

Noktasal Kaynaklar İçin Ulusal Hava Kirliliği Emisyon Faktörleri ve Envanterinin Belirlenmesi: Metal Sektörü İçin Örnek Bir Çalışma

Estimation of National Air Pollution Emission Factors and Inventory for Point Sources: Case Study for the Metal Sector

Hüseyin ÖZDEMİR^{1,2}, Muhammet Ali AKTAŞ³, İbrahim Ertuğrul YALÇIN¹,
Ümmügülüm ALYÜZ¹, Hatice Eser ÖKTEN⁴, H. Kurtuluş ÖZCAN³,
Canan Esin KÖKSAL⁵, İrde Çetintürk GÜRTEPE⁵, Göksel DEMİR⁶, Alper ÜNAL⁷

¹Bahçeşehir Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

²Agriconsulting Europe S.A., Çankaya, Ankara, Türkiye

³İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

⁴İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye

⁵Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Hava Yönetimi Dairesi Başkanlığı, Ankara, Türkiye

⁶Sağlık Bilimleri Üniversitesi, Hamidiye Sağlık Bilimleri Fakültesi, İş Sağlığı ve Güvenliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

⁷İstanbul Teknik Üniversitesi, Avrasya Yer Bilimleri Enst., İklim ve Deniz Bilimleri Ana Bilim Dalı, İstanbul, Türkiye

Öz

Hava kalitesinin korunması için yürütülen çalışmalar ve yasal uygulamalar, günümüzde çevre bilincinin artması ile daha da önemli hale gelmiştir. Yenilenebilir enerji kullanımının yaygınlaştırılması gibi çevre dostu düzenlemeler ile hava kalitesinin iyileştirilmesi artık ülke politikalarında yer almaktadır. Hava kalitesinin yükseltilmesine yönelik yasal düzenlemelerin hazırlanmasında mevcut durumun ortaya konması büyük önem taşımaktadır. Atmosfere verilen kirliliğin miktarının doğru olarak tespit edilebilmesi ve illerin temiz hava eylem planlarının hazırlanabilmesi için ulusal ölçekte, kaynaklarına göre hava kirlleticilerinin emisyon envanterinin hesaplanması, ulusal ve uluslararası sorumluluklar gereği atmosfere verdiğimiz emisyonların belirli periyotlarda raporlanması gerekmektedir. Bu nedenle, emisyon envanterinin belirli bir düzen içerisinde, kirlilik kaynaklarına ait veriler ve yerel emisyon faktörleri kullanılarak hazırlanması gerekmektedir. Bu çalışmada, Marmara Bölgesi pilot bölge seçilerek Çevre ve Şehircilik Bakanlığı ile birlikte ülkemizde ilk defa ulusal emisyon envanteri geliştirilmesi projesi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmadaki noktasal kaynaklar için yapılan kısım bu makalede anlatılmış ve metal sektörüyle ilgili elde edilen sonuçlar verilmiştir. Marmara Bölgesi'ndeki metal sektörünün emisyon envanteri hesaplamasında 27 tesisin 128 emisyon kaynak bilgisi kullanılmıştır. Ulusal emisyon faktörleriyle yapılan hesaplamalara göre emisyon değerleri; CO için 46.849 ton/yıl, SO₂ için 7.589 ton/yıl, NO_x için 8.906 ton/yıl ve TSP için 1.759 ton/yıl bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Hava kirliliği, emisyon faktörü, emisyon envanteri, noktasal kaynaklar, metal sektörü, Türkiye.

Abstract

The studies and legal policies carried out for the protection of air quality have become more critical with the increasing of environmental awareness today. Improving air quality with environmentally friendly regulations like promoting renewable energy use are now included in the country's policies. Evaluation of the current situation is of great importance in determining the policy for the improvement of air quality. In order to accurately determine the amount of emitted pollutants to the atmosphere and prepare clean air action plans for the cities, it is necessary to calculate the emission inventory of air pollutants according to their sources and to report the emissions emitted to the atmosphere at specific periods under the national and international responsibilities. Therefore, it is necessary to prepare the emission inventory in a particular order using information from sources of pollution and local emission factors. In this study, the Marmara Region was selected as the pilot region and the Development of National Emission Inventory project implemented for the first time in our country with the Ministry of Environment and Urbanization. The part for the point sources in this study is explained in this paper, and the results related to the metal industry are given. 128 emission sources of 27 plants were used in the calculation of the emission inventory of the metal sector in the Marmara Region. Emission values according to calculations made with national emission factors are as follows; 46,849 ton/year for CO, 7,589 ton/year for SO₂, 8,906 ton/year for NO_x, and 1,759 ton/year for TSP.

Keywords: Air pollution, emission factor, emission inventory, point sources, metal sector, Turkey.

I. GİRİŞ

Günümüzde sürekli artan çevre sorunlarından biri olan hava kirliliği, insan sağlığı ve doğa üzerinde olumsuz sonuçlara sebep olmaktadır. Hava kirliliği ve sağlık problemleri arasında önemli bir ilişki olduğu sayısız bilimsel çalışma ile kanıtlanmıştır. Hava kirliliği tek başına dünyadaki en büyük sağlık riskini oluşturmaktadır ki bunun en önemli göstergesi 2012 yılında 7 milyon civarında insanda dış ve iç ortamdaki hava kirliliğine maruziyetle ilişkili olarak ölüm vakası yaşanmasıdır [1]. Pope ve Dockery [2], hava kirliliğine kısa süreli maruziyet ile ölüm oranı

arasındaki sonuçları ortaya koyan yüzden fazla bilimsel yayını incelemiş, hava kirliliği seviyesindeki artışın ölüm oranını en az %2 oranında arttırdığını ve özellikle çocuklarda akciğer gelişiminin zayıflamasından zeka geriliğine kadar birçok olumsuz etkisi olduğunu ortaya koymuştur.

Hava kirliliğinin ekonomiye olan etkisi ise milyarlarca doları bulmaktadır. OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) tahminine göre dış ortam hava kirliliği 2010 yılında üye ülkeler için 1,57 trilyon dolarlık bir zarara sebep olmuştur [3]. Amerika Birleşik Devletleri'nde 83 kentsel alanda trafik sıklığının şehirlerdeki yakıt, zaman ve sağlık etkilerinin ekonomik açıdan ne kadar kayba sebep olduğu araştırılmıştır. Buna göre, bu şehirlerde meydana gelen trafik sıklığından kaynaklanan PM_{2.5} kirliliğinin yol açtığı sağlık problemlerinin ekonomiye kaybı 31 milyar dolar olarak hesaplanmıştır. Zaman ve yakıt israfı açısından ise 60 milyar dolarlık bir kayba yol açtığı tespit edilmiştir [4]. Bu sonuçlara rağmen, hava kirliliği gelişmiş ülkelerde bile başlıca sağlık risklerinden biri olmaya devam etmektedir. Uygulanmakta olan yasal düzenlemelere, emisyonların kısıtlanmasına, bazı kimyasal maddelerin kullanımının yasaklanmasına ve hava kalitesi standartlarında yapılan daha sıkı düzenlemelere rağmen dünya gittikçe büyüyen bir hava kirliliği sorunu ile karşı karşıyadır. Bu sorunla başa çıkabilmek için atmosfere salınan emisyonların miktarını belirlemek, probleme çözüm üretmenin ilk ve en önemli aşamasıdır [5].

Ülkemizde noktasal kaynaklar için yapılmış Emisyon Faktörü (EF) ve EE çalışmaları sınırlı sayıdadır. Bu çalışmalarda genellikle belirli sektörler veya şehirler seçilerek emisyon hesaplamaları yapılmış ve literatürde verilen (USEPA-AP42 veya EMEP) [6] EF'leri kullanılmıştır. Elbir vd. [7] gerçekleştirdiği çalışmada Ege Bölgesi'nde sanayi, evsel ısınma ve trafik kaynaklarının resmi istatistiklerine ve bilimsel ölçüm sonuçlarına dayanarak bir EE oluşturulmuştur. Canpolat vd. [8] yaptığı çalışmada, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği tarafından çimento fabrikalarında gerçekleştirilen PM, SO₂, NO₂ ve CO ölçüm sonuçlarını baz alarak EF'leri belirlemiştir. Elbir ve Müezzinoğlu [9] İzmir'de yaptığı çalışmada, birincil hava kirlleticileri için emisyonları hesaplamış ve kaynakları belirlemiştir. Karademir [10] yaptığı çalışmada, Kocaeli'deki 100 endüstriyel tesisin yanma ünitelerinde emisyon ölçümleri gerçekleştirmiş ve CO, PM, SO₂ ve NO₂ için EF'leri hesaplamıştır. Çetin vd. [11] Kocaeli ili için yaptıkları emisyon envanteri çalışmasında; PM, SO₂, NO_x ve CO için USEPA ve CORINAIR EF'leri kullanarak emisyon envanteri hazırlamıştır. Vardar ve Yumurtacı [12] tarafından yapılan çalışmada, 2007 yılında linyit kullanılan 13 termik santralden kaynaklanan emisyonların hesaplanması literatürdeki EF'ler kullanılarak yapılmıştır. İm [13], İm vd. [14], Markakis vd. [15]

tarafından İstanbul için yüksek çözünürlüklü EE geliştirilmiştir. Bu çalışmalar kapsamında hazırlanan Coğrafi Bilgi Sistemleri (GIS) tabanlı envanter, 2 km mekânsal çözünürlükte aylık, günlük ve saatlik emisyon değerlerini içermektedir. Alyuz ve Alp [16], yaptıkları çalışmada, Türkiye'deki ana endüstriler için 2010 yılına ait bir EE hazırlamıştır. Hesaplar CO₂, PM, SO_x, NO_x, VOC, NH₃ ve N₂O parametreleri için kontrollü ve kontrolsüz durumlara göre ayrı ayrı yapılmıştır.

