralama işlemlerine olanak tanır. Pnömatik sistemler, depo içindeki ürünlerin taşınması ve yerleştirilmesi sırasında stok yönetimi ve envanter kontrol süreçlerini destekleyerek depo yöneticilerine gerçek zamanlı verilere erişim sağlayarak daha etkili kararlar almalarını sağlar.

Lojistik merkezlerinde, pnömatik manipülasyon sistemleri yardımıyla kargo taşıma ve yükleme işlemleri optimize edi-

lebilerek ürünlerin hızlı bir şekilde yer değiştirmesi sağlanır. Pnömatik manipülasyon, depolama ve lojistikte güvenli malzeme taşıma sağlar. Otomatik kavrama sistemleri, ürünleri doğru bir şekilde kavrayarak düşme riskini en aza indirir ve iş güvenliğini artırır.

Pnömatik sistemler, depolama alanlarının yeniden düzenlenmesini kolaylaştırarak esnek depolama çözümleri sunabilir. Bu, depo düzeninin değişen ihtiyaçlara göre adapte edilebilmesini sağlar.

Pnömatik manipülasyon, ürünlerin hızlı ve doğru bir şekilde dağıtılmasını destekler. Bu, lojistik süreçlerinde zaman ve işgücü tasarrufu sağlar.

7. Gelecekteki Gelişmeler ve Beklentiler

Pnömatik manipülasyonun endüstriyel süreçlerdeki etkisi sürekli olarak gelişmekte ve gelecekte daha da önemli bir rol oynaması beklenmektedir. Gelecekte, pnömatik manipülasyon sistemleri akıllı sensör teknolojileri ile entegre edilerek sistemlerin çevresel koşulları daha iyi algılamasına ve uyarlamasına olanak tanıyarak daha hassas ve verimli operasyonları mümkün kılacaktır.

Pnömatik manipülasyonun kontrol sistemleri, yapay zekâ algoritmaları ile desteklenecek. Bu sayede, sistemler daha karmaşık görevleri öğrenip optimize edebilecek ve sürekli olarak iyileşen performans sergileyecek. Gelecekteki pnömatik manipülasyon sistemleri, daha fazla görevi yerine getirebilmek için esnek ve çok yönlü olarak değişen endüstriyel ihtiyaçlara hızla uyum sağlayabilen manipülasyon çö-

zümleri sunacaktır. Bu sistemler enerji verimliliği odaklı tasarımlarla gelecekte daha sürdürülebilir hale gelecek. Daha az enerji tüketimi, çevresel etkiyi azaltacak ve işletme maliyetlerini düşürecektir.

Gelecekteki pnömatik manipülasyon sistemleri, insanlarla daha yakın iş birliği yapabilen ve güvenli bir şekilde aynı çalışma ortamını paylaşabilen tasarımlarla endüstriyel süreçlerde daha etkili ve esnek bir işgücü yönetimini mümkün kılacaktır. Şekil 11'de insan makine iş birliğinin önemini gösteren bir örnek sunulmuştur.



Şekil 7. İnsan makine iş birliği.

7.1 Endüstri 4.0 ve Yapay Zekâ

Endüstri 4.0'ın evrimi, pnömatik manipülasyon sistemlerinin işlevselliğini ve önemini radikal bir şekilde dönüştürmüştür. Bu dönüşüm, endüstriyel süreçlerin verimliliğini, esnekliğini ve otomasyon seviyesini artırarak üretim ve dağıtım süreçlerini kökten değiştirmektedir. Pnömatik manipülasyon sistemlerinin Endüstri 4.0 prensipleriyle daha derin bir entegrasyonu, sanayide gerçek zamanlı veri analizi, otomasyon ve dijitalleşme gibi unsurların hayata geçirilmesini sağlar. Bu entegrasyon, fabrika sistemlerini

daha akıllı ve bağlantılı hale getirerek, üretim süreçlerinin daha hızlı, daha doğru ve daha verimli bir şekilde gerçekleşmesine olanak tanır.

Yapay zekâ ile pnömatik manipülasyonun birleşimi, endüstriyel süreçlerdeki verimliliği ve otomasyon seviyesini önemli ölçüde artırır. Bu entegrasyon, yapay zekânın pnömatik manipülasyon sistemlerini daha akıllı ve adaptif hale getirmesini sağlar. Yapay zekâ algoritmaları, çeşitli sensörlerden gelen verileri analiz ederek sistemlerin çevresel değişikliklere hızla tepki vermesini ve iş süreçlerini optimize etmesini sağlar. Ayrıca, yapay zekâ entegrasyonu, pnömatik manipülasyon sistemlerini insanlarla daha etkili bir şekilde etkileşim kurabilen ve iş birliği yapabilen araçlar haline getirir. Bu da endüstriyel süreçlerde daha esnek ve adaptif bir işgücü yönetimini mümkün kılar. İnsanların, işyerindeki makinelere daha kolay entegre olmasını sağlar ve süreçlerin daha verimli bir şekilde yönetilmesine olanak tanır.

