
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİNDE İLERİ ARAŞTIRMALAR

Editör: Dr.Öğr.Üyesi Hediye KIRLI AKIN

Endüstri Mühendisliğinde İleri Araştırmalar

Editör

Dr. Öğr. Üyesi Hediye KIRLI AKIN

yaz
yayınları

2024

Endüstri Mühendisliğinde İleri Araştırmalar

Editör: Dr. Öğr. Üyesi Hediye KIRLI AKIN

© YAZ Yayınları

Bu kitabın her türlü yayın hakkı Yaz Yayınları'na aittir, tüm hakları saklıdır. Kitabın tamamı ya da bir kısmı 5846 sayılı Kanun'un hükümlerine göre, kitabı yayınlayan firmanın önceden izni alınmaksızın elektronik, mekanik, fotokopi ya da herhangi bir kayıt sistemiyle çoğaltılamaz, yayınlanamaz, depolanamaz.

E_ISBN 978-625-5547-23-1

Aralık 2024 – Afyonkarahisar

Dizgi/Mizanpaj: YAZ Yayınları

Kapak Tasarım: YAZ Yayınları

YAZ Yayınları. Yayıncı Sertifika No: 73086

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar/AFYONKARAHİSAR

www.yazyayinlari.com

yazyayinlari@gmail.com

info@yazyayinlari.com

İÇİNDEKİLER

Bir Lastik Fabrikasında Dijital İkiz Teknolojisi ile Darboğaz Tespiti ve Kapasite İyileştirme Çalışması	1
<i>Ayten YILMAZ YALÇINER, Doğukan Mert ŞEN</i>	

Elektronik Atık Yönetiminde İmalat Teknolojilerinin Rolü.....	22
<i>Hediye KIRLI AKIN, Yusuf FEDAI</i>	

"Bu kitapta yer alan bölümlerde kullanılan kaynakların, görüşlerin, bulguların, sonuçların, tablo, şekil, resim ve her türlü içeriğin sorumluluğu yazar veya yazarlarına ait olup ulusal ve uluslararası telif haklarına konu olabilecek mali ve hukuki sorumluluk da yazarlara aittir."

BİR LASTİK FABRİKASINDA DİJİTAL İKİZ TEKNOLOJİSİ İLE DARBOĞAZ TESPİTİ VE KAPASİTE İYİLEŞTİRME ÇALIŞMASI

Ayten YILMAZ YALÇINER

Doğukan Mert ŞEN

1. GİRİŞ

Bir üretim sistemi amaçlarına ulaşabilmek için temel girdilerini en uygun şekilde kullanarak çıktılarını en iyilemek ister. Bir taraftan üretim hedeflerini yakalamaya çalışırken, bir yandan da müşteri istek ve beklentilerini zamanında karşılayarak rekabette üstün gelmek isterler. Günümüz dinamik ortamında esnek olmak zorunda olan işletmeler hızlı değişimlere uyum sağlayabilmek için sıklıkla simülasyondan destek alırlar. Gerçek sistem üzerinde değişikliğin her zaman mümkün olmaması (zaman, maliyet yada diğer sebeplerden) işletmeleri simülasyona zorunlu kılar.

Fiziksel sistemin sanal bir kopyasını oluşturmak, gerçek ve sanal sistemler arasında bir bağlantı sağlayarak sanal modelde veri toplamak, analiz etmek ve simüle etmek ve böylece gerçek sistemin performansını iyileştirmekle ilgili olan Dijital İkiz kavramı ortaya çıkmıştır. Dijital bir model, dijital ikiz için hayati önem taşır. Dijital İkiz durumlarını gerçekleştirmek için çeşitli mimariler geliştirilmektedir.

Çağdaş üretim sistemlerinde dijital ikiz teknolojisi gerçek zamanlı performansı ve uyarlanabilirliği artırmak için kıymetli değerlendirmeler sunar. Dijital ikiz teknolojisi, çift yönlü veri akışı ve sürekli senkronizasyon ile fiziksel sistemlerin

sanal kopyalarını oluşturarak süreçlerin gerçek zamanlı izlenmesini ve optimizasyonunu sağlar.

1.1. İşletmelerde Kapasite Hesabı ve Önemi

Bir işletmenin üretim kapasitesi, belirli bir dönemde mevcut üretim faktörlerinin (işgücü, makine, malzeme vb.) rasyonel kullanımıyla ulaşılabilecek maksimum üretim miktarıdır. Kapasite, işletmenin üretim miktarını ve maliyetleri dikkate alarak tanımlanabilir. Üretim miktarı açısından, kapasite işletmenin birim zamanda gerçekleştirebileceği maksimum üretim düzeyini ifade eder. Maliyetler açısından ise kapasite, işletmenin kısa dönemde ortalama maliyet eğrisini en düşük seviyeye indirdiği üretim düzeyini ifade eder.

İşletme kapasitesi, işletmenin para, işgücü, malzeme, makine, bilgi ve diğer kaynaklarını verimli bir şekilde kullanarak üretim yapabilme yeteneğini gösterir.

Bir kapasite çalışması yapmak için OEE verilerini kullanmak, işletmenin üretim kapasitesinin daha doğru ve detaylı bir şekilde anlaşılmasına yardımcı olur. OEE verilerinin kullanımı, işletmelerin üretim süreçlerinde yüksek verimlilik ve kalite standartlarını yakalamalarına olanak tanır (Nakajima, 1988; Jeong and Phillips, 2001). Gibbons ve Burgess çalışmalarında simülasyon programları ve OEE verilerini kullanarak üretim süreçlerini modellemiş ve bu süreçlerdeki olası iyileştirmeleri göstermiştir. Örneğin, belirli makinelerin bakım sürelerinin azaltılması gerektiği, belirli işgücü dağılımlarının yeniden düzenlenmesi gerektiği ve genel üretim hızının artırılabilirliği gibi bulgular elde edilmiştir. Bu analizler sonucunda, işletme yönetimi, kaynaklarını daha etkin bir şekilde kullanarak üretim kapasitesini artırmak için gerekli stratejileri geliştirmiştir (Gibbons and Burgess, 2010).

1.2. OEE

Kullanılabilirlik, performans ve kalitenin bir kombinasyonu olan OEE (Overall Equipment Effectiveness, Genel Ekipman Etkinliği) bir üretim sürecinin, ideal koşullarda, çalıştırılması planlanan dönemlerde tam potansiyeline kıyasla ne kadar iyi kullanıldığının bir ölçüsüdür ve üretim süreçlerinin verimliliğini ve etkinliğini değerlendirmek için kullanılan kritik bir metriktir. OEE, üç temel bileşenden oluşur: kullanılabilirlik (availability), performans (performance) ve kalite (quality). Bu bileşenler bir araya gelerek, üretim ekipmanlarının ne derece etkili kullanıldığını ve bu kullanımdan elde edilen gerçek çıktının ne olduğunu ölçer (Nakajima, 1988; Ljungberg, 1998; Jonsson and Lesshammar, 1999; Jeong and Phillips, 2001).

OEE'nin ilk bileşeni olan kullanılabilirlik, ekipmanın planlanan üretim süresi boyunca ne kadar süre çalıştığını ifade eder. Bakım çalışmaları, arızalar veya diğer duraklamalar bu süreyi etkileyen başlıca faktörlerdir.

$$\text{Kullanılabilirlik} = \frac{\text{Net Çalışma Süresi}}{\text{Planlı Üretim Süresi}}$$

İkinci bileşen olan performans, ekipmanın çalıştığı sürede ne kadar verimli olduğunu gösterir. Bu bileşen, hız kayıpları ve küçük duraklamalar gibi üretim sürecini yavaşlatan etkenleri içerir (Muchiri and Pintelon, 2008).

$$\text{Performans} = \frac{\text{Gerçek Çalışma Hızı}}{\text{Teorik Çalışma Hızı}} \times \text{Net Çalışma Süresi}$$

Son olarak, kalite bileşeni, üretilen ürünlerin ne kadarının kusursuz olduğunu ve yeniden işleme veya hurdaya ayrılma gereksinimi olmadan kabul edilebilir olduğunu ölçer (De Ron and Rooda, 2005).

$$\text{Kalite} = \frac{\text{Kabul Edilebilir Son Ürün Sayısı}}{\text{Toplam Üretim Sayısı}}$$

OEE, bu üç bileşenin çarpımı olarak hesaplanır:

$$\text{OEE} = \text{Kullanılabilirlik} \times \text{Performans} \times \text{Kalite}$$

Bu formül, üretim sürecinin toplam etkinliğini ortaya koyar ve işletmelerin potansiyel iyileştirme alanlarını belirlemelerine yardımcı olur (Huang et al., 2003). Ancak, OEE değerinin %100 olması, tüm bileşenlerin mükemmel olduğunu ve ekipmanın maksimum verimlilikte çalıştığını gösterir ki bu, gerçek dünyada nadiren ulaşılabilen bir hedeftir (Gibbons and Burgess, 2010).