Türkiye, büyüyen ekonomisi ve artan nüfusuyla dünyada en hızlı gelişmekte olan ülkelerden biridir. Ülkemizde hava kirliliği ise özellikle 1950'lerden sonraki hızlı nüfus artışı, kentleşme ve endüstrileşme sonucu artmıştır [17]. Kirliticilerin düzeyleri özellikle kış aylarında, ulusal/uluslararası sınır değerlerin üzerine çıkabilmektedir [14, 18]. Bu kirlilik insan sağlığını olumsuz etkilemekle birlikte, aynı zamanda ülke ekonomisinde çeşitli şekillerde kayıplara neden olmaktadır. Bu nedenle, hava kirliliğinin azaltılmasına yönelik yasal düzenlemelerin belirlenmesinde atmosfere verilen kirliticilerin miktarının tespiti büyük önem taşımaktadır. Bu tespitin yapılabilmesi ve illerin temiz hava eylem planlarının hazırlanabilmesi için ulusal ölçekte, kaynaklarına göre hava kirliticilerinin emisyon miktarları ve dağılımlarının hesaplanması gerekmektedir.

Ulusal ve uluslararası sorumluluklar kapsamında hava kirliticilerinin miktarlarının belirli periyotlarda raporlanması gerekmektedir. Ülkemizin taraf olduğu "Birleşmiş Milletler Avrupa Ekonomik Komisyonu Uzun Menzilli Sınır Ötesi Hava Kirliliği Sözleşmesi" çerçevesinde, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından 2011 yılından bu yana ulusal hava kirliticileri EE ve bilgilendirici envanter raporları her yıl düzenli olarak hazırlanmaktadır [19]. Bununla birlikte, ülkemizde hava kirliticileri için uluslararası kabul görmüş bir metodolojiye dayanan ve yerel veriyle desteklenen ulusal hava kirliliği EE bu yayında anlatılan çalışmaya kadar bulunmamaktaydı. Literatürde bölgesel veya kaynak odaklı EF ve EE çalışmaları bulunmakla beraber, bütünsel bir yaklaşım çerçevesinde ülkemizin şartlarına uygun EF'leri belirleyen bir EE çalışması bulunmamaktadır. Amerika veya Avrupa koşullarına ve üretim tekniklerine bağlı olarak tespit edilmiş emisyon faktörleri ile yapılan hesaplamalar ülkemiz için gerçek durumu yansıtamamaktadır. Dolayısıyla, ülkemizin koşullarına özgü belirlenecek emisyon faktörleri ile daha gerçekçi hesaplamalar yapılabilecektir.

Hava kalitesi eylem planlarının oluşturup uygulamaya geçilmesi açısından hava kirliliği yönetim sisteminin ve bunun en önemli kısmı olan emisyon yönetim sistemlerinin geliştirilmesi Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından ülkemizin öncelikleri arasındadır. Bu yayında, TÜBİTAK tarafından desteklenen "Ulusal Hava Kirliliği Emisyon Yönetim Sisteminin

Geliştirilmesi” projesinin noktasal kaynak bölümü anlatılmıştır. Noktasal kaynaklar için EE hesaplamalarında kullanılmak üzere, emisyon iznine tabi tesislerin bulunduğu sektörlerde emisyon kaynaklarında ölçümler yapılarak ülkemize özgü EF’leri hesaplanmıştır. Bu amaçla, pilot bölge olarak seçilen Marmara Bölgesinde belirlenen tesislerde ölçümler gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen ilk sonuçlara ait veriler ve yapılan çalışmayla ilgili bilgiler ilerleyen bölümlerde paylaşılmış, noktasal kaynaklar için ülkemize özgü geliştirilen EF’leri ve buna göre hesaplanan EE metal sektörü için verilmiştir. Diğer sektörlerle ilgili sonuçların verileceği yayın çalışması ise devam etmektedir.

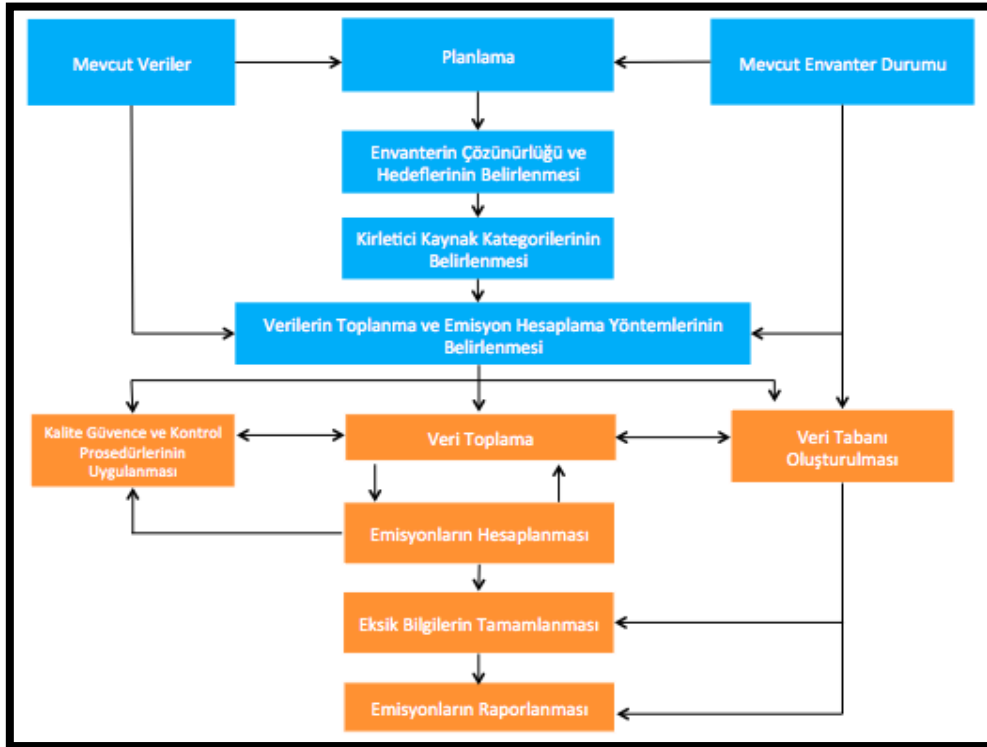
II. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Hava kirliliğinde **Emisyon**; fabrikalar, motorlu taşıtlar ve yerleşim birimleri gibi farklı kaynaklardan, yanma ve/veya üretim faaliyetleri sonucu atmosfere salınan hava kirleticileridir. Atmosfere birçok farklı kaynaktan salınan emisyonların hangi seviyede olduğunu değerlendirebilmek için, **Emisyon Envanteri (EE)** olarak tanımlanan, kirleticilerin atmosfere çeşitli kaynaklardan verilen yıllık miktarlarının bulunduğu, belirli bir zaman aralığında ve belirli bir coğrafi alan için doğru ve kapsamlı bir listesinin olması şarttır. Atmosfere verilen kirleticilerin miktarları ve türleri; ülkenin ekonomisine, endüstriyel faaliyetlerine, teknolojik gelişimine, trafik yoğunluğuna, yerleşim yerlerinin ısınma tiplerine ve diğer pek çok faktöre bağlı olarak yıllık bazda değişir. Bununla birlikte, yasal düzenlemeler ve kirleticilerin kaynaklarında kontrolleri

atmosfere verilen emisyonların miktarında önemli bir etkiye sahiptir. Genel olarak bir EE’nin hazırlanması için aşağıdaki adımlar izlenir:

- Kapsamlı bir plan yapılmalı ve envanterin amaçları tanımlanmalıdır,
- Seçilen coğrafi alan, çözünürlüğü ve zaman aralığı ile belirlenmelidir,
- Hangi kirleticilerin envanterde olacağı ve bunlar için hangi kaynak kategorilerine bakılacağı belirlenmelidir,
- Envanterde kullanılacak veriler için araştırmalar yapılmalıdır (hangi veri tipine ihtiyaç olacağı, bu verinin nereden ve nasıl temin edileceği),
- Veri toplama prosedürleri, hesaplamalarda hangi yöntem ve modellerin kullanılacağı, kalite güvence ve kalite kontrol (QA/QC) prosedürleri belirlenmelidir,
- Envanter sisteminin kullanılacağı yazılım altyapısı oluşturulmalıdır,
- Emisyonların hesaplanması ve envanterin raporlanması,
- Envanterin modelleme, strateji geliştirme, kontrol vb. çalışmalarında kullanılması.

Envanter için veri toplamaya başlamadan önce; kirleticiler (birincil kirleticiler, ikincil kirleticiler, toksik kirleticiler, sera gazları vb.), emisyon kaynakları (nokta, alan, çizgi vb.) ve envanterin coğrafi sınırları (şehir, bölge, ülke vb.) tanımlanmalıdır. Çeşitli faaliyetler ile hazırlanmış EE oluşturma yapısı Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. EE hazırlama adımları [5].

Envanter yapısı içinde, emisyonların yanında bir diğer önemli konuda kirliliğin kaynaklarıdır. Kapsamlı bir envanter, kirlilik kaynak kategorileri hakkında detaylı bilgi içermelidir. Emisyon kaynakları dört başlıkta toplanır; nokta kaynak (sanayi tesisleri gibi sabit emisyon kaynakları), hareketli/çizgi kaynak (motorlu taşıtlar, gemiler, uçaklar vb.), alan kaynak (organize sanayi siteleri, evsel ısınma vb.) ve doğal kaynak (volkanik patlama, orman yangını, sahra tozu, bitki örtüsü vb.).