Akıllı fabrikaların yükselişi, pnömatik manipülasyon sistemlerinin rolünü daha da önemli hale getirmiştir. Endüstri 4.0'ın ana prensipleri olan bağlantı, veri paylaşımı, çevik üretim ve otomatik optimizasyon gibi ilkeler, pnömatik manipülasyon sistemlerinin gelişimine ve entegrasyonuna büyük katkı sağlar. Bu prensipler, pnömatik manipülasyonun işlevselliğini ve verimliliğini artırarak endüstriyel süreçlerin daha akıllı hale gelmesini sağlar. Akıllı fabrikaların, sensörler, veri analitiği ve otomatik kontrol sistemleri gibi teknolojilerle entegre edilmesi, üretim süreçlerini optimize etme yeteneğini artırır. Pnömatik manipülasyonun,

akıllı fabrikaların genel yapısına nasıl entegre edildiği ve bu entegrasyonun üretim süreçlerine nasıl katkı sağladığı önemli bir konudur. Bu entegrasyon sayesinde fabrikalar, üretim süreçlerini daha verimli, esnek ve adaptif hale getirerek rekabet avantajı elde ederler.

Endüstri 4.0'ın bir parçası olarak ortaya çıkan dijital çiftlik kavramı da pnömatik manipülasyon sistemlerinin gelişiminde önemli bir rol oynamaktadır. Bu kavram, pnömatik manipülasyonun çalışma süreçlerini dijital olarak modelleyerek verimliliği artırır ve üretim süreçlerini optimize eder. Ayrıca, pnömatik manipülasyonun akıllı sensörler ve veri analitiği ile entegre edilmesi, gerçek zamanlı verilerin toplanması, analiz edilmesi ve üretim süreçlerinin iyileştirilmesine olanak tanır. Sonuç olarak, Endüstri 4.0 ve akıllı fabrikaların yükselişi, pnömatik manipülasyon sistemlerinin önemini artırarak endüstriyel süreçleri daha akıllı, esnek ve verimli hale getirir. Bu sayede, işletmeler rekabet avantajı elde eder ve müşteri taleplerine daha hızlı yanıt verebilirler.

KAYNAKLAR

Ali, H. I., Noor, S. B. B. M., Bashi, S. M., & Marhaban, M. H. (2009). A review of pneumatic actuators (modeling and control). Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 3(2), 440–454.

Cugno, M., Castagnoli, R., & Büchi, G. (2021). Openness to Industry 4.0 and performance: The impact of barriers and incentives. Technological Forecasting and Social Change, 168, 120756. https://doi .org/10.1016/J. TECHFORE.2021.120756

Soori, M., Arezoo, B., & Dastres, R. (2023). Internet of things for smart factories in industry 4.0, a review. Internet of Things and Cyber-Physical Systems, 3, 192–204. https://doi.org/10.1016/J.IOTCPS.2023.04.006

Van Damme, M., Daerden, F., & Lefeber, D. (2005). A pneumatic manipulator used in direct contact with an operator. Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2005, 4494–4499. https://doi.org/10.1109/ROBOT.2005.1570812

Yi Han, C. (2022). Desıgn Of An End Effector For A Manıpulator Wıth Loadıng And Unloadıng Mechanısms.

4. BÖLÜM

CFD INVESTIGATION OF THE THERMAL EFFECT OF MATERIAL VARIATION ON THE EXHAUST MANIFOLD

Haydar KEPEKÇİ[1]
Mehmet Emin AGCA[2]

[1]Mechatronic Engineering Department, Engineering-Architecture Faculty, Istanbul Gelisim University, Turkey,
Orcid No: 0000-0002-0037-8332
[2] Mechanical Engineering Department, Engineering-Architecture Faculty, Istanbul University-Cerrahpasa, Turkey.
Orcid No: 0000-0002-8995-2133

Abstract

The exhaust manifold collects the combustion gases coming out of the combustion chamber in internal combustion engines and directs them to the exhaust system. The main function of the exhaust manifold is to combine the exhaust gases from each cylinder of the engine at a single point and transmit them through the exhaust system. Exhaust manifolds are manufactured from heat-resistant materials because they are often exposed to high temperatures and thermal stresses. In this study, an exhaust manifold was designed to provide the flow of air-fuel mixture coming from three parallelly positioned combustion chambers, suitable for use in 6-cylinder engines, and thermal analyses were carried out using the computational fluid dynamics method for different materials. The materials used were selected as stainless steel, gray cast iron, Al_2O_3 ceramic material, and 1020 carbon steel. The results obtained from the analyses were compared among themselves. As a result, it has been determined that the exhaust manifold made of Al_2O_3 ceramic material is better than others in terms of thermal performance. It has been observed that gray cast iron is the worst exhaust manifold material in terms of thermal performance. As a result of the heat transfer between the gas coming out of the combustion chamber and the manifold at 300 °C, the minimum temperature value in the manifold produced from gray cast iron was 267.63 °C, while this value was calculated as 214.96 °C in the Al_2O_3 ceramic manifold.