1.3. Dijital İkiz Teknolojisi ve Flexim Yazılımı

Modern üretim sistemlerinin temel sorunlarından biri, üretim ve lojistik süreçlerini ve operasyonlarını temelden değiştiren modern Endüstri 4.0 teknolojileriyle ilgili artan karmaşıklılıktır. Bazı modelleme ve simülasyon yöntemleri, endüstriyel sorunları çözmek için kullanılır ve üretim seviyesi ile yönetim seviyesi arasında bir arayüz görevi görebilir (Kampa, 2023). Endüstri 4.0'ın temel bir unsuru olan dijital ikizler, fiziksel sistemlerin gerçek zamanlı bir tasvirini sunarak operasyonel etkinliği ve karar vermeyi iyileştirir. Dijital ikiz, esasında fiziksel bir sürecin sanal bir temsilidir.

Dijital ikiz teknolojisi kavramı son yıllarda hem endüstride hem de akademide önemli ilgi görmüştür. "Dijital İkiz" terimi çeşitli tanımlar almıştır, ancak en doğru şekilde fiziksel ve sanal bir sistem arasında verilerin sorunsuz bir şekilde entegre edilmesi ve çift yönlü işlemlerin mümkün kılınması olarak tanımlanabilir.

Teknik üniversitelerde eğitim sürecinde FlexSim yazılımının kullanılmasının olanaklarını belirten bir çalışma,

bu yazılımın kullanılarak seçilmiş mühendislik problemlerinin çözülme olanaklarını ve öğrenciler arasında yazılımın yararlılığı üzerine yapılan bir anketin sonuçlarını sunmuştur (Ubowska ve Królikowski, 2024). Bu da ilerleyen zamanlarda sanal simülasyon yada dijital ikiz teknolojisinin mühendislik ve diğer disiplinler kapsamında çok daha fazla yer alacağını düşündürmektedir.

1.4. Flexsim

Dijital ikiz kavramı, fiziksel bir sistemin dijital bir temsilini ifade eder ve bu temsil, sistemin gerçek zamanlı veri akışı ile güncellenir. FlexSim, modern üretim tesislerinin dijital ikizlerini oluşturmak için kullanılan, daha kısa sürede daha iyi, daha doğru simülasyon modelleri oluşturmaya yardım eden güçlü bir simülasyon yazılımıdır. FlexSim, takviyeli öğrenme algoritmalarını eğitmek için yapay zeka ve makine öğrenimini de destekleyen VR özellikli, açık mimariye sahiptir. FlexSim'in temel yetkinliği, mevcut sisteminizin görünümünü ve davranışını temsil eden 3B modeller oluşturmaktır. Bu modeller, gerçek sistemin farklı girdiler ve düzenler kullanarak nasıl yanıt vereceğini simüle eder. FlexSim modeli düzenli (veya gerçek zamanlı) aralıklarla otomatik olarak veri çekebilir ve bu verilerle simülasyonlar çalıştırabilir. (Wang ve Chen, 2016; Cai, Baafi ve Porter, 2012).

Lojistik ve tedarik zinciri yönetimini dönüştürmeyi, darboğazları keşfetmeyi, sistemleri optimize etmeyi ve operasyonel verimliliği artırmayı sağlamak için destek olmayı hedefleyen FlexSim'in temel özelliklerinden biri, yöneticilerin gerçek operasyonları etkilemeden süreç iyileştirmelerini test etmelerine ve stratejileri taklit etmelerine olanak tanıyan gerçek zamanlı karar yardımcısı olmasıdır. FlexSim, üç boyutlu modelleme yetenekleri sayesinde, fabrikaların ve üretim

hatlarının dijital ikizlerini oluşturarak kullanıcıların sanal ortamda üretim süreçlerini simüle etmelerine olanak tanır. Bu dijital modeller, fiziksel sistemlerin tam bir kopyası gibi davranır ve gerçek zamanlı verilerle sürekli olarak güncellenir. Bu sayede, üretim süreçlerindeki olası aksaklıklar, darboğazlar ve iyileştirme fırsatları önceden tespit edilebilir ve optimize edilebilir (Krynke, 2021).

FlexSim kullanarak dijital ikiz oluşturma çalışması, işletmelerin üretim süreçlerini daha etkin ve verimli hale getirmelerine, üretim süreçlerindeki olası aksaklıkları ve darboğazları önceden tespit ederek, işletmelerin proaktif bir şekilde önlem almasına olanak tanır (Cai, Baafi ve Porter, 2012; Wang ve Chen, 2016; Krynke, 2021). FlexSim ile yapılan dijital ikiz çalışmaları, işletmelerin rekabet avantajını artırarak, sürdürülebilir büyüme ve başarı elde etmelerine katkı sağlar (Wang ve Chen, 2016; Krynke, 2021).

Farklı alanlarda çalışma alanı bulan Flexim ile literatürde son birkaç yılda çalışmaların arttığı görülmektedir. Barykin vd. (2021), dijital ikizlerin tedarik zinciri yönetimindeki işlevini araştırmış, gerçek zamanlı görünürlük ve proaktif kesinti yönetimi için dönüştürücü güçlerini vurgulamıştır. Bu çalışmanın envanter yönetimi ve lojistik planlama konusundaki bulguları, dijital ikizlerin operasyonel verimliliği artırmadaki faydasını göstermiştir. Trauer ve diğerlerinin (2020) teknik ürün geliştirmede dijital ikizleri araştırması, depo yönetiminde çok yönlü bir tanımı ortaya çıkarıyor. Yazarlar, dijital ikizi neyin oluşturduğunu çevreleyen bakış açılarındaki çeşitliliği vurgulayarak değerli içgörüler sunmuşlardır. Dijital ikiz kavramı, her biri kullanımının farklı bir yönünü vurgulayan birden fazla alanda yoğun bir şekilde araştırılmıştır. Yafei vd. (2018), FlexSim'in depo lojistiğindeki etkinliğini göstererek, depolama politikası optimizasyonuna

odaklanmasını tamamlayan çalışmada öncelikle şirketin depolama ve lojistiği için modelleme, simülasyon ve simülasyon sonuçlarının analizi, şirket depo lojistik sisteminin ayrıntılı incelemesini, devamında simülasyon sonuçlarını şirketin gerçek durumuyla birleştirerek, şirketin depolama lojistiği, uygulama sürecinin analizi, yalın lojistik fikri, ilgili teorilerin ve prensiplerin optimizasyonu ile depolama ve lojistik problemlerinde mevcut olan ve çeşitli faktörleri kapsamlı bir şekilde ele almışlardır. Kampa (2023), Gerçek sisteme mümkün olduğunca benzer simülasyon modelleri oluşturan Dijital İkiz'in yeni trendi ve otomotiv endüstrisinden bir üretim hattı için bir Dijital İkiz çerçevesi sunmuştur. Farklı bir sektör olarak dijital ikiz kavramının enerji verimliliği alanında uygulanması, Endüstri 4.0 teknolojik gelişmelerinden yararlanan umut verici bir araştırma konusudur. Simülasyon modeline dayalı olarak üretim sistemlerinde enerji optimizasyonu için bir dijital ikiz mimarisi sunan bir çalışma, bir akü paketi montaj hattı vaka çalışmasında AGV'lerin verimli enerji yönetimini teşvik etmek için önerilen olasılık simülasyon modelinin dijital ikiz içerisinde uygulanabilirliği sunmaktadır (Pires vd. 2021).

Şu anda, çoğu durumda, üretim sistemlerinin simülasyon modelleri, belirli bir modelleme dilini veya ortamını iyi bilen bir kişi tarafından, yani uzman bilgisini kullanarak "manuel olarak" oluşturulur. Ancak, bu süreç, özellikle karmaşık modeller için, yavaş ve hataya açıktır. Modelin gerçek verilere uygunluğunu birkaç kez test etmek gerekir. Simülasyon modellerinin otomatik veya yarı otomatik olarak üretilmesi için geliştirilen yöntemler genellikle işletmelerde kullanılan ERP/MRP/MES/CAD/CAM sistemlerinden elde edilen veri ve bilgileri kullanan yaklaşımlara dayanır (Krenczyk ve Paprocka, 2023).

1.4.1. FlexSim ile Dijital İkiz Oluşturma Süreci

FlexSim kullanarak bir fabrikanın dijital ikizini oluşturma süreci, üretim süreçlerinin detaylı bir şekilde modellenmesini ve analiz edilmesini kapsar.

Veri Toplama ve Modelleme: İlk aşama, fiziksel sistem hakkında gerekli verilerin toplanması ve bu verilerin FlexSim ortamına aktarılmasıdır. Bu veriler, makine kapasiteleri, işlem süreleri, bekleme süreleri gibi çeşitli parametreleri içerir (Cai, Baafi ve Porter, 2012; Krynke, 2021).

3D Modelleme: Toplanan veriler kullanılarak, fabrikanın üç boyutlu dijital modeli oluşturulur. Bu model, fiziksel sistemin tam bir kopyası olacak şekilde detaylandırılır (Wang ve Chen, 2016).

Simülasyon ve Analiz: Oluşturulan dijital model üzerinde simülasyonlar gerçekleştirilir. Bu simülasyonlar, üretim süreçlerinin performansını değerlendirmek ve iyileştirme fırsatlarını belirlemek için kullanılır (Krynke, 2021).

Optimizasyon: Simülasyon sonuçlarına dayanarak, üretim süreçlerinde yapılması gereken iyileştirmeler ve optimizasyonlar belirlenir. Bu iyileştirmeler, darboğazların giderilmesi, işlem sürelerinin azaltılması ve genel verimliliğin artırılması gibi hedefleri içerir (Wang ve Chen, 2016).