Tablo 1. Emisyon kaynaklarının kaynak kategorileri (SNAP sektörleri).

SNAP	Kategoriler
SNAP 1	Enerji üretim sektörü
SNAP 2	Endüstriyel olmayan ısınma amaçlı yanma
SNAP 3	İmalat sektöründe yanma
SNAP 4	Üretim prosesleri
SNAP 5	Fosil yakıtların rafinasyonu ve dağıtımı
SNAP 6	Solvent ve benzeri ürünlerin kullanımı
SNAP 7	Karayolu ulaşımı
SNAP 8	Diğer mobil kaynaklar
SNAP 9	Atık arıtımı ve bertarafı
SNAP 10	Tarımsal faaliyetler
SNAP 11	Doğal ve diğer kaynaklar

Avrupa Birliği Çevre Ajansına bağlı Avrupa İzleme ve Değerlendirme Programı (EEA/EMEP, European Environment Agency/European Monitoring and Evaluation Programme), emisyon kaynaklarını Tablo 1'de verildiği gibi detaylandırarak 11 SNAP (Selected nomenclature for reporting of air pollutants) emisyon kaynak kategorisi ile sınıflandırmıştır [6]. Nokta kaynaklar, bir yıl içinde belirli bir emisyon eşliğinin (Tablo 2) üstündeki miktarda kirletici üreten sabit ve büyük emisyon kaynaklarıdır [5]. Bu eşik değerler, ülkeden ülkeye veya bölgeden bölgeye değişebilir. Nokta kaynaklar, elektrik üreten ve üretmeyen kaynaklar olarak da ikiye ayrılabilir. Enerji santralleri, petrol, metal, kimya ve çimento endüstrileri en önemli olanlarıdır. Noktasal kaynaklar arasında emisyon miktarı bazında kirletici vasfı yüksek olan tesisler; özellikle kömür kullanan enerji üretim tesisleri, petrokimya tesisleri, demir-çelik ve çimento üretim tesisleridir.

Tablo 2. Nokta kaynak emisyon eşik değerleri [5].

Kirletici	Emisyon eşığı (ton/yıl)
Karbon Monoksit	1.000
Azot Oksitler	100
Kükürt Oksitler	100
Partikül Madde $\leq 10 \mu\text{m}$	100
Partikül Madde $\leq 2,5 \mu\text{m}$	100
Kurşun veya Bileşikler	5
Uçucu Organik Bileşikler	100

Ülkemizde sanayi tesislerinden kaynaklanan hava kirliliğinin kontrolü Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından yapılmaktadır. Nokta kaynak kapsamındaki faaliyetler veya tesisler, Çevre izin ve lisans yönetmeliği ve eklerinde; üretim kapasitesi, kirletici vasfı, ürün cinsi vb. kriterler baz alınarak Ek-1 ve Ek-2 kapsamında sınıflandırılmıştır. İzne tabi olan işletmelerden kirletici vasfı yüksek olanlar (Ek-1) Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın merkez teşkilatı ve kirletici vasfı daha düşük olanlar ise (Ek-2) taşra teşkilatı tarafından denetlenmektedir [20].

EE'ne temel olarak; kirleticilerin miktarı ve kaynaklarının belirlenmesi, hava kalitesine mevcut ve gelecekteki etkiyi hesaplamak, yönetmeliklere uygunluğu belirleyebilmek, politika, yasa ve yönetmelik geliştirme, hava kalitesinin izlenmesi ve kontrol stratejilerinin geliştirilmesi için ihtiyaç duyulur. Günümüzde, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Sözleşmesine taraf olmak gibi küresel ölçekteki inisiyatiflerden ötürü birçok ülkede EE hazırlanması artık yasal bir gereklilik haline gelmiştir. Lokal ölçekte ise EE; bir tesisin mevcut emisyon izin koşullarına veya yönetmeliklerine uygunluğunun belirlenmesi, önerilen yeni tesislerin kurulumu için çevresel etki değerlendirme raporlarının hazırlanması ve hava kalitesi yönetimi kapsamında insan sağlığı risk değerlendirmesi çalışmalarına girdi olması için kullanılır.

Envanterin hazırlanması ile birlikte, belirli bir coğrafi alanda kirletici türlerini, mevcut miktarlarını ve kaynaklarını içeren bir veri tabanı elde edilir. Böylece, kirlilik kontrol stratejisi geliştirilmeden önce bir altyapı oluşturulmuş olur. Bir coğrafi alan için sadece emisyon türleri ve toplam miktarını bilmek çoğu zaman yeterli olmayabilir. Envanterin diğer bir kullanım amacı, bir bölgedeki kirleticilerin zamansal ve mekânsal dağılımını ortaya çıkarmaktır. Bir coğrafi alan için sadece emisyon türleri ve toplam miktarını bilmek çoğu zaman yeterli olmayabilir. Emisyonların etkisi, ne zaman ve nerede oluştuğuna bağlı olarak artabilir veya tam tersi azalabilir. Örneğin bir kirleticinin etkisi, güneşe veya neme maruz kalması ile artabilir ya da atmosferik koşullar kirleticiyi yoğunlaştığı alandan yeterince dağıtamayabilir. Bunları ancak tematik haritalar üreten ve envanter sistemini kullanan hava kalitesi model çalışmalarıyla görebiliriz.

Hava kalitesi yönetiminde, yüksek kirlilik seviyelerini izlemenin yanında, insan sağlığı veya çevre için risk oluşturan herhangi bir kirleticiyi limitlerin altında olsa bile daha da azaltmanın veya tamamen bertaraf etmenin yolları aranmalıdır. Bu hedefe ulaşabilmek için kirlilik kontrol stratejilerini uygulayacak olan kurumların elinde doğru hesaplanmış bir EE olması zorunludur. İyi hazırlanmış ve hata payı en aza indirilmiş bir envanter, ulusal hava kalitesi standartlarına uygunluğu sağlayabilmek için gerekli olan ilk bilgidir.

EE, hava kalitesi izleme istasyonlarını en doğru noktaya konumlandırmak için yardımcı olur. Böylece, bu istasyonlardan en doğru veriler alınarak değerlendirilir, ulusal hava kalitesi standartlarının aşılmış aşılmadığı izlenebilir ve kaynaklardan salınan kirlilik seviyesindeki değişimler takip edilir. Kamunun başka ihtiyaçları için de EE kullanılabilir. Örneğin, bir bölgedeki endüstriyel büyümenin izlenmesine ve raporlanmasına, yeni tesis başvurularının izni için bilgi sağlamaya yardımcı olur. Bu kapsamda, EE sistemi gerekli olabilecek yeni düzenlemeler için mümkün olduğunca esnek bir yapıda tasarlanmalıdır [5].

III. YÖNTEM

3.1. EE hesaplama yöntemleri

Emisyon tahmininde yukarıdan-aşağıya (top-down approach) ve aşağıdan-yukarıya (bottom-up approach) olmak üzere başlıca iki yaklaşım vardır. Birinci yaklaşımda, ulusal çaptaki aktivite verileri ve EF'leri kullanılarak emisyon hesabı yapılır. Aktivite verileri, emisyonla sebep olan kaynakların kendine özgü bilgilerini içerir. Örneğin; nüfus bilgisi, araç sayısı, tesis üretim verisi, kullanılan yakıt cinsi ve miktarı vb. Yukarıdan aşağıya yaklaşımın avantajı, çok az girdiye ihtiyaç duymasındır. Benzer emisyon kaynakları gruplanarak, mevcut aktivite ve EF verisi ile emisyon hesapları. Bu yaklaşımın zayıf tarafı ise emisyon hesaplarında büyük ölçekte yerel seviyeye inilerek hesaplamalar yapıldığı için belirsizlik ortaya çıkmasıdır. İkinci yaklaşımda ise her bir kaynak için emisyonlar hesaplanır ve sonrasında tüm kaynaklar için hesaplanan emisyonlar il, bölge ve ülke seviyesinde toplanır. Bu yöntem, emisyon kaynağına özel spesifik faaliyet bilgileri, aktivite verisi ve EF olmak üzere daha fazla ve detaylı bilgiye ihtiyaç duyar. Bu sayede sonuçlar, yukarıdan-aşağıya olan yaklaşımdan daha doğru sonuç verir, çünkü veriler doğrudan doğruya hesaplama yapılacak kaynaktan toplanır. Bu yaklaşımlarda, kirlilik kaynaklarından gelen emisyonları hesaplayabilmek için aşağıdaki yöntemler kullanılır:

- Sürekli emisyon ölçümleri:** Kirlilik kaynağında, yüksek zaman çözünürlüğünde ve sürekli olarak proses esnasında çıkan emisyonları ölçer ve kaydeder.
- Baca ölçümleri:** Emisyon verileri, bacada yapılan kısa süreli emisyon ölçümlerinden üretilir. Bu veriler daha sonra aynı veya benzer kirlilik kaynakları için uzun vadeli emisyonların hesaplanmasında kullanılabilir.
- Kütle dengesi/yakıt analizi:** Emisyonlar, prosese giren ve çıkan madde miktarı temel alınarak veya yakıt içeriği analiz edilerek hesaplanabilir.
- Emisyon faktörleri:** EF (birim kirlitici/birim aktivite), atmosfere verilen kirlitici miktarını, kirliticinin oluşmasına sebep olan faaliyetle

ilişkilendiren temsili bir değerdir. Seçilen faaliyet için üretilen madde miktarı veya kullanılan yakıt miktarı verisine ihtiyaç duyar. Belirli bir faaliyete özgü EF ile bu faaliyetin aktivite verisinin çarpımı çıkan emisyon miktarını verir.