Keywords: Exhaust manifold, Thermal flow analysis, Temperature profile, Computational fluid dynamics.

1. Introduction

The exhaust system is a system that collects, directs, and discharges exhaust gases resulting from combustion in internal combustion engine vehicles. The exhaust system is an important component that affects engine performance, fuel efficiency, emission control, and ride comfort [1]. The exhaust system also plays an important role in controlling harmful gases such as carbon monoxide and nitrogen oxide formed as a result of combustion [2]. The design and components of the exhaust system include technologies used to filter or reduce these harmful emissions. The function of the exhaust manifold is to collect the exhaust gases from each cylinder and combine them at a single point. The exhaust manifold plays an important role in the exhaust system [3]. Thanks to the exhaust manifold, the flow of exhaust gases occurs more regularly and effectively. Thus, the performance of the engine increases. The design and size of the manifold are important parameters in directing the gas flow. In optimized manifolds, exhaust gases are evacuated faster, and engine power increases. The thermal performance of the exhaust manifold is vital for the efficient operation of the engine and the minimization of energy losses [4].

The main function of the manifold is to manage the high-temperature exhaust gases leaving the combustion chamber. These gases come out of each cylinder of the engine and combine in the manifold. The manifold performs several important tasks to minimize the energy loss of high-temperature exhaust gases and increase the performance of the engine [5]. One of the duties of the exhaust manifold is to

provide heat management. Exhaust gases resulting from the combustion process can have very high temperatures, and this unwanted heat damages the internal structure of the components it comes into contact with. What is expected from the manifold material is to effectively distribute this high temperature. Thus, the life of the exhaust manifold will be extended [6]. Additionally, the exhaust manifold controls the heat dissipated to other components in the engine area. The manifold keeps the temperature of the exhaust gases as much as possible, preventing other parts of the engine from overheating. In addition, the insulating properties of the manifold minimize the spread of exhaust gases and heat transfer in the engine area. This improves the overall thermal management of the engine and maintains performance [7]. Exhaust manifolds emerged with internal combustion engines and have undergone significant changes throughout history. Their first use was manifolds consisting of simple pipe structures. Later, with advances in materials and design technologies, manifolds became more complex and optimized for increased performance. As emission regulations gained importance, manifolds were further developed and various features were added to control the flow of exhaust gases and emissions. In recent years, manifolds have been further optimized using advanced material technologies and computer-aided design methods. Today, exhaust manifolds are considered an important component in internal combustion engines in terms of performance, emissions control, and fuel efficiency. Manifolds designed using advanced manufacturing techniques and simulation methods are optimized to minimize energy losses while increasing the

power of the engines. Additionally, different designs and technologies are being developed for the engines used in hybrid vehicles [8]. There are many studies on exhaust manifolds in the literature.

In the study conducted by Kumar and Reddy using the CFD method, the thermal distributions of gases coming out of the combustion chamber at 600 °C in exhaust manifolds made of different materials were examined and compared. In this study, aluminum, titanium, and zirconium were used as manifold materials. As a result, the minimum temperature value was obtained from the manifold made of zirconium material and this value was measured as 563.92 °C [9]. In their study, Chandan and Imran carried out the thermal examination of the multi-cylinder exhaust manifold using the CFD method using different materials. In their studies using gray cast iron, stainless steel, and carbon steel, they found that stainless steel had better temperature distribution than other materials [10]. In his work, Lucic designed manifolds for Formula student vehicles and performed airflow analyses using the CFD method. He designed three different manifolds within the scope of his 3D work. The difference between these manifolds is their geometry. The one consisting of cylindrical pipes of equal length connected to the main pipe under the same radius is called A manifold, the one consisting of cylindrical pipes of different lengths connected to the main pipe at the same radius is called B, and the classical design is called C manifold. As a result, it was determined that the airflow rates in manifolds A and B were close to each other and were better than manifold C. He also found that the pressure values to which