2. ÇALIŞMANIN İÇERİĞİ ve UYGULAMA

Uygulama çalışması bir lastik üreticisi işletmede gerçekleştirilmiştir. Bu işletmeler, otomobil üreticilerine (OEM) ve nihai tüketicilere yönelik olarak lastiklerin tasarımı, üretimi ve dağıtımı süreçlerinde uzmanlaşmıştır.

Bir lastik fabrikasında son proses olan Finishing atolyesinde pişirilen lastiklerin kalitesel kontrolü yapılarak sevkiyat öncesi kalite gruplarına göre hazır hale getirmektedir. Yeni kalite normlarına göre ve pişirme kapasitesinin arttırılmasından dolayı kapasite yetersizliği meydana gelmiştir. Ele alınan bu problemde mevcut kapasitenin yeni kalite normlarına göre analizi yapılmıştır ve flexsim simülasyon programı aracılığıyla atölyenin dijital ikizi oluşturularak darboğaz noktaları analizi ve kapasite arttırım çalışması uygulanmıştır. Simülasyon sonuçlarına dayanarak, süreçlerdeki atıklar ve darboğazlar belirlenmiş ve bu alanlarda iyileştirme fırsatları tespit edilmiştir

2.1. Kapasite Hesabında Kullanılacak Dataların Toplanması

Kapasite Hesabı yapmak için ilk ve en önemli adım veri toplama aşamasıdır. Buradaki en büyük karmaşık durum ölçüye göre makine çevrim sürelerinin değişmesidir. Bu durum lastik gruplarına göre ağırlıklı ortalama ile çevrim değeri çalışması yapılarak çözülecektir.

Kapasite hesabında kullanmak üzere öncelikle farklı ölçülerdeki lastikler için makine gruplarına göre SAP sisteminden çevrim verileri alınmıştır.

Trim&Visual Control	dk/tyre	2,30
X-RAY	dk/tyre	0,90
UNIFORM.	dk/tyre	1,13
UNBALAN.	dk/tyre	0,98

Şekil 1. Makine Grubu Cycle Tablosu

Kapasite hesabında en önemli diğer adım ise OEE verileridir. OEE makinelerin gerçekleşen performanslarının ölçümünü sağlayan bir metriktir. Hesaplarda baz alınacak olan OEE değerleri bir önceki yılın ortalamaları alınarak kabul edilmiştir.

Mach. Group	Trim&Visual Control	X-Ray	Uniformity	Unbalance
OEE	82,0%	80,0%	85,0%	70,0%
MACHINE BREAKDOWN	5,6%	5,3%	3,4%	8,0%
EQUIPMENT CHANGE & SET-UP	4,4%	4,1%	2,7%	4,7%
QUALITY	3,6%	3,6%	3,8%	7,1%
RE-WORK	0,0%	0,3%	1,1%	1,3%
NOT DECLARED LOSS	4,4%	6,7%	4,0%	8,9%

Şekil 2. Makine Grubu OEE Tablosu

Son olarak kapasite hesabı için önemli metriklerin sonuncusu ise üretime uygun makine zaman bilgileridir. Burada ise verilerin kaynağı PCS (Production Control System) sistemi ile izlenen ve tablolara kayıt edilen bir önceki yıl verileri baz alınmıştır. Bakım zamanları için ise ilgili departman planları baz alınmıştır. Yıllık ortalama değerlerdir.

Mach. Group	Trim&Visual Control	X-Ray	Uniformity	Unbalance
Üretim için Uygun Zaman (dk/gün)	1440	1440	1440	1440
Planlı Bakım için Planlanan Zaman (dk/gün)	32	32	32	32
Dinlenme ve Kantin Zamanı (dk/gün)	180	180	180	180
Vardiya Organizasyonundan Planlanmamış Zaman (dk/gün)	0	0	0	0
Rest Break for Workers' Eyes (min/day)	120	0	0	0

Şekil 3. Makine Grubu Üretim Zamanı Tablosu

2.2. Atölyenin Kapasite Hesabının Yapılması

Dört makine grubu olarak kapasite hesabı yapıldığında yıllık analiz tabloları elde edilir. (Trimming & Visual Control, X-Ray, Uniformity, Dynamic Unbalance Kapasite Detay Tabloları)

2.3. Atölyenin Süreç Haritasının Çıkartılması

Bu harita, akış simülasyonu oluştururken yol gösterici olacaktır.

2.4. Simüle Edilecek Atölyenin Fiziki Özelliklerinin Ölçülmesi

Bu aşamada simüle edilecek atölyenin tüm bantlarının parametreleri (hız, genişlik, uzunluk, hareket yönü vs.) aynı zamanda tüm proseslerin parametreleri toplanmıştır.

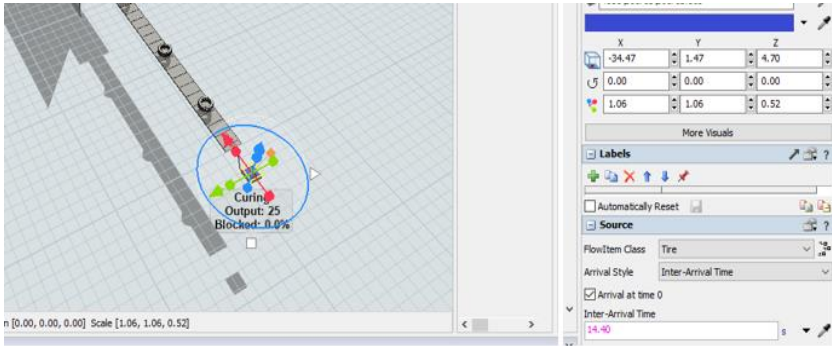
2.5. Atölyenin Flexsim Ortamında Dijital İkizinin Oluşturulması

Öncelikle burada çalışma proses grupları olarak ayrılmıştır. Buradaki gruplama ise;

- Lastiği Gönderen Bir Önceki Proses
- Trimming&Visual Control
- X-Ray
- Uniformity
- Unbalance
- Bir Sonraki Sevkiyat Gruplama Prosesi

Lastiği gönderen bir önceki prosesin lay-out görselleri alınmıştır. Flexsim üzerinden ise bant parametreleri tanımlanmıştır.

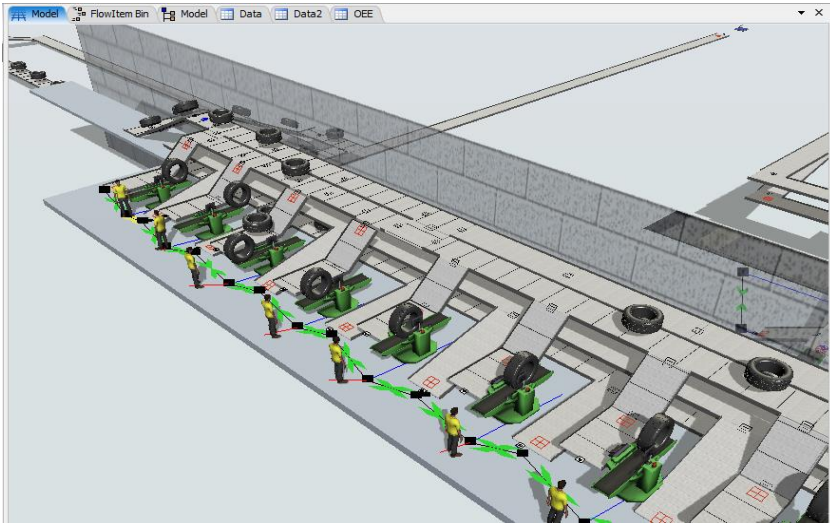
Bir önceki atölye olan pişirmenin geliş bantı simüle edilmiştir.



Şekil 4. Pişirme Atölyesi Simülasyon Ekran Görüntüsü

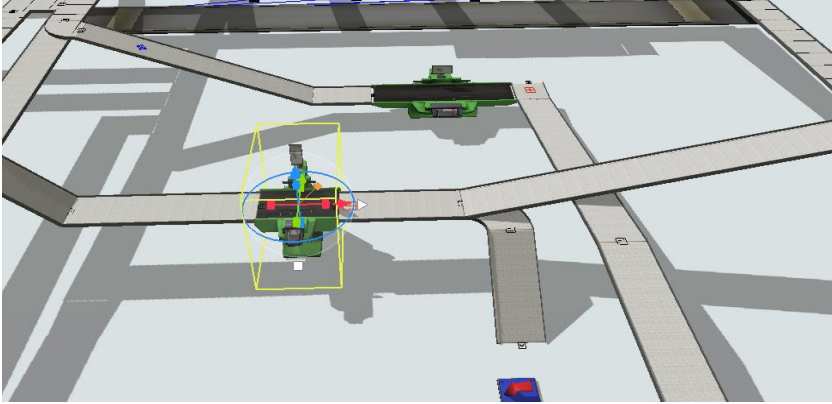
Banta bağlı pişirme kaynağı için 14.40 sn gönderim sıklığı süresi belirlenmiştir.

Trimming&Visual Control prosesi için simülasyon çıktısı aşağıdaki gibidir.