- Emisyon tahmin modelleri:** Belirli kaynaklardan çıkan emisyonların ampirik yöntemlerle geliştirilmiş denklemler ile tahmin edilmesinde kullanılır. Modelleme yapılacak bölge, çalışma alanını ana hatlarıyla bölen grid denilen hücrelerle, örümcek ağına benzer bir şekilde parçalara ayrılır.
- Anket:** Emisyonları üreten prosesler ve kaynakları hakkında spesifik verileri elde etmek için kullanılır.
- Uzman görüşü:** Baca ölçümü, kütle dengesi veya EF gibi yöntemler mümkün olmadığında, konuyla ilgili ve emisyonun çıktığı prosesi bilen uzman mühendisin görüşü dikkate alınarak karar verilir.

EE'nin hazırlanmasında tercih edilen yöntemler ülkelere göre farklılık gösterebilir. Amerika'da EPA tarafından geliştirilen EF'leri (AP-42) kullanılırken, Avrupa Birliği'nde EMEP/EEA kılavuzlarında belirtilen EF'leri kullanılmaktadır. Bununla birlikte, envanter sistemindeki şablonlar, kodlandırma sistemleri, aktivite verileri, birimler vb. birçok noktada farklılıklar olabilmektedir.

3.2. Noktasal kaynaklar için EE'nin hesaplanması

Bu çalışmada EE'nin oluşturulması için ihtiyaç duyulan aktivite verileri, tesislere ait emisyon izin raporlarından elde edilmiştir. Raporlardaki verilerin bilgisayar ortamına uygun bir şekilde aktarılabilmesi için bir şablon hazırlanmıştır. Şablon başlıklarının belirlenmesi aşamasında, Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı (US-EPA) ve Avrupa İzleme ve Değerlendirme Programı'nın (EMEP) emisyon envanter sistemleri temel alınmıştır. Bununla birlikte, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın sanayi tesislerinden istediği "Emisyon İzin Belgeleri" ve "Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği" incelendi ve bunların sonucunda EE şablonunda yer alacak başlıklar belirlendi. EE şablonunda yer alacak başlıklar genel bilgiler, kodlandırma bölümü, üretim bilgileri, tüketilen toplam yakıt bilgisi, baca ve ölçüm bilgileri olmak üzere beş bölümde ele alındı. Hazırlanan bu şablon kullanılarak bilgisayar sistemine veri girişi yapıldı.

Genel bilgiler; sanayi tesisinin adresi, koordinatları, yönetmelikte yer aldığı grup vb. bilgileri içermektedir. Kodlandırma bölümü; ürün cinsi, NFR (Nomenclature For Reporting) ve SNAP kodlarını içermektedir. Ürün cinsi başlığı altında; ana üretimin tanımı, proses adı ve ürün cinsi bilgileri yer almaktadır. NFR ve SNAP kodları şablonun ve bu sistemin en kritik noktalarından biridir. NFR ana kategori gruplarını temsil eder, SNAP

kodları ise daha detaylı olarak prosesleri kodlandıran kısımdır. Bu kodların belirlenmesinde, tesislerin emisyon izin raporlarındaki üretim ve proses bilgileri, kapasite raporları ile birlikte EMEP kılavuzları (EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook) detaylı çalışılarak belirlenmiştir. Tesisin üretim bilgilerini içeren bölümde; tesisin yıllık çalışma süresi (ay), günlük vardiya sayısı, üretim kapasitesi ve birimi vb. bilgiler yer almaktadır. Yakıt bilgileri kısmında, proses ve yanma sistemleri için kullanılan yakıt bilgisi (yakıtın türü, miktarı ve birimi) bulunmaktadır. Üretim süreci ve yakma tesisi olarak iki başlık altında ısı güç miktarı ve birimi bilgileri toplanmaktadır. Baca ve ölçüm bilgileri kısmında, tesisin sahip olduğu bacalarda emisyon izin raporu için yapılan ölçüm sonuçları ve baca özellikleri yer almaktadır.

Öncelikli kategorilerin ve ölçüm yapılacak tesislerin belirlenebilmesi için Marmara Bölgesi'nde yer alan 11 ilin sanayideki durumları değerlendirilmiş ve buna göre İstanbul ilinin ilk sırada yer aldığı görülmüştür (Tablo 3). İstanbul aynı zamanda Türkiye sanayi sektörü üretiminin de yaklaşık %35'ini gerçekleştirmektedir [21]. Bursa ve Kocaeli ise Türkiye sanayisinin İstanbul'dan sonra gelişmiş en büyük illeri durumundadır. Bu iller ve Marmara Bölgesi'ndeki diğer illerde yer alan büyük üretim tesislerine ait detaylı bilgiler kullanılarak öncelikli kategoriler, sektörler ve bu sektörlerde ölçüme gidilecek tesisler belirlenmiştir.

Tablo 3. Marmara Bölgesi'nde illere göre sanayi verileri [22].

İl	Kapasite raporu sayısı	Çalışan personel sayısı
İstanbul	20.146 (%62,6)	658.896 (%46,9)
Bursa	5.004 (%15,5)	264.297 (%18,8)
Kocaeli	2.398 (%7,4)	186.881 (%13,3)
Tekirdağ	1.572 (%4,9)	129.711 (%9,2)
Sakarya	947 (%2,9)	57.133 (%4,1)
Balıkesir	902 (%2,8)	35.507 (%2,5)
Çanakkale	368 (%1,1)	13.523 (%1,0)
Kırklareli	331 (%1,0)	28.814 (%2,0)
Bilecik	319 (%0,9)	22.781 (%1,6)
Edirne	273 (%0,84)	14.908 (%1,0)
Yalova	204 (%0,6)	8.536 (%0,6)
Toplam	32.191	1.406.079

Emisyon hesaplamalarında 3 katmanlı (Tier) bir yaklaşım mevcuttur ve katmanlar arttıkça daha detaylı ve spesifik veriye ihtiyaç duyulur. Birinci katman (Tier 1) en basit hesaplama yöntemidir ve aktivite verisi ile

EF için varsayılan veriler kullanılır. İkinci katman (Tier 2) bir üst seviyedir ve çalışmanın yapılacağı ülkeye özel belirlenen EF'lerini kullanır (bu çalışmada ikinci katman kullanılmıştır). Üçüncü katman (Tier 3) en fazla veriye ihtiyaç duyulan en zor hesaplama yöntemidir ve emisyonun hesaplanacağı kaynağa özgü verileri gerektirir (yakıt türü, yakma teknolojisi, işletme koşulları vb.). Bu çalışmada geliştirilen EF'leri ülkemize özgüdür ve emisyon hesaplarında kullanılan genel denklem (1) aşağıda verilmiştir:

$$E_{kirlletici,sektor} = \sum_{Sektor} A_{yakit\ tüketimi} \times EF_{kirlletici,yakit,sektor} \quad (1)$$

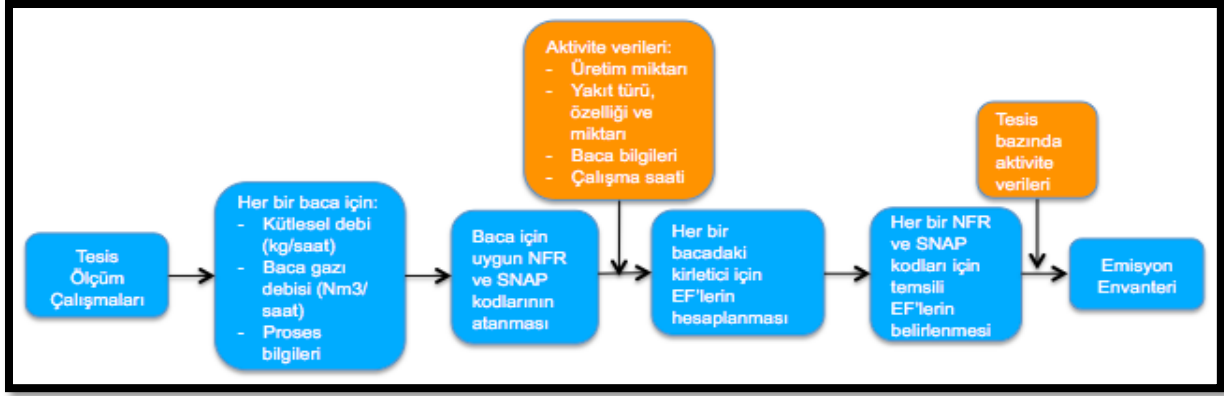
$E_{kirlletici, sektor}$: Sektör bazında her bir kirlletici için yıllık emisyon miktarı (ton/yıl),

$A_{yakit\ tüketimi}$: Yıllık yakıt tüketimi veya üretilen ürün miktarı,

$EF_{kirlletici}$: Kullanılan birim yakıt başına salınan kirlleticinin miktarı.

Türkiye'deki sanayi tesislerinin yanma ve proses faaliyetlerinden kaynaklanan hava kirlletici emisyonlarının envanterini oluşturmak için tesislerin kategorileri arasında bir öncelik sıralaması yapılması gerekmektedir [6]. Öncelikli kategorilerin belirlenmesi için envanter hazırlama sürecinde, emisyon bazında ulusal hava kirliliğine en fazla katkıda bulunan kaynaklar öncelikli olarak seçildi. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) tarafından geliştirilmiş ve EMEP/EEA [6] tarafından da uygulanan yaklaşıma göre öncelikli kategoriler, ulusal hava kirliliği emisyonlarına olan katkıları büyükten küçüğe doğru sıralanıp toplandığında kümülatif olarak toplam emisyonun %80'ini oluşturan kategoriler olarak tanımlanmaktadır. Bu amaçla öncelik sıralamasının yapılabilmesi için Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından, sanayi tesislerinden alınan emisyon izin belge ve raporları incelenerek ölçüm çalışmalarının yapılacağı sektör sıralaması oluşturulmuş ve bu sektörlerde ölçüm yapılacak tesisler belirlenmiştir.