manifolds A and B are exposed are close to each other [11]. In their study, Manohar and Krishnaraj aimed to make revisions in the geometry by performing thermal analyses of exhaust manifolds operating at different materials and temperatures. They have aimed to produce the most reliable and useful manifold. They used stainless steel and gray cast iron as manifold materials in their studies. As a result, they saw that the use of curved profiles increased turbulence and decided to reduce the curves in their design. They also found that stainless steel had better thermal properties than gray cast iron [12]. In their study, Anand and Vellingiri calculated the thermal stress and deviations that the mixtures in the combustion chambers would enter into the exhaust manifold at 800 °C and 500 kPa pressure. They used two different materials in their work. These were chosen as aluminum and gray cast iron. As a result, they found that gray cast iron created less thermal stress during loading conditions on the manifold [13]. Cihan and Bulut proposed two different exhaust manifolds that can be used for high-performance vehicles and created their solid models with the CAM program. There are geometric differences between the manifolds they use in their studies. In manifold A, the inlet pipes of the combustion gases are connected to the main pipe at different points, while in manifold B, the inlet pipes are connected to the main pipe at the same point. Subsequently, they performed analyses using three different fluids for each manifold using the CFD program. The fluids they used were gasoline, alcohol, and LPG. All fluids entered the manifold at a temperature of 300 C and a speed of

20 m/s. There is no difference between the boundary conditions of the analyses performed. As a result of the analyses, they measured the pressure and temperature values at different points of the manifolds and compared them. As a result, they found that the combustion gases obtained from the use of gasoline as fuel move at lower pressure and speed than other fluids. They also observed that the pressure in the type A manifold decreased as the speed increased towards the exhaust outlet. They determined that the ideal manifold for the high performance of the engine is type A [14]. Nichal and Umale examined the effect of geometric dimensions of manifolds on the efficiency of automobile engines using numerical methods. In their studies using CFD, they calculated pressure, velocity, and temperature values at various points of the manifold and made comments based on the data they found. The manifold geometry they used in their study has four inlet holes that are directly connected to the combustion chamber. There is a single exit from the pipe where all four inlets meet to the exhaust. The only difference between the two different models they used to examine the geometric effect in their studies was the distance of the main pipe. As a result, they found that shortening the main pipe benefits engine performance [15].

Within the scope of this study, thermal analyses were carried out using the computational fluids method for the exhaust manifold produced from four different materials. The temperature of the air-fuel mixture leaving the combustion chamber and entering the manifold is assumed to be 300 ^{o}C. The materials used in the study were selected as stainless steel, gray cast iron, ceramic, and 1020 carbon

steel. The boundary conditions of the study were taken from the literature. Considering the thermal distribution in exhaust manifolds, it has been determined that ceramic materials are better than others.

2. Material and Method

2.1 Manifold Design

In the design of the exhaust manifold, it is important to ensure the free flow of gases. A low resistance design helps exhaust gases exit the engine cylinders effectively and improves engine performance. The exhaust manifold must ensure the management of exhaust gases operating under high temperatures. The design must ensure that exhaust gases move quickly through the exhaust system and cool down when necessary. It is also important that the exhaust manifold does not compromise the temperature of nearby components. For this study, an exhaust manifold was designed using a CAD program to ensure the flow of air-fuel mixture coming from 3 parallelly positioned combustion chambers, suitable for use in 6-cylinder V6 engines. The dimensions and three-dimensional version of the designed manifold are given in Fig. 1.

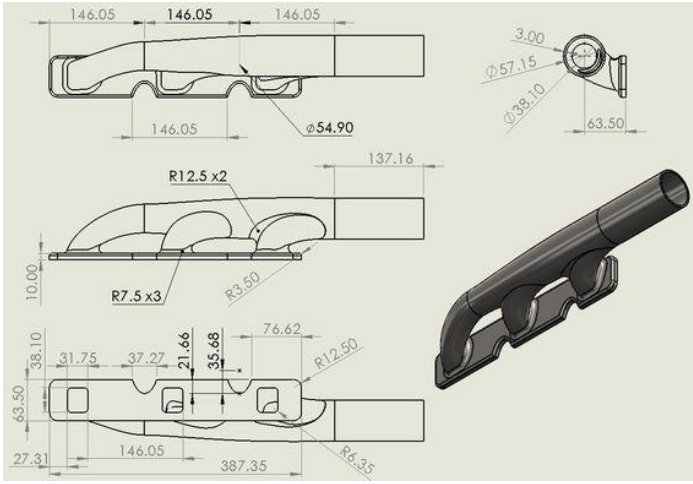


Fig. 1. *Technical view and dimensions of exhaust manifold*

2.2. Meshing

The mesh structure created for finite element analysis (FEA) is an important factor that determines the accuracy and sensitivity of the analysis. A quality mesh structure allows finite element analysis results to be more accurate and reliable. In the analyses carried out within the scope of this study, a mesh file with a grid number of 6,572,260 consisting of hexagonal and triangular elements of 1 mm size was used. The domain view of the created mesh file is given in Fig. 2.