Şekil 5. Trimming&Visual Control Simülasyon Ekran Görüntüsü

X-ray prosesi sonrası seçim öncesi son kontrol olan Uniformity & Unbalance makine grubu için simülasyon tasarımı şöyledir:



Şekil 6. Uniformity&Unbalance Simülasyon Ekran Görüntüsü

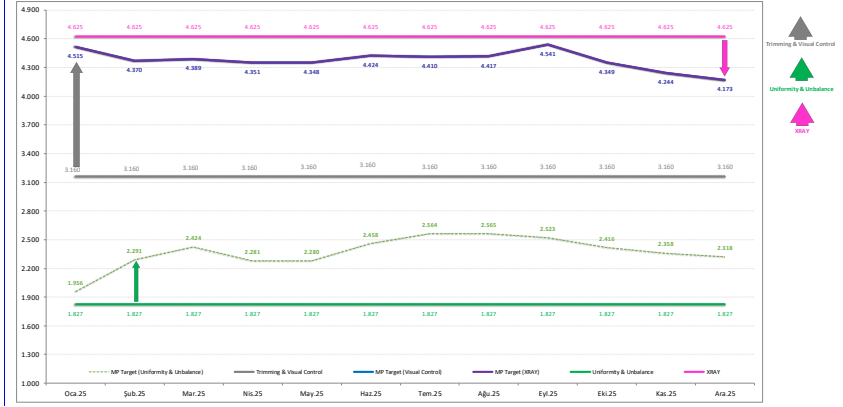
Uniformity ve Unbalance makineleri birbirine bağlı grup olduğu için tek makine olarak simüle edilmiştir.

2.6. Darboğaz Analizlerinin Yapılması

Yıllık bazda hesaplanan makine grubu bazlı kapasitelerin Ana Üretim Planına (MPS) göre darboğaz analizi aşağıdaki gibidir. Burada yapılan çıkarımlar sonucunda yatırım ve iyileştirme önerileri yapılabilecektir.

	Oca.25	Şub.25	Mar.25	Nis.25	May.25	Haz.25	Tem.25	Ağu.25	Eyl.25	Eki.25	Kas.25	Ara.25
Trimming & Visual Control	3.160	3.160	3.160	3.160	3.160	3.160	3.160	3.160	3.160	3.160	3.160	3.160
MP Target (Visual Control)	4.515	4.370	4.389	4.351	4.348	4.424	4.410	4.417	4.541	4.349	4.244	4.173
XRAY	4.625	4.625	4.625	4.625	4.625	4.625	4.625	4.625	4.625	4.625	4.625	4.625
MP Target (XRAY)	4.515	4.370	4.389	4.351	4.348	4.424	4.410	4.417	4.541	4.349	4.244	4.173
Uniformity & Unbalance	1.827	1.827	1.827	1.827	1.827	1.827	1.827	1.827	1.827	1.827	1.827	1.827
MP Target (Uniformity & Unbalance)	1.956	2.291	2.424	2.281	2.280	2.458	2.564	2.565	2.523	2.416	2.358	2.318

Şekil 7. Kapasite – Ana üretim Planı Aylık Dağılım Tablosu



Şekil 8. Makine Grubu Kapasite Darboğaz Analizi

Kapasite çalışmasında Trimming&Visual Control yeni yıl planına göre darboğaza uğradığı farkedilmiştir. Bu kapsamda çalışılması gereken makine grubundan birisidir.

Aynı zamanda Uniformity & Unbalance prosesleri de yeni yıl planında kapasite bakımından plana göre geride kalmaktadır. Bu kapsamda çalışılması gereken diğer makine grubu da burasıdır.

2.7. Simülasyon Darboğaz Analizleri

Trimming&Visual Control için yatırım önerileri:

- Ağırlıklı Olarak Fazla Çalışma Planı ve Makine Alımı Yapılması (Alternatif-1)
- Ağırlıklı Olarak Makine Alımı ve Fazla Çalışma Planı Yapılması (Alternatif-2)
- Sadece Yeni Makine Alımı Yapılması (Alternatif-3)

Bu alternatifler arasında AHP yöntemi karar verilmiştir. Alternatifleri yönetici ve şirket hedefleri göz önüne alarak değerlendirildiğinde aşağıdaki durum oluşmaktadır.

Alternatifler/Kriter	Yatırımın Tamamlanma Süresi	Makine Maliyeti	Toplam Maliyet
A-3	12 ay	150K€	220K€
A-2	13 ay	165K€	190K€
A-1	14 ay	180K€	200K€

Şekil 9. Alternatiflerin Kriterlerinin Maliyet Tablosu

AHP aşamaları gerçekleştirildikten sonra yatırım alternatiflerinin son değerlendirme tablosu aşağıdaki gibidir.

Alternatif Değerlendirme Sonuçları				
Kriter	Yatırımın Tamamlanma Süresi	Makine Maliyeti	Toplam Maliyet	Toplam
A-1	0,33	0,08	0,03	0,44
A-2	0,13	0,24	0,10	0,47
A-3	0,07	0,35	0,15	0,57

Şekil 10. Alternatiflerin Karar Ağırlıkları Tablosu

Bu karar sonucu ile sadece makine alımı kararı alınmıştır.

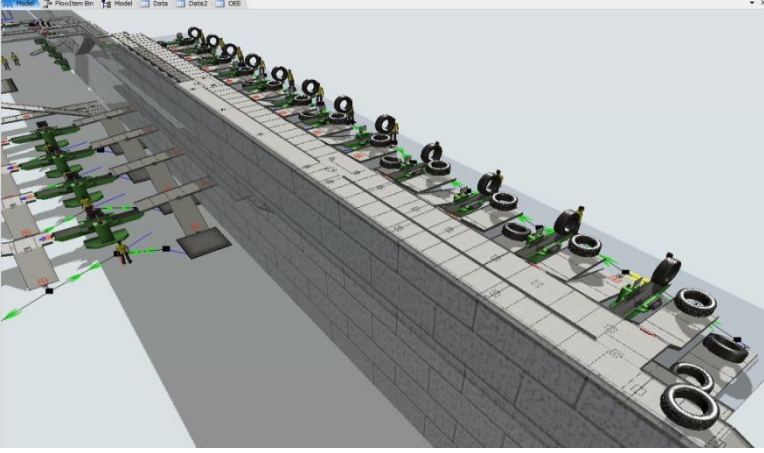
Bir diğer kapasite darboğazı olan Uniformity& Unbalance proses grubunda alınan yatırım kararı ise fazla mesai yapılması ağırlıklı olacak şekilde makine alımı olmasıdır.

2.8. Yatırım Sonrası Kapasite Kazanç Analizi

Bu aşamada, yatırım kararı netleşen iki ayrı proses grubu için yapılacak yatırıma göre kapasite değişim analizi yapılmıştır. Bu analizde Trimming & Visual Control alanı için yapılacak olan fazla mesai olmaksızın yapılacak olan makine yatırımı değerlendirilmiştir. Analiz sonucunda yatırım yapılacak makine adetleri değerlendirilmiştir.

Mevcut durumda 8 adet makinesi olan bu proses grubunun kapasite değerlendirmesi aşağıdaki gibidir. Eğer 3 yeni makine yatırımı yapılır ise kapasite mevcut durum %27 artarak 4345 adete olmuştur. Fakat bu yeni durumda yetersiz olduğundan 4 makine yatırımı kararı daha doğru olmuştur. Yeni

durumda 12 makine ile mevcut kapasite arttırımı ise %33 oranında artmıştır. Yeni alınan makineler mevcut makine özellikleri ve cycle durumu göz önünde alınarak oluşturulmuştur. Bu yeni 4 makine simülasyonda eklendiğinde aşağıdaki durum oluşmaktadır.



**Şekil 11. Yeni Trimming&Visual Control Yatırım Sonrası
Simülasyon Ekran Görüntüsü**

Yeni makinenin OEE ve cycle özelliklerine göre değerlendirme yapıldığında Temmuz-Ağustos-Eylül aylarında yeni makine yatırımına rağmen kapasite karşılamamıştır. Bu aşamada ise karma model yaklaşımı ile Kantin süreçlerinde makine durmasını engellemek adına değişim operatörü verilecek makine bu sürede durmayarak darboğaz sorunu çözülecektir. Bu yatırım ile sahada aylık bazda %19 kapasite artışı sağlanmıştır. Yıllık bazda ise bu kazanç değişim işçisi ile birlikte %21 olmuştur.

Uniformity makinesinde kapasite değerlendirmesi incelendiğinde yeni makinenin OEE ve çevrim özelliklerine göre değerlendirmeye alınarak Haziran-Temmuz-Ağustos-Eylül-Ekim-Kasım aylarında yeni makine yatırımına rağmen kapasite

karşılamamıştır. Bu aşamada ise yine karma model yaklaşımı ile Kantin süreçlerinde makine durmasını engellemek adına değişim operatörü verilecek makine bu sürede durmayarak darboğaz sorunu çözülecektir. Böylece bu yatırımda aylık bazda %23 kapasite artışı sağlanmıştır. Yıllık bazda ise toplam kazanç %24 düzeyindedir.

2.9. Bulgular

2.9.1. Kapasite Yetersizliği

Mevcut üretim kapasitesinin yeni kalite normlarına ve artan üretim taleplerine cevap vermediği tespit edildi. Yapılan simülasyon ve analizler sonucunda, Visual Control prosesinde 4 yeni makine yatırımı ve Uniformity & Unbalance proses gruplarında 1'er makine yatırımı kararı alındı.