Emisyon hesabının ikinci en önemli kısmı aktivite verilerinin toplanmasıdır. Emisyon izin belge ve raporları, hem aktivite verilerinin elde edilmesi hem de NFR ve SNAP kodlarının atanması için kullanılmıştır. Çalışma kapsamında bilgisayar ortamına girilmiş olan emisyon izin belge ve raporlarındaki yakıt ve proses verileri değerlendirilmiştir. Bu çalışma kapsamında pilot bölge olarak seçilen Marmara Bölgesi sınırları içerisindeki öncelikli tesislerde temsili ölçümler yapılmıştır. Bu amaçla 150 öncelikli tesiste ölçümler yapılmış ve sonuçlar elde edildikten sonra aktivite verileri de kullanılarak EF'leri ve EE'i hesaplanmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. Nokta kaynak EE hesaplama adımları.

Tesis ölçümleri, gerekli planlamalar (tesis seçimi, tesiste hangi emisyon kaynağında ölçümün yapılacağı vb.) yapılarak gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda ölçüm yapılacak tesislere bulunduğu ilin Çevre Müdürlüğü temsilcileri ile birlikte önceden haber verilmeden emisyon ölçümleri (yanma gazları ve toz) ölçüm standartlarına ve prosedürlerine uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. Ölçümler, toz hariç otomatik ölçüm cihazları vasıtasıyla anlık olarak gerçekleştirilmiştir. Toz örnekleme izokinetik şartlarda belirli sayıda noktadan ve belirli sürelerde numune alınması ile sağlanmış ve daha sonra numune laboratuvarında tartılmıştır. Bacada gaz konsantrasyonu tayini için elektrokimyasal sensör ölçüm prensiplerine göre çalışan MADUR GA 21 PLUS, gravimetrik örnekleme için ise Zambelli Isoplus toz örnekleme cihazı kullanılmıştır.

3.3. Veri kalite güvence ve kontrolü (QA/QC)

Emisyonun hesaplama adımlarında en doğru sonucu yakalamak kolay değildir. Bu nedenle çalışmada, kalite güvence ve kontrol prosedürleri (QA/QC, Quality Assurance and Quality Control) uygulanmıştır. Bu prosedürleri uygulamanın amacı; toplanan verilerde, EF ve EE üretim süreçlerindeki güvenilirliği arttırmak, oluşabilecek hataları minimize etmektir. Kalite Güvence (QA) ile hesaplama süreçlerinde olabilecek hataların önlenmesi hedeflenmiştir. Bunun için EF ve EE geliştirme ve test süreçleri iyileştirilmeye çalışılmış, yapılan çalışmalar sürekli kontrol ve incelemelerden geçirilmiştir. Bu sürecin objektif değerlendirilebilmesi için çalışmayı yürüten kurumların dışında, bağımsız kişiler tarafından da incelemeler ve kontroller yürütülmüş, her altı ayda bir bağımsız uzman hakemler ve TÜBİTAK uzman personeli tarafından süreçler (toplanan veriler, hesaplama yöntemleri vs.) incelenip kontrol edilmiştir. Bilgisayar ortamına aktarılan nokta kaynaklara ait aktivite verileri kontrol edilmiştir. Tesis ölçüm çalışmaları için çalışma ekibi, ölçüm için en uygun emisyon kaynağını seçmiş ve ölçüm esnasında kontrolleri yapılmış, böylece ölçümlerden en doğru sonuç elde edilmeye çalışılmıştır. Emisyon kaynakları için en uygun NFR-SNAP kodlarının atanması sağlanmış, bu adımda atanan kodlar çalışma ekibi

tarafından kontrol edilmiştir. Kalite Kontrol (QC) kapsamında, hesaplama süreçleri sonucunda elde edilen sonuçlar kontrol edilip varsa hatalar düzeltilmiştir. Bunun için teknik kontroller (girdi olarak kullanılan verilerin kalite kontrolleri), sonuçların istatistiksel değerlendirmeleri (EMEP ve literatürdeki diğer sonuçlarla kıyaslamalar vb.) yapılmış, toplanan veriler ve elde edilen çıktılar kayıt altında tutulmuştur. Uygulanan bu prosedürlerle nihai hale gelen EF'lerinin ve EE'nin doğruluğu ve hassasiyeti artmış, model çalışmaları ve kontrol stratejilerinde kullanılmak için hazır hale gelmiştir.

QA/QC bir plan dahilinde tüm EE çalışmalarındaki; verinin toplanması ve işlenmesi, envanterin derlenmesi, envanter hesaplamalarının tek bir veri tabanında birleştirilmesi ve raporlama adımlarını en doğru şekilde düzenlemek ve uygulamak için kullanılır. EE'nin hazırlanmasında kaynak kategorileri için aktivite verileri ve EF'leri gibi giriş verileri toplama süreçlerinin kalite kontrolü, kullanılan verilerin izlenebilir ve prosedüre uygun olmasını sağlamayı amaçlamaktadır. QA/QC çalışmalarında uygulanan prosedürlere aşağıda bazı örnekler verilmiştir:

- Emisyon hesaplamalarında kullanılan giriş verilerinin kaynağının güvenilirliğinin ve güncelliğinin kontrolü,
- Hesaplama tablolarında birimlerin doğru bir şekilde belirtilmesi,
- Birden fazla kategoride ortak kullanılan parametreleri tespit edip, emisyon hesaplamalarında kullanılan bu parametrelerin değerlerindeki tutarlılığın kontrolü,
- Çift hesaplama veya giriş olup olmadığının kontrolü,
- Hesaplamalarda kullanılan birimlerin ve birim dönüşümlerinin kontrolü.

IV. BULGULAR

Metal endüstrisi, özellikle demir-çelik sektörü yüksek miktarda hammadde ve enerjiye ihtiyaç duymaktadır. Demir-çelik üretiminde girdi olarak kullanılan kütleli yarım tonluk emisyon, katı atık ve yan ürün (demir tozu, cüruf vb.) olarak çıkar. Bu nedenlerle, metal

endüstrisinde bulunan tesislerin toplam emisyonu katkısı önemli seviyededir ve kirlenici vasfı yüksek tesisler arasında yer almaktadır. Avrupa’da, demir-çelik sektöründe üretim ve işleme prosesleri sırasında ortaya çıkan emisyonların (özellikle ağır metal, dioksin ve furan) toplam emisyonunda önemli bir payı vardır [6]. Bu çalışmada nokta kaynaklara ait en önemli sektörlerden biri olan metal sektörü için hesaplanan EF ve EE değerleri aşağıdaki tablolarda verilmiştir.

Tablo 4’de verilen SNAP-NFR kodlarının açıklamaları şu şekildedir; 1.A.2.b-30308 kategorisi yakıt olarak kok/gaz/petrol kullanarak ikincil Çinko üretimi, 1.A.2.b-30309 kategorisi petrol/kömür/kok kömürü kullanarak ikincil Bakır üretimi, 1.A.2.b-30310 kategorisi petrol/gaz yakıt kullanarak ikincil Alüminyum üretimi, 1.A.2.a-30301 kategorisi yüksek fırın gazı / kok fırın gazını yakıt olarak kullanarak Sinter ve Peletleme yapan demir çelik üretim tesisleri, 2.C.1-40207 elektrikli fırın kullanan demir çelik tesisleri, 2.C.1-40209 yakma yapmayan Sinter ve Peletleme tesisleri, 2.C.3 Alüminyum üretimi, 2.C.7.a-

040309a Bakır üretimi, 2.C.7.c-40307 ise galvanizleme yapan metal üretim tesisleri ile ilgilidir. Tablo 4’teki NFR kategorilerinden 1.A.2.b, demir-dışı metal imalat sektöründe proseste yanma aktivitesini temsil etmektedir ve imalat sektöründe yanmayı temsil eden 1.A.2 kategorisinin alt kırılımlarından biridir. 1.A.2.a kategorisi, 1.A.2 NFR kategorisinin alt kırılımıdır ve demir-çelik imalat sektöründe proseste yanma aktivitesi için kullanılır. Tablo 4’teki 2.C.1, 2.C.3, 2.C.7.a ve 2.C.7.c NFR kategorileri, yanma dışındaki proseslerden kaynaklanan aktiviteleri temsil etmektedir.

Türkiye’nin toplam ham çelik üretiminin yaklaşık %75’i ark ocaklı tesisler, kalan ise entegre tesisler tarafından gerçekleştirilmektedir. 2015 yılında 31,5 milyon ton ham çelik üreten sektör, dünya sıralamasında Brezilya’nın ardından 9. sırada gelmektedir [23]. Tablo 5’te metal sektörü için EF^a ve EF^b’ye göre hesaplanan EE kıyaslamalı olarak verilmiştir.

Tablo 4. Metal sektörü için hesaplanan EF^a ve EMEP EF^b (g/ton).