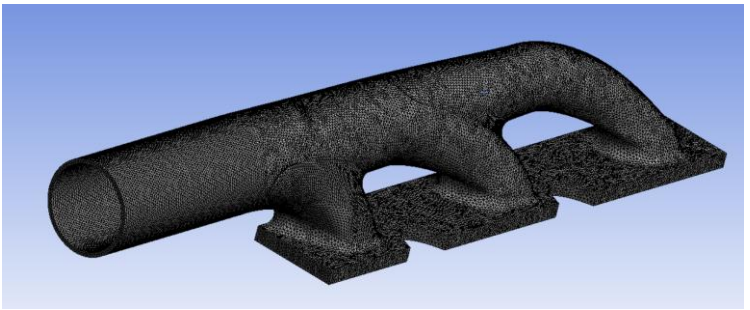


Fig. 2. *General view of the mesh file*

The grid number of the mesh file to be used in any analysis is not created randomly. The ideal number of elements is reached by making certain calculations. This process is called mesh dependence. There are different methods of mesh dependence. One of these is to calculate orthogonal quality and skewness [16]. Graphs are created by calculating the relevant values of each mesh element. Mesh quality can be understood by looking at the obtained graphics.

Orthogonal quality refers to the measure of geometric accuracy and evenness between the elements of a mesh network. High orthogonal quality means that the elements are better aligned and connected properly. This makes the analysis results more accurate and reliable. A low-quality mesh network may lead to inaccurate results and erroneous predictions. Maximum values close to 1 also indicate high orthogonal quality and mean that the surfaces of the elements are connected at close 90-degree angles. This is important to obtain more accurate results and ensures that the

analysis results are more sensitive and reliable. The orthogonal quality values of the mesh network structure created for the analysis of the exhaust manifold in the study are on average 0.9. Orthogonal quality values are shown in detail in Figure 3. This average value indicates that the mesh network structure is suitable for analysis after orthogonal examination [17].

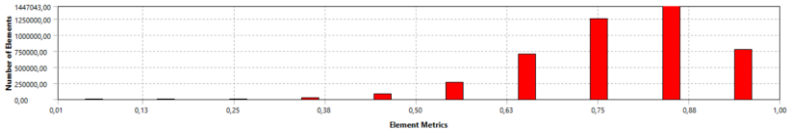


Fig. 3. Orthogonal quality of the mesh file

Skewness is a criterion that measures the curvature of the elements in the mesh structure used for finite element analysis. A large curvature means that the elements may be subject to high deformation. This may affect the accuracy and reliability of finite element analysis results. The skewness measure takes into account the angles between the edges of the element and the angular difference of the element's largest angle triangle. Skewness is usually a number between 0 and 1. A skewness closer to 0 provides better results. As the skewness measure approaches 1, the mesh quality decreases and is an undesirable situation [18]. The average skewness values of the mesh network structure created for the analysis of brake discs in the study is approximately 0.23. Skewness quality values are shown in detail in Figure 4. This average value indicates that the mesh network structure is suitable for analysis after skewness examination.

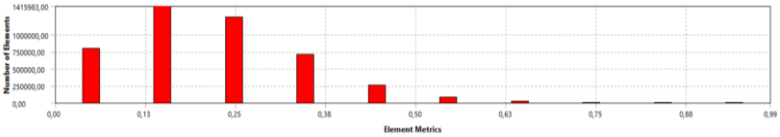


Fig. 4. *Skewness analysis of mesh file*

2.3. Manifold Materials

The manifold design, modeled using a CAD program, was subjected to thermal analysis using CFD software. Gray cast iron, stainless steel, ceramic, and 1020 steel were used as materials in these flow analyses. Gray cast iron is the most commonly used material in the production of exhaust manifolds. The main reasons why gray cast iron is preferred include its low cost and resistance to high pressure. Additionally, manufacturing with gray cast iron is much easier. Even complex parts can be easily manufactured with gray cast iron [19]. Stainless steel is more resistant to corrosion than gray cast iron, thanks to its chromium content. Therefore, it is common to use it in the production of components that must be in contact with gas fluid at all times. Therefore, it is frequently used in manifold materials [20]. 1020 steel is generally in the low-carbon steel category. It is a material suitable for hot rolling and pressing processes. Since it is a good machinable material, it is frequently used in parts to be shaped. Therefore, it is widely used in the production of chassis and body parts in the automotive industry. It is used as a manufacturing material for fasteners rather than main parts [21]. The term ceramic describes a broad category of materials. Thermal insulation materials and those used in industrial applications can also

be categorized as technical ceramics. The most commonly used technical ceramics are alumina (Al_2O_3) and zirconia (ZrO_2) [22]. In this study, alumina (Al_2O_3) was used as the ceramic material. Al_2O_3 is one of the hardest materials found in nature and therefore can be easily used in industrial applications. Since it is resistant to high temperatures and mechanical stress, it is also used in the inner coatings of industrial heat treatment furnaces. Al_2O_3 is a material that can also be used in the body of spacecraft, as it is a material that can withstand the high temperatures caused by the friction that occurs during the spacecraft's exit from the atmosphere [23]. Al_2O_3 is also used in various parts of automotive parts because it is resistant to wear. The thermal properties of the materials used are given in Table 1.