2.9.2. Operatör/Makine Verimsizliği

Operatörlerin ve makinelerin verimliliğini artırmak amacıyla fazla mesai ve yeni operatör görevlendirmeleri planlandı. Ayrıca, Visual Control prosesinde lastik dağıtım algoritması güncellenerek, sondan başa atama yöntemi ile iş yükü dengelendi.

2.9.3. Dengesiz İş Dağılımı

İş dağılımındaki dengesizliklerin giderilmesi amacıyla proses gruplarındaki iş yükü analiz edildi ve optimizasyon çalışmaları yapıldı. Özellikle Visual Control prosesinde operatörlerin çalışma grafikleri düzenlendi.

2.9.4. Dijital İkiz Teknolojisi ve Flexsim

Dijital ikiz teknolojisi, gerçek dünya sistemlerinin sanal modellerini oluşturarak süreçlerin detaylı bir şekilde analiz edilmesini sağladı. Flexsim yazılımı kullanılarak oluşturulan dijital ikiz, mevcut sistemin tam bir kopyasını temsil etti ve

böylece çeşitli senaryoların test edilmesi ve darboğazların belirlenmesi mümkün oldu. Bu sayede, atölyenin performansı üzerinde yapılan iyileştirmeler daha etkili ve verimli hale getirildi.

2.9.5. Darboğaz Analizleri

Atölyenin farklı proses gruplarındaki darboğaz noktaları, dijital ikiz modeli ve simülasyonlar yardımıyla detaylı bir şekilde analiz edildi. Bu analizler, kapasite yetersizliğinin nedenlerini ve çözüme yönelik adımların belirlenmesinde kritik rol oynamıştır.

3. SONUÇ

Üretim sisteminin simülasyonu, gerçek sistem hakkında bir bilgi deposu haline geldiği ve dinamiklerinin analizini sağladığı için çok yararlıdır, ancak düzgün işlevsellik için, modelin Dijital İkiz oluşturacak şekilde fiziksel sisteme çok benzemesi gerekir. Ana sorunlar, öngörülmesi zor ancak üretim süreçleri üzerinde büyük etkisi olan istikrarsız insan emeği ve insan hataları ile makine arızalarıyla ilgilidir. Üretim yönetimi alanında simülasyon modellerine dayalı Dijital İkizler oluşturma konseptinin uygulanması, uygulama zorlukları ile ilişkilidir. Bu zorluklar, modellerin oluşturulması ve güncellenmesinin zaman alıcı ve maliyet yoğun sürecinden kaynaklanmaktadır. Bu zorluklar ayrıca, iş istasyonu sayısına, işlem sayısına, değerlendirme kriteri sayısına, güvenilirlik parametrelerinin sayısına, üretim sisteminin olası yapılandırmalarına ve esneklik düzeyine bağlı olarak sistemlerin artan karmaşıklığıyla da artmaktadır.

Çalışmanın lastik fabrikasının üretim kapasitesini ve süreç verimliliğini artırmak için önemli stratejik kararlar alınmasına destek sağlaması beklenmektedir.

4. KAYNAKÇA

- Nakajima, S. (1988). Introduction to TPM: Total Productive Maintenance. Productivity Press.
- Ljungberg, Ö. (1998). Measurement of overall equipment effectiveness as a basis for TPM activities. International Journal of Operations & Production Management, 18(5), 495-507.
- Jonsson, P., & Lesshammar, M. (1999). Evaluation and improvement of manufacturing performance measurement systems-the role of OEE. International Journal of Operations & Production Management, 19(1), 55-78.
- Jeong, K. Y., & Phillips, D. T. (2001). Operational efficiency and effectiveness measurement. International Journal of Operations & Production Management, 21(11), 1404-1416.
- Muchiri, P., & Pintelon, L. (2008). Performance measurement using overall equipment effectiveness (OEE): Literature review and practical application discussion. International Journal of Production Research, 46(13), 3517-3535.
- De Ron, A. J., & Rooda, J. E. (2005). Equipment effectiveness: OEE revisited. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 18(1), 190-196.
- Huang, S. H., et al. (2003). Manufacturing productivity improvement using effectiveness metrics and simulation analysis. International Journal of Production Research, 41(3), 513-527.
- Gibbons, P. M., & Burgess, S. C. (2010). Introducing OEE as a measure of lean Six Sigma capability. International Journal of Lean Six Sigma, 1(2), 134-156.

- Cai, D., Baafi, E., & Porter, I. (2012). Modelling a longwall production system using Flexsim 3D simulation software. In Mine planning and equipment selection (pp. 107-114). Irvine, CA: The Reading Matrix Inc.
- Wang, Y. R., & Chen, A. N. (2016). Production logistics simulation and optimization of industrial enterprise based on Flexsim. *International Journal of Simulation Modelling*, 15(4), 732-741.
- Krynke, M. (2021). Personnel management on the production line using the FlexSim simulation environment. *Manufacturing Technology*, 21(5), 657-663.
- Ubowska, A. Królikowski, T. (2024). New technologies in the educational process on the example of FlexSim® software – the digital twin solution, *Procedia Computer Science*, Volume 246, Pages 4751-4758, ISSN 1877-0509, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.09.340>.
- Yafei, L., Qingming, W., & Peng, G. (2018, March). Research on simulation and optimization of warehouse logistics based on flexsim-take C company as an example. In *2018 7th International Conference on Industrial Technology and Management (ICITM)* (pp. 288-293). Ieee.
- Barykin, S. Y., Bochkarev, A. A., Dobronravin, E., & Sergeev, S. M. (2021). The place and role of digital twin in supply chain management. *Academy of Strategic Management Journal*, 20, 1-19.
- Trauer, J., Schweigert-Recksiek, S., Engel, C., Spreitzer, K., & Zimmermann, M. (2020, May). What is a digital twin?– definitions and insights from an industrial case study in technical product development. In *Proceedings of the design society: DESIGN conference* (Vol. 1, pp. 757-766). Cambridge University Press.

Kampa, A. (2023). Modeling and Simulation of a Digital Twin of a Production System for Industry 4.0 with Work-in-Process Synchronization. *Applied Sciences*, 13(22), 12261. <https://doi.org/10.3390/app132212261>

Krenczyk, D., & Paprocka, I. (2023). Integration of Discrete Simulation, Prediction, and Optimization Methods for a Production Line Digital Twin Design. *Materials*, 16(6), 2339. <https://doi.org/10.3390/ma16062339>

URL1: <https://www.flexsim.com/digital-twin/>

ELEKTRONİK ATIK YÖNETİMİNDE İMALAT TEKNOLOJİLERİNİN ROLÜ

Hediye KIRLI AKIN¹

Yusuf FEDAI²

1. GİRİŞ

Elektronik atıklar (e-atık), küçük ev aletleri, tıbbi ekipmanlar, aydınlatma ekipmanları; elektrikli ve elektronik aletler, kumandalı oyuncaklar, elektronik sigaralar, spor aletleri, akıllı telefonlar, bilgisayarlar, televizyonlar ve beyaz eşyalar gibi kullanım ömrünü tamamlamış elektronik cihazlardan oluşmaktadır. Teknolojinin hızla ilerlemesi ve ürün yaşam döngülerinin kısalmasıyla birlikte, e-atık üretimi önemli ölçüde artmıştır. Küresel E-Atık Monitörü'nün 2020 yılı raporuna göre, 2019 yılında Dünya'da yaklaşık 53,6 milyon metrik ton e-atık üretilmiş ve bunların yalnızca %17,4' ü geri dönüştürülebilmektedir (Forti vd., 2020). Bu rakamlar her geçen gün katlanarak artmaktadır. Teknolojinin hızla gelişmesi ve elektronik cihazların kullanım ömürlerinin kısa olması, Dünya genelinde e-atık miktarının da hızla artırmasına neden olmaktadır (Balde vd., 2020). E-atık üretimindeki küresel düzeyde yaşanan artışlar, günümüz çevresel sorunlarının başında gelmekte ve bu durum doğal kaynakların tükenmesi, çevre kirliliği ve yüksek atık yönetim maliyetleri gibi ciddi küresel etkilere yol açmaktadır.

1 Dr.Öğr.Üyesi, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü, hediyeakin@osmaniye.edu.tr, ORCID: 0000-0003-4862-9054.

2 Doç. Dr., Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü, yusuffedai@osmaniye.edu.tr, ORCID: 0000-0003-4546-8830



Şekil1. E-atık alanından bir görünüm

Kaynak: www.isoysesilblog.com.

Günümüzde e-atık konusu, hızla büyüyen ve önlenemeyen bir çevresel sorun olmasının yanı sıra ekonomik açıdan bakıldığında da ciddi sorunlara yol açan bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu nedenlerle araştırmacılar e-atıkların geri kazanım yollarını bulma arayışına girmişlerdir. E-atıklar diğer atıklardan farklı olarak geri kazanımı oldukça zor olan ve çevresel felaketlere neden olabilecek materyalleri bünyesinde barındıran atıklardır. E-atıkların yanlış bertaraf edilmesi küresel düzeyde çevre kirliliğine yol açabilecek, kurşun, cıva ve kadmiyum gibi toksik maddeler nedeniyle de çok ciddi çevre ve sağlık riskleri oluşturabilecek bir durumdur. Çevre ve canlı sağlığına olan zararlarını önlemek amacının dışında ekonomik açıdan da e-atıkların geri kazanımı önem arz etmektedir. Çünkü elektronik cihazların üretiminde değerli ve sınırlı doğal kaynakların kullanımı söz konusudur. Örneğin, altın, gümüş, bakır, lityum ve nadir toprak elementleri gibi metaller, elektronik devrelerin temel bileşenleridir (Robinson, 2009). Ayrıca elektronik cihazların üretilmesi için kullanılan enerji ve işçilik

maliyetleri de oldukça yüksektir. E-atıkların geri kazanımının yetersiz olması durumu gerek bu değerli madenlerin gerekse enerji ve işçiliklerin de yitirilmesi anlamına gelmektedir.