NFR Kodu	SNAP Kodu	Kirlenici	EF ^a			EF ^b	%95 güven aralığı		EF ^a / EF ^b
			Ort.	Min.	Mak.		Alt sınır	Üst sınır	
1.A.2.b	30308	SO ₂	3.376,1±2.209,2	1.236,0	7.264,0	12.200,0	9.150,0	20.000,0	0,3
		CO	153,9±8,6	146,1	163,2	4.690,0	2.000,0	11.000,0	3,3x10 ⁻²
	30309	SO ₂	2,7±1,8	0,6	3,9	1.230,0	500,0	3.000,0	2,2x10 ⁻²
		NO _x	179,8±15,3	167,4	195,8	400,0	73,9	1.570,0	0,4
		NO _x	250,6±304,7	55,1	780,9	413,0	280,0	610,0	0,6
30310	SO ₂	44,3±35,5	10,8	81,5	285,0	220,0	170,0	0,2	
1.A.2.a	30301	CO	7.942,9±8.715,3	440,7	3.5102,9	18.000,0	8.780,0	37.000,0	0,4
		SO ₂	209,1±175,1	63	732,7	463,0	220,0	973,0	0,5
2.C.1	40207	CO	620,0±1.350,0	0,1	4.240,0	1.700,0	0,7	3,9	0,4
		SO ₂	14,7±30,5	3	98,8	60,0	24,0	130,0	0,2
		NO _x	66,7±140,7	4	394,1	130,0	120,0	140,0	0,5
		TSP	4,2±9,5	1,8	37,9	30,0	1,0	780,0	0,1
	40209	TSP	16,5±17,9	1,8	53	50,0	20,0	130,0	0,3
2.C.3	-	TSP	238,0±27,0	29,5	554,1	2.000,0	1.000,0	4.000,0	0,1
2.C.7.a	040309a	TSP	17,8±13,6	3,2	29,4	320,0	100,0	1.000,0	0,1
2.C.7.c	40307	TSP	23,1±26,6	3,9	79,1	800,0	600,0	1.200,0	2,9x10 ⁻²

Not: EF^a bu çalışmada hesaplanan ulusal faktörlerimizi temsil etmektedir, EF^b ise EMEP faktörleridir.

Tablo 5. Metal sektörü için hesaplanan EE^a ve EE^b değerleri (ton/yıl).

	CO	SO ₂	NO _x	TSP
EE ^a	46.848,7	7.589,5	8.906,3	1.759,2
EE ^b	113.178,7	28.287,4	7.221,8	16.015,9
EE ^a / EE ^b	0,4	0,3	1,2	0,1

Metal sektörü için NFR ve SNAP kategorilerine göre ayrı ayrı hesaplanan EF^a ve EF^b değerleri kirleticilere göre yukarıda Tablo 4'te, bu sektörden kaynaklanan emisyonlar ve oranları ise Tablo 5'te verilmiştir. Bu çalışmada, Marmara Bölgesi metal sektörü için emisyon envanteri hesaplaması için 27 tesisin 128 emisyon kaynak bilgisi kullanılmıştır. Bu tesislerin illere göre dağılımı; Kocaeli'nde 9, İstanbul'da 6, Tekirdağ'da 4, Bursa'da 3, Bilecik'te 2, Çanakkale, Kırklareli ve Sakarya'da 1'er tesistir.

V. SONUÇLAR

Hava kalitesi yönetiminde politika belirleyebilmek için mevcut durum tespiti büyük önem taşımaktadır. Bunun için ulusal ölçekte ve kaynaklarına göre kirleticilerin miktarları hesaplanmalıdır. Aynı zamanda, ulusal ve uluslararası sorumluluklarımız gereği hazırlanacak bu envanterin belirli periyotlarda raporlanması gerekmektedir. Ülkemize ait böyle bir çalışmayı yapabilmek için temel olarak; kirlilik kaynaklarına ait bilgilerin toplanmasına, sürekliliği olacak bir sisteme işlenmesine, veri akışını sağlayacak sistemin ve paydaşların görev ve sorumluluklarının belirlenmesine ve elde edilen verilerin girişini sağlayacak yazılım ortamının oluşturulmasına ihtiyaç vardır.

Bu ihtiyaçların giderilmesine yönelik olarak, TÜBİTAK Kamu Kurumları Araştırma ve Geliştirme Projelerini Destekleme Programı kapsamında desteklenen proje ile ülkemizde ilk defa "Ulusal Hava Kirliliği Emisyon Yönetim Sistemi" Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'na kurulmuştur. Bu çalışmada; ülkemizde ilk defa web tabanlı hava kirleticileri emisyon yönetim portalı geliştirilmiş, pilot bölge olarak seçilen Marmara Bölgesi için EE hazırlanmış, nokta, alan ve çizgi kaynaklar için ölçümlere dayalı ulusal EF'leri hesaplanmıştır. Ayrıca, dünyada örnek teşkil edecek şekilde meteoroloji ve hava kalitesi modellerinin kullanıcı dostu ara yüzler ile yazılım üzerinden EE sistemine entegre edilerek çalıştırılması sağlanmış, emisyon dağılımı gibi tematik haritalar oluşturulmuştur.

Bu çalışmaya temel olan TÜBİTAK projesi kapsamında oluşturulan veri tabanı ve emisyon hesaplama sistemi ile pilot bölge için elde edilen EE, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'na teslim edilmiştir. Çalışma kapsamında hazırlanan EE yönetim sistemi; veri tabanı modülü, hesaplama modülleri, özet raporlama sistemi, hava kalitesi model sistemi ve diğer yardımcı ve tematik portal elemanlarından oluşmaktadır. Sistem ayrıca EE verisinin hava kalitesi modeli için uygun hale getirilmesini sağlamaktadır.

Envanter sistemlerinin doğası gereği elde edilen sonuçların ve sistemin dinamik olması gerekmektedir. Bu nedenle, oluşturulan sistem geliştirmeye ve güncellemelere açık bir şekilde tasarlanmıştır. Bu çalışmada elde edilen deneyimler doğrultusunda, bundan sonraki çalışmalarla birlikte sistem daha ileri

götürebilir. Örneğin, portala kirletici yükü yüksek tesislerdeki sürekli emisyon ölçüm sistemleri entegre edilerek ve tesise ait zaman bazında yüksek çözünürlüklü aktivite verilerinin (kapasite, hammadde, yakıt verisi, teknoloji vb.) kullanılması sağlanarak daha doğru ve belirsizliği düşük emisyon hesaplarına ulaşılabilir.

Bu çalışmanın sonucunda, hava kalitesinin değerlendirilmesi ve iyileştirilmesine yönelik çalışmaların en verimli şekilde yapılmasına olanak sağlayacak, Avrupa Birliği kılavuzlarındaki metodolojiye dayanarak hazırlanmış ulusal hava kirliliği EE sistemi ve portalı geliştirilmiş oldu. Bu sistem hava kirleticilerini kaynaklarına göre gruplandırarak, ulusal ölçekte emisyon miktarlarını ve dağılımlarını ortaya koyabilme kapasitesine sahiptir. Portal aynı zamanda karar destek mekanizması olarak da görev yapacak, hedefe odaklı önlemler ve daha etkin politikalar geliştirilebilecektir. Bu sistem ayrıca EE verisinin hava kalitesi modeline aktarılmasına uygun şekilde tasarlanmış olup, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından hava kalitesinin iyileştirilmesi planlarının kantitatif olarak yapılabilmesine olanak sağlayacak özelliktedir. Geliştirilen sistemin ve bu çalışmanın en büyük kazanımı, ülkemize özgü EF'lerinin ve envanter sisteminin ortaya çıkmış olmasıdır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Kamu Kurumları Araştırma ve Geliştirme Projelerini Destekleme Programı (1007 Programı) kapsamında 111G037 nolu proje ile TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] WHO. (2014). World Health Organization. <http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2014/air-pollution/en/>.
- [2] Pope, C.A., Dockery, D.W. (2006). Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines That Connect. *J. Air and Waste Management*, 56: 709-742.
- [3] OECD. (2014). The Cost of Air Pollution: Health Impacts of Road Transport. OECD Publishing, Paris. <http://dx.doi.org/10.1787/9789264210448-en>.
- [4] Levy, J.I., Buonocore, J.J., Stackelberg, von, K. (2010). Evaluation of the public health impacts of traffic congestion: a health risk assessment. *Environmental Health*, 9(1), 65. doi:10.1186/1476-069X-9-65.
- [5] EPA. (2003). United States Environmental Protection Agency. Principles and Practices of Air Pollution Control, Student Manual, Second Edition, Chapter 8.
- [6] EMEP/EEA. (2013). Air pollutant emission inventory guidebook, Technical guidance to prepare national emission inventories. *European Environment Agency*, Doi: 10.2800/92722.