Table 1. *Thermophysical properties of materials*

Properties	**Grey Cast Iron**	**Stainless Steel**	**Steel 1020**	**Al_2O_3 Ceramic**
Density (kg/m^3)	7100	7750	7870	2700
Young's Modulus(Gpa)	125	190	190	69
Poisson's Ratio	0,25	0,3	0,29	0,33
Latent Heat of Fusion (kJ/kg)	270	260	250	620
Thermal Conductivity (W/m.k)	54,5	26	52	38,5
Specific Heat (J/kg.k)	585	500	470	955
Thermal Expension (10^{-6}/K)	11	9	11,7	22,2

2.4.CFD Modeling

After the modeled workpiece is subjected to mesh processing, boundary conditions are determined and subjected to CFD analysis. CFD (Computational Fluid Dynamics) analysis is the process of modeling the behavior of fluids using computer-based numerical analysis methods [24]. These analyses are used to solve mathematical equations to predict the velocity, pressure, temperature, density, and other properties of fluids. CFD analysis is a widely used tool in solving engineering problems and is used in many industries, especially those where fluid dynamics are important, such as automotive and aerospace. All kinds of studies that can be done with experimental methods can be done using CFD analysis. Its use is increasing day by day because it saves both time and money. In this study, the CFD method was used to examine the temperature distributions of exhaust manifolds. In this study, SST k-ω was used as the turbulence model. SST stands for "Shear Stress Transport" and this model successfully simulates shear stress transport in the surface boundary layer. Therefore, the SST k-ω model is preferred to accurately capture both the flow within the boundary layer and the free flow [25]. The SST k-ω model also performs well in flows with high-pressure gradients and is therefore widely used in regions with intense turbulence. This model uses a combination of k-epsilon and k-ω models depending on the value of the local Reynolds number. This combination provides accurate results on the wall surface while also accurately capturing the turbulence effect in free flow [26]. In this study, the burnt gas of LPG fuel was chosen as the fluid passing through the exhaust

manifold. The average temperature of the exhaust gas at the entrance to the manifold is assumed to be 300 °C and its speed is 20 m/s. Additionally, the outlet pressure was assumed to be zero in the initial state. The properties of the fluid used in the study are given in Table 2.

Table 2. *Material fluid properties used in analysis*

Material	LPG
Density (kg/m^3)	1.2631
Viscosity (Pa.s)	2.57x10^5
Specific heat (J/kg.K)	1138.4
Thermal conductivity (W/m.K)	0.025

The region where combustion gases enter the manifold is defined as an inlet, and the region where they exit is defined as an outlet. The definition of the model is shown in Figure 5.

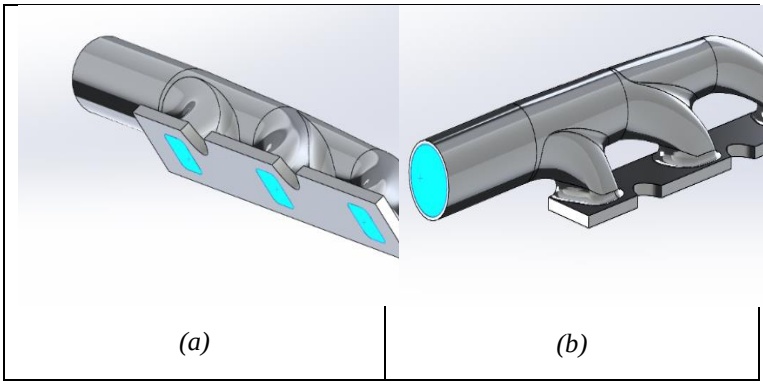


Fig. 5. *Boundary conditions of the exhaust manifold; a) inlet, b) outlet*

3. Results

The exhaust manifold, which was modeled in a 3D environment via the CAD program, was subjected to thermal flow analysis using the CFD program under defined boundary conditions, and the thermal states of the exhaust manifolds were examined using different materials. Exhaust manifolds are one of the most important components of exhaust systems in internal combustion engines and are exposed to high-pressure hot air coming out of the combustion chamber. High temperatures cause unwanted thermal deformations in exhaust manifolds. For this reason, exhaust manifolds must be manufactured to provide high-level thermal resistance at high temperatures. There are changes in the materials used in different situations to ensure the correct distribution of heat in manifold production. The results of the thermal flow analyses performed in this study were compared with each other and evaluated. Stainless steel, ceramics, gray cast iron, and nickel-chromium superalloy were used during thermal flow analyses. Thermal distributions according to materials are given in Fig. 6.