E-atıklar farklı malzemelerin karışımını içerdiklerinden geri dönüştürülmesi de karmaşık, zaman alıcı ve maliyetli olmaktadır (Robinson, 2009). Gelişmiş geri dönüşüm teknolojileri yüksek maliyetli olduğundan çok az sayıda yüksek teknolojiye sahip ülke e-atıkların geri kazanımını sağlayabilmektedir (Balde vd., 2020). Diğer ülkelerde ise maalesef e-atıklar içerisinde barındırdıkları toksik maddeler nedeniyle uygun şekilde bertaraf edilmediğinden çevresel açıdan geri dönüşü olmayan küresel felaketlere zemin hazırlamaktadır. E-atıklar içerdikleri metaller ve kimyasallar nedeniyle toprak, su ve havaya karışma durumunda, doğal sistemi olumsuz etkileyerek ekolojik dengeyi bozabilmekte, toprak ve sucul canlılarının ölümüne neden olabilmekte ve çok çeşitli kanserlere yol açabilmektedir. Bu nedenle, e-atık yönetimi, çevre ve canlı sağlığının korunması ve kaynakların sürdürülebilir bir şekilde kullanılmasını sağlamak adına son derece önemlidir. Uygun geri dönüşümü sağlamayan e-atıkların çevreye verdikleri zararlardan bazıları şöyledir:

- E-atıklarda bulunan kurşun, cıva, kadmiyum ve bromlu alev geciktiriciler gibi maddeler, toprağa ve yeraltı sularına sızarak ekosisteme zarar vermektedir (Perkins et al., 2014). Bu maddeler, tarım ürünlerinin, su kaynaklarının kirlenmesine yol açarak, sucul canlılara zarar vermektedir.
- Yakılarak bertaraf edilmeye çalışılan e-atıklardan atmosfere dioksin ve furan gibi zehirli gazlar salınmaktadır. Bu gazlar, solunum yolu hastalıklarına ve küresel ısınmaya neden olmaktadır (Lepawsky, 2018).

Bu çalışmada e atıkların geri kazanımında etkili olacağı düşünülen yeni teknoloji imalat yöntemlerinden olan eklemeli imalat, lazer kesim teknolojileri, robotik ve otomasyon yöntemlerinin e-atık yönetimine nasıl katkılarının olacağı tartışılmaktadır. Çalışma ayrıca bu teknolojilerin e-atık yönetimi ekosistemine entegre edilmesine yönelik zorlukları ve fırsatları da sunmaktadır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Nascimento ve ark. elektrik ve elektronik ekipmanların (WEEE) yönetiminde, sürdürülebilir performansın sağlanması açısından önemli bir çalışmaya imza atmışlardır. Özellikle, imalat sektöründe döngüsel ekonomi uygulamalarının benimsenmesi için gerekli olan iş modeli önerileri, e-atık yönetimi açısından kritik bir perspektif sunmaktadır (Nascimento vd., 2018). Althaf Amerika Birleşik Devletleri'nde tüketici elektroniği benimsemenin sürdürülebilirlik üzerindeki etkilerini incelediği çalışmasında e-atık politikalarının malzeme akışları ve malzeme sürdürülebilirliği üzerindeki etkilerini vurgulamakta ve sürdürülebilir malzeme yönetimi için bir bilgi temeli oluşturmaktadır (Althaf, 2019). All noman ve ark. tarafından yapılan bibliyometrik analiz çalışmasında, döngüsel ekonomi bağlamında makine öğrenimi ve yapay zekanın rolü araştırılmaktadır. Yazarlar, eski ürünlerin yeniden işlenmesi ve tekrar üretim süreçlerinde yapay zeka teknolojilerinin entegrasyonunun, çevresel maliyetlerin yönetiminde etkili olabileceğini vurgulamaktadır (All noman vd., 2022). Kaibara Portugaise ve ark. Japonya ve Kanada'daki üreticilerin e-atık yönetim uygulamalarını inceleyerek, genişletilmiş üretici sorumluluğunun etkilerini araştırmışlardır. Araştırma, e-atık yönetimi alanındaki güncel literatür bağlamında, bu konunun önemini ve potansiyelini vurgulamaktadır (Kaibara Portugaise

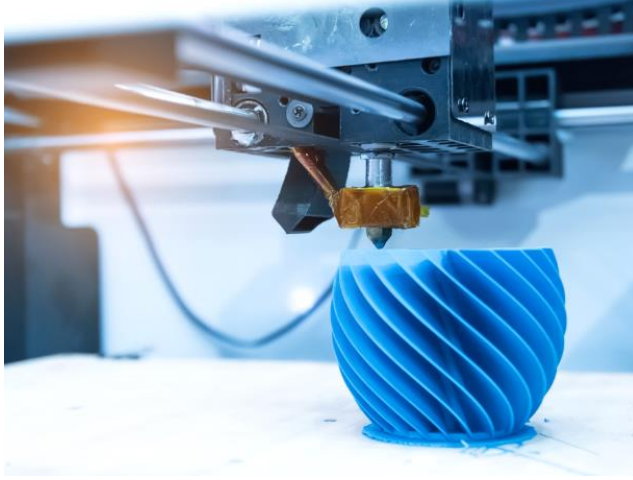
vd., 2023). Lal Srivastav ve ark., döngüsel ekonomi kavramlarının e-atık yönetimindeki rolünü incelemekte ve bu bağlamda malzeme geri dönüşümünün yanı sıra kaynakların maksimum düzeyde geri kazanımının önemini vurgulamaktadır. E-atıkların güvenli bir şekilde yönetilmemesi, insan sağlığı ve çevre üzerinde ciddi tehditler oluşturmakta; bu nedenle, çevre dostu teknolojilerin benimsenmesi gerektiği ifade edilmektedir (Lal Srivastav ve ark., 2023). Kaviul İslam ve ark., Güney Asya bölgesinde e-atık yönetim stratejilerini derinlemesine incelemişler ve bu stratejilerin enerjiye dönüşümünün ve sürdürülebilirliğinin nasıl sağlanabileceği konusunu tartışmışlardır. Hayat Döngüsü Değerlendirmesi ve Malzeme Akış Analizi (MFA) gibi modellerin kullanımını, lazer kesim teknolojisinin e-atıkların işlenmesinde nasıl entegre edilebileceğini göstermişlerdir (Kaviul İslam, 2024).

3. E-ATIKLARIN GERİ KAZANIMINDA İMALAT TEKNOLOJİLERİNİN KULLANIMI

E-atıkların çevre ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri göz önünde bulundurulduğunda doğru bir atık yönetimi ile geri kazanımlarının sağlanması büyük önem taşımaktadır. Bu durum e-atıkların içerisindeki değerli metalleri ve üretimlerinde kullanılan enerji ve işçilik maliyetlerini de düşündüğümüzde ekonomik açıdan da büyük kazanımlar sağlamaktadır. Bu çalışmada günümüz imalat teknolojilerindeki yeni gelişmelerin e-atıkların geri kazanımlarına hem çevresel açıdan hem ekonomik açıdan nasıl katkı sağlayabilecekleri ele alınmıştır.

3.1. Eklemeli İmalat (Additive Manufacturing) Yöntemi ile E-atık Yönetimi

Eklemeli imalat, imalat teknolojileri içerisinde önemli bir yeniliği temsil etmektedir, karmaşık şekillere sahip olanya da geleneksel yöntemlerle üretilmesi zor olan parçaların üretilmesinde kullanılabilmektedir. Bu teknoloji, tasarım özgürlüğünü artırmakta, malzeme israfını azaltmakta ve montaj işlemlerinin sayısını en aza indirmektedir. Ayrıca saf metalleri, alaşımları ve kompozitleri kapsayan geniş bir malzeme yelpazesine uygulanabilme özelliği vardır (Toprak, D., 2024).



Şekil 2. Eklemeli İmalat Teknolojisi için bir örnek

Kaynak: <https://www.bitsathy.ac.in>

Eklemeli imalatın yukarıda bahsedilen özelliklerinin e-atıkların geri kazanımında da kolaylıklar sağlayacağı düşünülmektedir. E-atıkların geri kazanımında eklemeli imalat üç türlü kullanılabilecektir;

- Bunlardan ilki atık haline gelen elektronik cihazların geri kazanımı aşamasında gerçekleşmektedir.

Eklemeli imalat teknolojileri ile e-atıklardan çıkarılan malzemeler 3D baskı için kullanılabilir hammaddeye dönüştürülebilmektedir. Devre kartlarından geri kazanılan alüminyum ve bakır gibi metaller, eklemeli imalat uygulamaları için toz veya filament olarak yeniden işlenebilmektedir. Elektronik muhafazalardan çıkarılan polimerler de katkı süreçlerinde yeniden kullanılarak işlenmemiş kaynaklara olan talebi azaltabilmektedir (Gupta vd., 2021).