- [7] Elbir, T., Müezzinoğlu, A., Bayram, A., Seyfioğlu, R., Demircioğlu, H. (2001). Ege Bölgesi Hava Kirlenici Emisyon Envanteri. *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 3: 21-27.
- [8] Canpolat, B.R., Atımtay, A.T., Munlafalioglu, I., Kalafatoglu, E., Ekinci, E. (2002). Emission Factors of Cement Industry in Turkey. *Water, Air and Soil Pollution*, 138: 235-252.
- [9] Elbir, T.; Muezzinoglu, A. (2004). Estimation of emission strengths of primary air pollutants in the city of Izmir, Turkey. *Atmospheric Environment*, 38, (13): 1851-1857.
- [10] Karademir, A. (2006). Evaluation of the potential air pollution from fuel combustion in industrial boilers in Kocaeli, Turkey. *Fuel*, 85: 1894-1903. Doi:10.1016/j.fuel.2006.01.026.
- [11] Çetin, Ş., Karademir, A., Pekey, B., Ayberk, S. (2007). Inventory of emissions of primary air pollutants in the city of Kocaeli, Turkey. *Environ Monit Assess*, 128: 165-175. DOI 10.1007/s10661-006-9302-x.
- [12] Vardar, N., Yumurtacı, Z. (2010). Emissions estimation for lignite-fired power plants in Turkey. *Energy Policy*, 38: 243-252.
- [13] İm U., Incecik, S., Markakis, K., Kindap, T., Poupkou, A., Yenigun, O., Odman, M.T., Topcu, S., Tayanc, M., Melas, D. (2009). An investigation of high summertime ozone levels in Istanbul. *30th NATO/SPS International Technical Meeting on Air Pollution Modeling and its Application*, 18-22 May 2009, San Francisco, USA.
- [14] İm, U., Markakis, K., Unal, A., Kindap, T., Poupkou, A., Incecik, S., Yenigun, O., Melas, D., Theodosi, C., Mihalopoulos, N. (2010). Study of a winter PM episode in Istanbul using the high resolution WRF/CMAQ modeling system. *Atmospheric Environment*, 44: 3085-3094.
- [15] Markakis, K., Im, U., Unal, A., Melas, D., Yenigun, O., Incecik, S. (2012). Compilation of a GIS based high spatially and temporally resolved emission inventory for the greater Istanbul area, *Atmospheric Pollution Research*, 3: 112-125.
- [16] Alyuz, U., Alp, K. (2014). Emission Inventory of Primary Air Pollutants in 2010 from Industrial Processes in Turkey. *Science of the Total Environment*, V(488-489): 369-381.
- [17] Ozdemir, H., Unal, A., Kindap, T., Turuncoglu, U.U., Durmusoglu, Z.O., Khan, M., Tayanc, M., Karaca, M. (2011). Quantification of the urban heat island under a changing climate over Anatolian Peninsula, *Theoretical and Applied Climatology*, DOI 10.1007/s00704-011-0515-8.
- [18] Ozdemir, H., Pozzoli, L., Kindap, T., Demir, G., Mertoglu, B., Mihalopoulos, N., Theodosi, C., Kanakidou, M., Im, U., Unal, A. (2014). Spatial and temporal analysis of black carbon aerosols in Istanbul megacity. *Science of The Total Environment*, V(473-474): 451-458.
- [19] Gürtepe, İ.Ç., Köksal, C.E. (2014). Ulusal hava kirlenici emisyon envanteri. *Hava Kirliliği Araştırmaları Dergisi*, 3: 22-28.
- [20] TCCMBS. (2020). T.C. Cumhurbaşkanlığı Mevzuat Bilgi Sistemi. Çevre İzin ve Lisans Yönetmeliği. <https://www.mevzuat.gov.tr/>.
- [21] İSO. (2017). İstanbul Sanayi Odası. <http://www.iso.org.tr/kurumsal/tarihce-ve-turkiye-ekonomisindeki-yeri/>.
- [22] TÜİK. (2016). Türkiye İstatistik Kurumu. http://www.tuik.gov.tr/PreTablo.do?alt_id=1035.
- [23] Ekonomi Bakanlığı. (2016). Demir-Çelik, Demir-Çelikten Eşya Sektörü. İhracat Genel Müdürlüğü - Maden, Metal ve Orman Ürünleri Daire Başkanlığı.

Dışkaynak Tamir, Kayıp Satış ve Rassal Makine Kullanılmama Süresi Varsayımları Altında İki Aşamalı Tedarik Zinciri Modeli

Two-Level Supply Chain Model, Assuming Outsourcing Repair, Lost Sales and Random Machine Unavailability Time

Harun ÖZTÜRK¹ 

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, İşletme Bölümü, 32200, Isparta, Türkiye

Öz

Günümüz küresel rekabet ortamında üreticiler ile endüstriyel alıcılar arasındaki işbirliğinin artması ve müşteri taleplerinin sürekli değişkenlik göstermesi tedarik zinciri stok yönetimi kavramının önemini giderek artırmaktadır. Bu çalışmada, tek bir üretici ve tek bir alıcıdan oluşan iki aşamalı tedarik zinciri modeli geliştirilmektedir. Tek cins ürün için verilen sipariş miktarı, herbir üretim çevrim süresi içinde eşit parti hacimli sevkiyatlar ile alıcıya teslim edilmektedir. Üretim sırasında kusurlu ürünlerin üretilmesi, kusurlu ürünlerin tamir edilebilir özellikte olması, tamir işleminin dışkaynak kullanılarak yapılması, makine arızalanması, bakım ve yeterli hammadde bulundurmama durumlarından dolayı üretimin gecikmesi temel varsayımlardandır. Alıcı için kusurlu ürünlerin tamir maliyeti ve kayıp satışlar maliyeti ortaya çıkmaktadır. Makine kullanılmama süresi rassal bir değişkendir ve sürekli tekdüze ve üstel dağılıma uymaktadır. Üretici ve alıcı için toplam maliyet fonksiyonları elde edilmiş ve daha sonra bütünlük toplam maliyet fonksiyonu türetilmiştir. Bütünlük toplam maliyet fonksiyonunu minimum yapan optimum sipariş miktarı ve sevkiyat sayısı, önerilen bir algoritma ile belirlenmiştir. Sayısal örnek ile modelin geçerliliği gösterilmiştir ve bazı model parametrelerinin optimum çözüm üzerindeki etkisi duyarlılık analizi ile incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Bütünlük stok model, kusurlu ürün, tamir, dışkaynak, kayıp satış.

Abstract

In today's global competitive environment, increasing cooperation between manufacturers and industrial buyers and frequent changes in customer demands increase the importance of supply chain inventory management. In this study, a two-level supply chain model is developed, consisting of a single manufacturer and a single buyer. The order quantity supplied for a single product is delivered to the buyer in equal batch shipments within each production cycle. The main assumptions are that imperfect products are produced, the imperfect products are repairable, repairs are outsourced, and production delays occur due to machine breakdown, maintenance and shortages of raw materials. The buyer incurs the cost of repairing imperfect products and lost sales costs arise. Machine unavailability time is a random variable and follows uniform and exponential distributions. Total cost functions are obtained for the manufacturer and the buyer and then an integrated total cost function is derived. The optimum order quantity and the number of shipments that minimize the integrated total cost function are determined by a proposed algorithm. The validity of the model is demonstrated by numerical example and the effects of some model parameters on the optimum solution are examined by sensitivity analysis.

Keywords: Integrated inventory model, imperfect products, rework, outsourcing, lost sales.

1. GİRİŞ

Günümüzde tedarik zinciri yapısı daha da karmaşık bir hal almıştır. Gösterdikleri farklı faaliyetler bakımından çok sayıda işletmenin birbirine bağlı duruma geldiği görülürken, coğrafi bölge olarak da birbirlerinden oldukça uzaklaştıkları görülmektedir. Küreselleşme ile birlikte her alanda olduğu gibi tedarik zincirlerinde de önemli farklılıklar yaşanmaktadır. Son yirmi yılda ekonominin yanısıra tedarik zincirlerinin de küresel bir boyut kazandığını söyleyebiliriz. Farklı ülkelerde üretilen ürünler coğrafi olarak bir başka ülkede tüketilmekte, bir nihai ürünün bileşenleri farklı coğrafi bölgelerdeki işletmelerden elde edilmektedir. Bu durum, tedarik zincirinin günden güne daha karmaşık bir yapıya bürünmesine ve tedarik zinciri yönetiminin daha da önemli hale gelmesine yol açmıştır [1].

Genel olarak bir tedarik zinciri, tedarikçi(ler) ve üretici(ler) ile depolar ve dağıtım merkezlerinden oluşmaktadır [2]. Tedarik zinciri modelleri karar vericilerine göre merkezi (centralized) ve merkezkaç (decentralized) olmak üzere iki farklı şekilde sınıflandırılabilir. Merkezi bir tedarik zincirinde, tek bir karar verici sistemin tamamını eniyilemeyi hedeflemektedir. Merkezkaç bir tedarik zincirinde ise sistemi oluşturan taraflar sadece kendi sistemlerini eniyilemeyi hedeflemektedir [3, 4]. Tedarik zinciri yönetimi, nihai müşteri ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla tedarik zincirinde taraflar arasındaki bilgi ve malzeme alışverişi koordinasyonunun sağlanmasıdır.

Sadece malzeme tedarikinin sağlanması amacı güdülen tedarik zincirlerinde, taraflar arasındaki bilgi alışverişi verilen siparişler üzerinden gerçekleşmektedir. Bu ise, tedarik zincirinde fazla stok, verimsiz kapasite kullanımı ve artan müşteri memnuniyetsizliği gibi problemlere yol açmaktadır [2]. Tedarik zincirinde stoklar, tam zamanında üretim yöntemi ile istenilen kalitedeki ürünlerin, küçük miktarlarda ve zamanında teslim alınması sonucunda sıfır düzeyine kadar çekilebilmektedir [5, 6].

Satıcı-alıcı entegrasyonu problemi, tedarik zinciri yönetiminde temel araştırma konusu olarak kabul edilmektedir. Bu problem ilk olarak Goyal [7] tarafından ele alınmış ve merkezi bir tedarik zinciri için tedarik zinciri toplam (bütünlük) maliyetini minimum yapan bir matematik model geliştirilmiştir. Tek üretici ve tek alıcıdan oluşan iki aşamalı merkezi bir tedarik zincirinde, üretim kapasitesinin sınırsız olduğu ve üretim sürecinin kontrol altında olduğu varsayılmıştır. Bir üretim süreci, talep edilen ürünün üretimine başlanılmasından nihai kullanıcı/müşteri kullanımına hazır oluncaya kadar gerçekleştirilen tüm planlı faaliyetler olarak tanımlanabilir [8]. Bir üretim süreci ile ortaya çıkan ürün arasında doğru orantılı bir ilişki vardır. Üretim sürecinin kontrol altında olmasıyla beklenen kalitede ürünlerin elde edildiği söylenebilirken, üretim sürecinin kontrol altında olmaması durumunda ise beklenen kalite standartlarının sağlanmadığı, bir başka ifade ile üretilen ürünler içerisinde kusurlu ürünlerinde bulunduğu ve sürecin değişkenlik içerdiği söylenebilir. Üretim sürecinin doğal ya da özel nedenlerle ortaya çıkan bu değişikliklerden olumsuz olarak etkilendiği ve gıda, hazır giyim, orman ürünleri, çimento ve ilaç endüstrisi gibi birçok endüstride üretim sırasında kusurlu ve hurda ürün elde edildiği görülmektedir [8, 9].