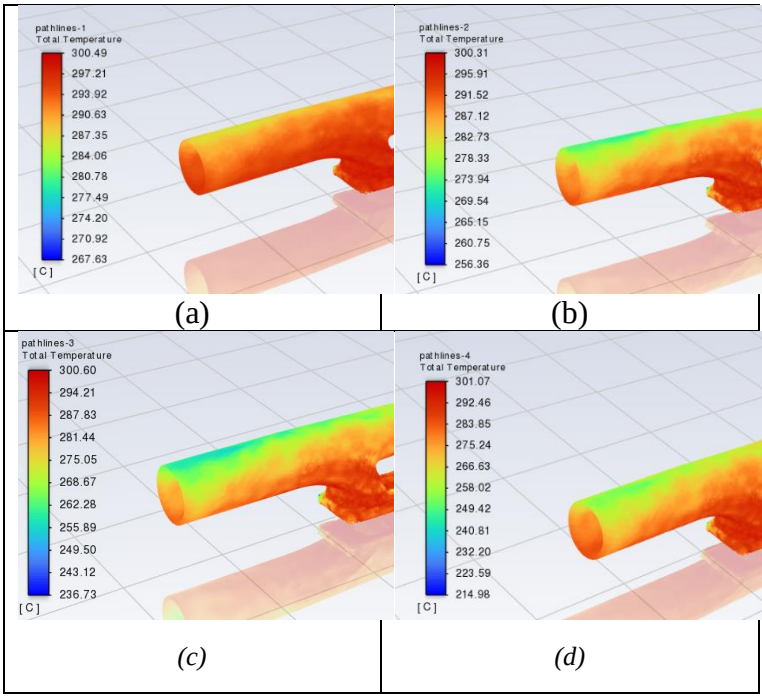


Fig. 6. *Manifold thermal distribution; a) gray cast iron, b) stainless steel, c) 1020 carbon steel, d) Al_2O_3 ceramic*

When the CFD analysis results were examined, the minimum temperature in the gray cast iron manifold design was measured as 267.63 °C, according to the convection calculations between the manifold and the fluid whose transfer was simulated from the combustion chamber to the exhaust manifold at 300 °C. This value is calculated as 256.36 °C for the exhaust manifold made of stainless steel. For manifolds made of 1020 carbon steel and Al_2O_3 ceramics, this value is calculated as 236.73 °C and 214.98 °C,

respectively. These results were obtained after 10,000 iterations. Comparisons of the values obtained from the analyses are given in Figure 7.

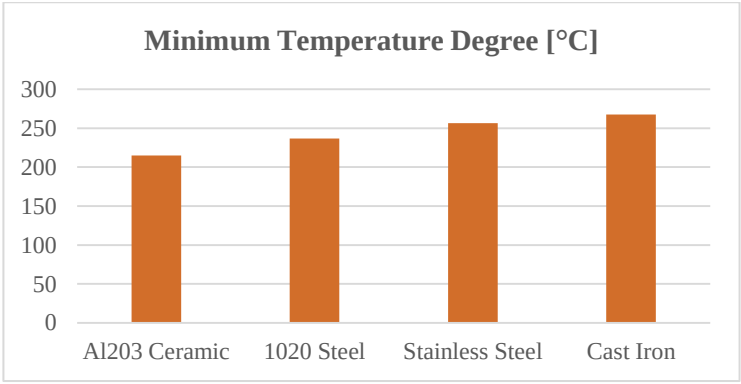


Fig. 7. *Comparison of minimum temperature values*

4. Conclusion

In this study, a three-dimensional exhaust manifold was modeled using a CAD program to compare the thermal performance parameters of materials commonly used in the production of exhaust manifolds in the automotive industry. Under the boundary conditions of 300 °C temperature and 20 m/s speed, the fluid entering the exhaust manifold from the combustion chamber was selected as LPG. The turbulence model of the study was determined as SST k-ω. As a result, the lowest temperature was obtained in the Al_2O_3 ceramic, while the highest temperature was observed in the manifold produced from gray cast iron material. Considering the driving safety of vehicles and the desire for long engine life, the use of Al_2O_3 ceramics has been recommended as an exhaust material.

References

[1] Chen, G., Hu, Y., Yan, S., Zhu, J., Yang, L., & Dong, Z. (2023). Failure analysis of a natural gas engine exhaust manifold. Engineering Failure Analysis, 154, 107660.

[2] Lorenzini, M., Barbieri, S., Mangeruga, H., & Giacopini, M. (2023). Development of an experimental/numerical validation methodology for the design of exhaust manifolds of high-performance internal combustion engines. Engineering Failure Analysis, 152, 107526.

[3] Galindo, J., Luján, J., Serrano, J., Dolz. V., & Guilain, S. (2004). Design of an exhaust manifolt to improve transient performance of a high-speed turbocharged diesel engine. Experimental thermal and fluid science, 28(8), 863-875.