- İkincisi ise elektronik cihazların onarımı aşamasında gerçekleşmektedir. Eklemeli imalat kullanılarak elektronik cihazın içerisinde bulunan özel parçalar ve elektronik bileşenlerin yeniden üretilmesi ve onarılması sağlanabilmektedir. Bu sayede sadece elektronik cihazların yaşam döngüsünü uzarken aynı zamanda yeni atık oluşumu da azaltılmaktadır (Binnemans vd., 2015).
- Üçüncü olarak eklemeli imalat ile elektronik cihazlara tasarım esnekliği kazandırılabilir. Eklemeli imalat, elektronik cihazların tasarım aşamasında geri dönüştürülebilirliğini ve demontajını kolaylaştıracak şekilde yeniden tasarlanmasına olanak tanımaktadır. Bileşenler, değerli malzemelerin kolayca ayrıştırılması için optimize edilebilir ve böylece daha verimli geri dönüşüm süreçleri sağlanabilir (Tey vd., 2020).

Bu sayede eklemeli imalat ile gerekli miktarda hammadde kullanımı sağlanarak malzeme israfının önüne geçilebilmekte, kullanılan kıymetli metallerin de daha verimli kullanılması sağlanmaktadır. Ayrıca bağlayıcı püskürtme ve SLS gibi enerji tasarruflu eklemeli imalat teknolojileri

sürdürülebilir atık yönetimine katkıda bulunmaktadır (Gök, Yılmaz 2023)

3.2. Lazer Kesim Teknolojileri ile E-atık Yönetimi

Lazer kesim teknolojisi, yüksek hassasiyet ve verimlilik ile metal, plastik ve diğer malzemeleri kesmeve delme yeteneğine sahip bir yöntemdir. Bu teknolojinin e-atıkların ayrıştırılması sürecinde de ve atıkların geri kazanımı işlemlerinde önemli bir rol oynayacağı düşünülmektedir. E-atıkların geri dönüştürülmesinde, bu teknoloji özellikle karmaşık yapılar ve çoklu malzeme katmanları içeren cihazların ayrıştırılmasında avantaj sağlamaktadır (Choi & Lee, 2018). Birçok elektronik cihaz, çoklu malzeme katmanlarını içermekte ve bu katmanların ayrılması karmaşıklıklara sebep olabilmektedir. Lazer kesim, bu tür cihazları hızlı bir şekilde işleyerek, değerli metallerin ve diğer geri dönüştürülebilir materyallerin ayrılmasında fayda sağlamaktadır (Zhang et al., 2019).



Şekil3. Lazer Kesim Teknolojisi için bir örnek

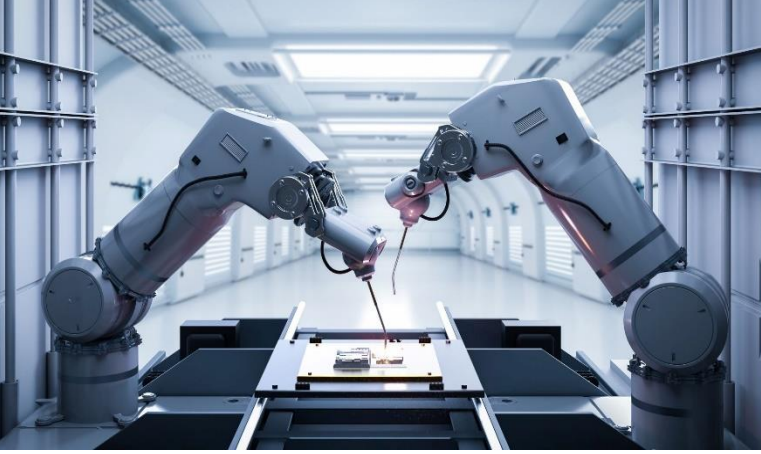
Kaynak: <https://www.pmcmetal.com>.

Lazer kesim teknolojisinin e-atık yönetimindeki kullanımı, atıkları yüksek hassasiyetle parçalayarak geri dönüşüm sürecini iyileştirmekte ve çevreye olan olumsuz etkileri azaltmaktadır. Bu teknoloji ile e-atık yönetim süreçlerinin daha verimli hale gelmeksi beraberinde maliyetleri de önemli ölçüde azaltacaktır. Lazer kesim, geleneksel yöntemlere kıyasla daha az enerji tüketen ve malzeme kaybını en aza indiren bir yöntemdir. Bu durum da hem çevresel hem de ekonomik açıdan avantaj sağlamaktadır (Kim vd., 2020). Bu avantajlar da doğal kaynakların daha sürdürülebilir ve işletmelerin kaynaklarının daha verimli kullanmasını beraberinde getirmektedir. Lazer kesim teknolojisi aynı zamanda daha hızlı işlem yapabilme özelliğine sahip olduğu için, atık yönetimi sürecinde zamandan da tasarruf ettirecektir. Ayrıca bu teknoloji kesim işlemi sırasında sıcaklık kontrolünü daha hassas bir şekilde yaptığından e-atıklarda bulunan toksik maddelerin yayılmasını da engellemektedir (Huang vd., 2021). Bütün bu avantajlar işletmelerin üretim süreçlerini hızlandırmasına, iş gücü verimliliğinin ve rekabet gücünün artmasına büyük katkıda bulunmaktadır.

Sonuç olarak, lazer kesim teknolojisi e-atık yönetiminde önemli bir rol oynamaktadır. Bu teknoloji sayesinde atık miktarı azalmakta, maliyetler düşmekte ve çevresel etkiler en aza indirilmektedir. İşletmelerin lazer kesim teknolojisini kullanarak atık yönetimi süreçlerini daha verimli hale getirmeleri, hem çevre hem de ekonomik açıdan büyük faydalar sağlayacaktır. Atık yönetimi konusunda daha sürdürülebilir ve rekabetçi bir yaklaşım benimsemek için lazer kesim teknolojisi kesinlikle önemli bir çözüm olarak görülmelidir. Lazer kesim teknolojisinin daha geniş bir şekilde benimsenmesi, e-atık geri dönüşümünde verimliliği artıracak ve olumsuz çevresel etkileri azaltacaktır.

3.3. Robotik ve Otomasyon Teknolojileri ile E-Atık Yönetimi

E-atık geri kazanımının etkili bir şekilde yönetilmesi, verimliliğin artırılması ve tehlikeli süreçlerde insan müdahalesinin azaltılması için yenilikçi otomasyon teknolojilerinin ve robotların kullanılması gerekmektedir. Bu teknolojiler, e-atıkların işlenmesinde hassasiyeti, hızı ve güvenliği artırarak sektörde devrim yaratma potansiyeline sahiptir.



Şekil 4. Robotik ve Otomasyon Teknolojileri için bir örnek

Kaynak: <https://aryaotomasyon.>

Robotik ve otomasyon teknolojileri, e-atık yönetiminde dönüştürücü çözümler olarak ortaya çıkmıştır ve ayıklama, sökme ve geri dönüşümde gelişmiş çözümler sunmaktadır. Bu çözümler;

- Ayıklama Çözümleri; Makine öğrenimi algoritmaları kullanılarak atıklar içerisinde e-atıkların tespit edilmesi sağlanmaktadır ve belirlenen e-atıklar gelişmiş sensörler yardımı ile ayıklanabilmektedir. Optik sensörler, X-ışını floresanı ve yakın kızılötesi

spektroskopisi, malzemelerin hassas bir şekilde tanımlanmasını sağlayarak verimli geri dönüşümü kolaylaştırmaktadır (Ragaert vd., 2017). Örneğin, yapay zeka güdümlü görüş sistemleri ile donatılmış robotlar, başka atıklar içerisinde hem e-atıkları hem de e-atıklar içerisindeki farklı plastik ve metalleri ayırt edebilmektedir.

- Demontaj Çözümleri; E-atıkların demontaj işlemlerinin manuel olarak yapılması oldukça zaman alıcı ve içerisinde bulunan toksik metaller nedeni ile tehlikeli bir işlemdir. “Apple Daisy” söküm işlemi robotları gibi robotlar elektronik cihazları yüksek hızlarda parçalarına ayırabilmekte, nadir toprak metalleri gibi değerli malzemeleri geri kazanabilmekte ve insanlar için oluşabilecek riskleri ortadan kaldıracaktır (Apple Inc., 2022).
- Geri Kazanım Çözümleri; Parçalama, manyetik ayırma ve kimyasal geri kazanım işlemleri de dahil olmak üzere geri kazanım süreçlerinde otomasyon, verimliliği artırmaktadır. Ayrıca geri dönüşüm tesislerinde e-atıkların taşınması ve nakliyesinde robotik teknolojiler kritik bir rol oynayarak insanların tehlikeli maddelere maruz kalmasının önüne geçmektedir.

Geliştirilmiş yapay zeka algoritmaları, robotların e-atık bileşenlerinin değişkenliğine uyum sağlamasını ve karar verme sürecini iyileştirmesini sağlayacaktır. Robotik ve otomasyon teknolojileri sayesinde e-atık geri kazanımında işlem süreleri kısalarak verimlilikler artacaktır. Elektronik cihazların demontajı esnasında insanların toksik maddelere maruz kalması otomasyon teknolojileri ile en aza indirilebilecektir. Ayrıca

gelişmiş robotik sistemler sayesinde yüksek değerli metallerin geri kazanılması sağlanarak ekonomik açıdan da avantajlar elde edilecektir. Ancak bu avantajlara karşın robotik ve otomasyon sistemlerinin yatırım maliyetlerinin oldukça yüksek olması bu sistemlerin kullanılmasında ve yaygınlaştırılmasında en büyük engel olarak karşımıza çıkmaktadır.

4. SONUÇ

Bu çalışma ile imalat teknolojilerinden eklemeli imalat, lazer kesim teknolojileri, robotik ve otomasyon teknolojilerinin e-atık yönetimi üzerindeki etkinliğine ve sürdürülebilirliği kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. İncelem neticesinde varılan sonuçlar şu şekilde özetlenebilir;

- i. E-atıkların geri dönüşüm süreçlerinde kullanılan gelişmiş imalat teknolojilerinin tamamı e-atıkların işlenmesinde verimliliği artıracaktır. Özellikle robotik sistemler, sensör tabanlı ayrıştırma teknolojileri ve yapay zeka destekli süreçler, e-atıkların daha hızlı, hassas ve hatasız bir şekilde sınıflandırılmasını sağlamaktadır.
- ii. Eklemeli imalat özellikle elektronik bileşenlerin yeniden üretimi ve yeniden kullanılabilir parçalara dönüştürülmesi için önemli katkılar sunmaktadır. E-atık içindeki değerli metaller ve plastikler, eklemeli imalat teknolojisi ile yeniden şekillendirilebilmektedir. Böylece malzeme kaybı ve maliyetler en aza indirilerek, verimlilik ve ekonomiklik artacaktır.
- iii. İleri düzey imalat teknolojilerinin kullanılması, e-atıkların çevresel etkilerini en aza indirmekte ve doğal kaynakların daha verimli kullanılmasını sağlamaktadır. Özellikle, kapalı döngü geri dönüşüm süreçleri

sayesinde, materyallerin yeniden işlenmesi ve yeniden kullanımı ile kaynak tüketimi azaltılmaktadır. Ayrıca, bazı imalat teknolojileri, atıkların enerji üretiminde kullanılması gibi yeni sürdürülebilir çözümler sunmaktadır.

- iv. Geri dönüşüm süreçlerinde kullanılan otomasyon ve robotik sistemler, enerji tüketimini ve insan maruziyetini azaltırken süreç hızını ve doğruluğu artırmaktadır. Bu teknolojiler, daha az enerjiyle daha fazla e-atık işlenmesini sağlamaktadır.
- v. İmalat teknolojilerinin etkin bir şekilde kullanılması, ekonomik olarak da önemlidir. E-atıkların geri dönüştürülmesi, yeni ürünlerin üretim maliyetlerini düşürürken, aynı zamanda ekonomiye katkı sağlamaktadır.

Sonuç olarak küresel bir çevresel tehdit olan e-atıkların geri kazanımlarının artırılması amacı ile robotik sistemlerin, yapay zeka uygulamalarının, otomasyon teknolojilerinin ve yeni teknoloji imalat yöntemlerinin kullanımı artırılmalıdır. Özellikle bu teknolojilerin e-atıkların yönetiminde kullanımının yaygınlaştırılması amacı ile çeşitli teşvik sistemleri devreye alınmalıdır. Ayrıca, bu alanda üniversiteler ve araştırma kurumlarıyla işbirlikleri oluşturulmalıdır. Özellikle, imalat ve geri dönüşüm sektörlerinde çalışan kişilere yönelik eğitim programları düzenlenmeli ve bu alandaki yeni teknolojilere dair bilgi aktarımları sağlanmalıdır. Ayrıca, tüketicilere yönelik bilinçlendirme kampanyaları düzenlenerek e-atıkların geri dönüşüm sürecine dahil edilmeleri de gerekmektedir. Bu öneriler, e-atık yönetiminin verimliliğini artırmaya, olumsuz çevresel etkilerini azaltmaya ve kıt kaynakları daha verimli kullanmaya yönelik stratejik adımlar sunmaktadır.

5. KAYNAKÇA

- Akgümüş Gök, S., Yılmaz, M. (2023). Katmanlı imalat teknolojilerinin karşılaştırılmasına yönelik bir araştırma. *Journal of Advanced Manufacturing Technologies*, 13(3), 517-537.
- All noman, A., Habiba Akter, U., Hasan Pranto, T., & Bahalul Haque, A. K. M. (2022). Machine Learning and Artificial Intelligence in Circular Economy: A Bibliometric Analysis and Systematic Literature Review.
- Althaf, S. (2019). Sustainability Implications of Consumer Electronics Adoption in the United States.
- Apple Inc. (2022). Environmental Progress Report. Retrieved from [Apple's Environmental Reports](#)
- Balde, C. P., Forti, V., Gray, V., Kuehr, R., & Stegmann, P. (2020). The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential. United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU), and International Solid Waste Association (ISWA).
- Binnemans, K., Jones, P. T., Blanpain, B., Van Gerven, T., & Pontikes, Y. (2015). Towards zero-waste valorisation of rare-earth-containing industrial process residues: a critical review. *Journal of Cleaner Production*, 99, 17-38.
- Choi, Y. J., & Lee, S. H. (2018). Application of laser cutting technology in e-waste recycling. *Journal of Environmental Management*, 220, 235-245. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.04.001>

Forti, V., Baldé, C. P., Kuehr, R., & Bel, G. (2020). The Global E-waste Monitor 2020. United Nations University (UNU).

Gupta, S. K., Gugulothu, S. B., Ivanov, E., Suwas, S., & Chatterjee, K. (2024). Additive Manufacturing of a Low Modulus Biomedical Ti-Nb-Ta-Zr Alloy by Directed Energy Deposition. Bioprinting, e00349.

<https://aryaotomasyon.com.tr/hizmetler/robotik-otomasyon/>

<https://www.bitsathy.ac.in/blog/the-evolution-of-additive-manufacturing-materials/>

<https://www.isoyesilblog.com/dunyanin-en-hizli-buyuyen-atik-yigini-e-atiklar/>

<https://www.pmcmetal.com/lazer-kesim-dikkat-edilmesi-gerekenler/>

Huang, Z., Li, J., & Zhang, J. (2021). Environmental benefits of laser cutting technology in e-waste recycling. Waste Management, 56, 93-101.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.09.019>

Islam, M. K., Khatun, M. S., & Mourshed, M. (2024). An in-depth analysis and review of management strategies for E-waste in the south Asian region: A way forward towards waste to energy conversion and sustainability. Heliyon.

Kaibara Portugaise, M., Jóhannsdóttir, L., & Murakami, S. (2023). Extended producer responsibility's effect on producers' electronic waste management practices in Japan and Canada: drivers, barriers, and potential of the urban mine.

- Kim, D., Lee, K., & Park, J. (2020). Laser cutting for efficient e-waste recovery and recycling: A review. *Materials Science and Engineering*, 90, 100-109. <https://doi.org/10.1016/j.mse.2020.03.015>
- Lepawsky, J. (2018). *Reassembling Rubbish: Worliding Electronic Waste*. MIT Press.
- Nascimento, D. L. M., Alencastro, V., Quelhas, O. L. G., Caiado, R. G. G., Arturo Garza-Reyes, J., & Tortorella, G. L. (2018). Exploring industry 4.0 technologies to enable circular economy practices in a manufacturing context: a business model proposal.
- Perkins, D. N., Brune Drisse, M. N., Nxele, T., & Sly, P. D. (2014). E-waste: A global hazard. *Annals of Global Health*, 80(4), 286-295. <https://doi.org/10.1016/j.aogh.2014.09.006>
- Ragaert, K., Delva, L., & Van Geem, K. (2017). Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*, 69, 24-58.
- Robinson, B. H. (2009). E-waste: An assessment of global production and environmental impacts. *Science of the Total Environment*, 408(2), 183-191.
- Srivastav, A. L., Markandeya, Patel, N., Pandey, M., Pandey, A. K., Dubey, A. K., ... & Chaudhary, V. K. (2023). Concepts of circular economy for sustainable management of electronic wastes: challenges and management options. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(17), 48654-48675.

- Tey, C. F., Tan, X., Sing, S. L., & Yeong, W. Y. (2020). Additive manufacturing of multiple materials by selective laser melting: Ti-alloy to stainless steel via a Cu-alloy interlayer. *Additive Manufacturing*, 31, 100970.
- Toprak, İ. B., & Dogdu, N. (2024). Multi-Objective Optimization Study on Production of AlSi10Mg Alloy by Laser Powder Bed Fusion. *Applied Sciences*, 14(22), 10584.
- Zhang, W., Zhang, L., & Wang, X. (2019). Laser cutting and its application in the recycling of electronic waste. *Waste Management & Research*, 37(12), 1150-1157. <https://doi.org/10.1177/0734242X19878614>

ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİNDE İLERİ ARAŞTIRMALAR

yaz
yayınları

YAZ Yayınları

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3

İscehisar / AFYONKARAHİSAR

Tel : (0 531) 880 92 99

yazyayinlari@gmail.com • www.yazyayinlari.com