[4] Kumar, K., Kalos, P., Akhtar, M., & Shaik, S. (2023). Experimental and theoretical analysis of exhaust manifold by uncoated and coated ceramics (Al_2O_3, TiO2, and ZrO2). Case Studies in Thermal Engineering, 50, 103465.

[5] Yaliwal, V., Banapurmath, N., Soudagar, M., Afzal, A., & Ahmadi, P. (2022). Effect of manifold and port injection of hydrogen and exhaust gas recirculation (EGR) in dairy scum biodiesel - low energy content gas-fueled CI engine operated on dual fuel mode. International Journal of Hydrogen Energy, 47, (10), 6873-6897.

[6] Jatana, G., Chuahy, F., Park, Y., Lobodin, V., DeBusk, M., & Szybist, J. (2023). Hydrocarbon and particulate matter evolution in the exhaust manifold of a spark-ignited engine under cold-start operation. Applications in Energy and Combustion Science, 16, 100200.

[7] Wang, Y., Gu, J., Yang, M., Zhang, K., Deng, K., & Qian, Y. (2022). Experimental and numerical study on the characteristics of a penetrating exhaust manifold for low-speed two-stroke marine diesel engine. Energy, 238, 121550.

[8] Dokumaci, E. (2005). Prediction of source characteristics of engine exhaust manifolts. Journal of sound and vibration, 280 (3), 925-943.

[9] Kumar, B., & Reddy, D. (2019). Modelling and Thermal Analysis of Exhaust Manifold of Multi Cylinder Engine Using Ansys. Journal of Emerging Technologies and Innovative Research, 6 (6), 591-596.

[10] Chandan, H., & Imran, K. (2017). Thermal and Modal Analysis of Engine Exhaust Manifold for Different Materials". International Journal of Engineering Research & Technology, 6 (11), 261-263.

[11] Lučić, M. (2023). Design and CFD simulation of the exhaust manifold of the Formula Student vehicle. International Scientific Journal Machines. Technologies. Materials, 17 (2), 54-57.

[12] Manohar, D., & Krishnaraj, J. (2018). Modeling and Analysis of Exhaust Manifold using CFD. Materials Science and Engineering, 455, 12132.

[13] Anand, D., & Vellingiri, S. (2020). Design and Analysis of Exhaust Manifold. International Research Journal of Multidisciplinary Technovation, 2 (6), 1-8.

[14] Cihan, Ö., & Bulut, M. (2019). CFD Analysis of Exhaust Manifold for Different Designs. European Mechanical Science, 3(4), 147-152.

[15] Nichal S., & Umale, S. (2021). CFD Analysis of Exhaust Manifold of SI Engine. International Research Journal of Engineering and Technology, 8 (10), 1514-1521.

[16] Niu, B., Ahmed, M., Wen, T., Xu, G., & Liu, X. (2023). Particle-resolved CFD modeling of the flow and heat transfer characteristics of the fluid in a fixed bed. Powder Technology, 421, 118445.

[17] Jeon, R., Kim, S., Ko, K., Kwon, K., Park, M., Seo, I., Oh, M., & Lee, C. (2023). Advanced cartridge design for a gas respiratory protection system using experiments, CFD simulation, and virtual reality. Journal of Cleaner Production, 426, 139101, 2023.

[18] Chong, Y., Liang, Y., & Weihs, G. (2023). Validation and characterization of mass transfer of 3D-CFD model for twisted feed spacer. Desalination, 554, 116516.

[19] Teng, X., Pang, J., Liu, F., Zou, C., Gao, C., Li, S., & Zhang, Z. (2023). Fatigue strength optimization of gray cast iron processed by different austempering temperatures. International Journal of Fatigue, 175, 107831.

[20] Tian-xiong, Z., Yi-du, B., Yuan-qing, W., Zhi-hua, C., Shuai, D., & Wei, H. (2024). Experimental study on the mechanical properties of stainless steel high strength short tail swage-locking pins. Structures, 59, 105583, 2024.

[21] Kumar, S., & Singh, A. (2024). Characterization of surface properties of TiC ceramic coating developed on AISI 1020 steel. Surfaces and Interfaces, 46, 103960.

[22] Chang, C., Liu, Y., Guo, W., Long, Y., Duan, X., Jia, D., & Lin, H. (2024). Effect of Al_2O_3-CeO_2 molar ratio on mechanical properties of SiC ceramics. Ceramics International, 50 (3), 5032-5037.

[23] Ren, Y., Zhang, B., Zhong, Z., Ye, J., Zhang, J., Fang, Z., & Ye, F. (2024). Reusable, high specific surface areas, and excellent thermal stability Al_2O_3–SiO_2 aerogel composites as high-temperature thermal insulators for radome applications. Journal of Alloys and Compounds, 984, 173990.