Çevreye karşı duyarlı üretim faaliyetlerinin artması ve yasal düzenlemeler ile birlikte işletmeler kusurlu ürünlerin tamamını ya da bir kısmını tamir (repair/refurbishing) ve yeniden üretim sürecine (remanufacturing) dahil ederek maliyet tasarrufu sağlayabilirler [10, 11]. Tedarik zincirinin tasarım ve modellenmesinde, kusurlu ürünlerin ayırt edilmesi işlemi hem üretici hem de alıcı tarafından yapılabilir. Üretici tarafından belirlenen kusurlu ürünler, ya ikincil pazarda indirimli fiyattan satılmaktadır [12], yada üretim süreci tamamlandığında tamir sürecine/yeniden üretime girmektedir [13]. Kusurlu ürünlerin alıcı tarafından belirlenmesi durumunda ise bu ürünler satıcıya geri gönderilmekte [14], indirimli fiyattan satılmakta [15], yada dışkaynak kullanımı (outsourcing) ile tamir edilerek tekrar eldeki stoğa dahil edilmektedir [16]. İşletmelerin temel yetenekleri dışında kalan işlerini konusunda uzman işletmelerle koordinasyon içerisinde temin etmesi dışkaynak kullanımı olarak tanımlanmaktadır. İşletmeleri dışkaynak kullanmaya yönelten nedenlerin başında maliyetleri azaltma ve finansal yetersizlik

gelmektedir. Buna karşın, dışkaynak kullanımı işletmelere taklit edilmesi kolay olmayan kendi öz yetenekleri üzerine yoğunlaşma fırsatı vermektedir [1, 17]. İşletmeler tedarik zinciri planlamalarında dış kaynaklardan etkin bir şekilde yararlanmaktadırlar [18]. Çoğu işletme sadece taşıma faaliyeti için dışkaynak kullanmayı tercih ederken, diğer işletmelerin hem taşıma hem de üretim/tamir, depolama ve dağıtım faaliyetleri için dışkaynak kullandıkları görülmektedir [19, 20]. Diğer taraftan işletmeler yoğun rekabet ortamında yaşamlarını sürdürebilmek ve üstünlük kazanmak için ürün ve hizmet kalitesini yükseltmeli, maliyetleri azaltmalı ve verimliliklerini artırmalıdır. Bu ortamda faaliyet gösteren işletmeler için üretim kaynaklarının en etkin kullanımını rekabet edebilmenin ön koşulu olmaktadır [21]. Kusurlu ürünlerin tamir işlemi, üretim programının kesilmesini ve yeni makine ve teçhizat alınmasını gerektirebilir [22]. Üretim kesilmesi verimliliğin azalmasını beraberinde getirmektedir [21]. Bu durumun bir sonucu olarak özellikle küçük ve orta büyüklükteki işletmeler (KOBİ) finansal yönden zayıf oldukları için bu rekabet ortamında oldukça fazla zorlanmaktadırlar [23]. Bu işletmelerin dışkaynaklardan etkin yararlanmaya çalışmalarlarıyla rekabet gücünü arttırdıkları söylenebilir [24, 25].

Endüstriyel uygulamalarda, makine arıza ve bakım faaliyetleri, yedek parça ve hammadde tedarigindeki aksamalar, vardiya değişimi ve işçilerin iş devamsızlığı gibi sebeplerden dolayı üretim sürecinde ve/veya üretimden sonra aksamalar ortaya çıkmaktadır ve dolayısıyla makinelerin kullanılmadığı süreler/zamanlar mevcut olmaktadır [26, 27]. Bunlar gibi çeşitli faktörler üretim hedeflerinde değişimlere yol açabilir ve sonucunda azalan üretim düzeyi ve düşük verimlilik ortaya çıkabilir [28]. Bu durumlarda üretici, ürünleri alıcıya yeterli miktarda ve zamanında teslim edemez. Bunun bir sonucu olarak alıcı stoksuz kalma durumu ile karşı karşıyadır. Bir başka ifade ile alıcı müşterilerin taleplerini yerine getiremediği için kayıp satışlar ile karşılaşır ve daha fazla kâr elde etme fırsatını kaybeder.

Bu çalışmanın amacı, tedarik zincirinin modellenmesinde kusurlu ürün, dışkaynak tamir, rassal makine kullanılmama süresi ve kayıp satışlar varsayımlarını birlikte ele almaktır. Bu varsayımlardan bir ya da ikisinin birlikte ele alındığı birçok model geliştirilmiş olmasına rağmen hiçbirinde kusurlu ürünlerin dışkaynak kullanılarak tamir edilmesi, rassal makine kullanılmama süresi ve kayıp satışların tedarik zinciri toplam maliyeti üzerindeki birlikte etkisi araştırılmamıştır. Bu çalışmada, toplam maliyetin kusurlu ürünlerin dışkaynak kullanımı yoluyla minimum yapılmaya çalışıldığı tek üretici ve tek alıcıdan oluşan iki aşamalı merkezkâç bir tedarik zinciri ele alınmaktadır. Üretici sabit hazırlık maliyeti ve sınırlı üretim miktarı ile tek kalem ürünü partiler halinde üretmektedir. Alıcı her parti ürünü sonlu sayıda

ve eşit büyüklükte sevkiyatlar halinde sabit sipariş ve taşıma maliyeti ile satın almaktadır. Üretici ve alıcı için ürünleri stokta tutma maliyeti bulunmaktadır. Alıcı satın aldığı ürünler içerisindeki kusurlu ürünlerin belirlenmesi işleminden sonra bu ürünleri dışkaynak kullanarak tamir etmektedir. Bu durumda alıcı için tamir maliyeti ortaya çıkmaktadır. Üretici, üretimi tam zamanında gerçekleştiremediği için üretim belirli bir süre gecikmektedir. Bu süre, makinelerin kullanılmama süresi olarak düşünülmektedir ve bu süre bilinen bir olasılık dağılımına uyan rassal bir değişkendir. Üretici, ürünlerin alıcıya teslimatının gecikmesinden dolayı ceza maliyeti ile karşılaşırken, alıcı, müşteri taleplerine cevap veremediği için kayış satışlar maliyeti ile karşılaşmaktadır. Makine kullanılmama süresinin üstel ve tekdüze dağılıma uyduğu durumlar için üretici, alıcı ve tedarik zinciri toplam maliyeti (bütünleşik maliyet) matematik olarak modellenmektedir, optimum sipariş miktarı ve sevkiyat sayısı önerilen bir algoritma yardımıyla elde edilmektedir.

Çalışma aşağıdaki gibi düzenlenmiştir. İkinci bölümde, konu ile ilişkili literatür taramasına yer verilmiştir. Üçüncü bölümde, problem tanımlanmıştır, gerekli notasyon ve varsayımlar verilmiştir. Dördüncü bölümde, tedarikçi ve alıcı için birim zamandaki toplam maliyet fonksiyonları elde edilmiş, ve makine kullanılmama süresinin sırasıyla tekdüze ve üstel dağılıma uyması varsayımları altında bütünleşik toplam maliyet fonksiyonu türetilmiştir. Yine bu bölümde, optimum üretim-sipariş miktarını belirlemek amacıyla algoritmalar önerilmiştir. Beşinci bölümde, geliştirilen modelin uygulanabilirliğini göstermek amacıyla sayısal örnekler verilmiştir, talep miktarının ve kayıp satışlar maliyetinin optimum sonuçlar üzerindeki etkisi duyarlılık analizi ile incelenmiştir. Sonuç bölümünde, çalışmada elde edilen bulgulara ve gelecekte yapılabilecek çalışmalara değinilmiştir.

II. LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölümde, kusurlu üretim süreci, kusurlu ürünlerin tamiri, üretimin gecikmesi ve kayıp satışlar varsayımları altında tek üretici ve tek alıcıdan oluşan iki aşamalı merkezi tedarik zinciri modelleri üzerine yapılmış çalışmalara yer verilmektedir. Banerjee [29], Goyal [7] tarafından ele alınan problemde gerçek hayatta üretim hızının sonlu olması varsayımını dikkate almış ve ihtiyaç kadar sipariş verme (Lot-for-lot) politikası ile bütünleşik bir model önermiştir. Sonraki çalışmada Goyal [30], bir teslimattan diğerine geometrik (oransal) değişim gösteren parti büyüklüğü politikası altında tek satıcı ve tek alıcıdan oluşan bütünleşik sistem için toplam maliyeti minimum yapmayı amaçlamıştır. Satıcıdan alıcıya gönderilen ilk parti hacminin birim, sonraki parti büyüklüklerinin (, birim zamandaki üretim miktarının talep miktarına oranıdır) birim olduğu tek bir satıcı ve tek bir alıcıdan oluşan bütünleşik sistem için matematik bir model Goyal ve Nebebe [31] tarafından önerilmiştir. Önerilen modelin eşit ve geometrik değişimli parti büyüklüğü

politikalarından daha fazla maliyet tasarrufu sağladığı gösterilmiştir. Ertogral vd. [32], taşıma maliyetinin parti büyüklüğüne bağlı olması varsayımı altında tek satıcı ve tek alıcıdan oluşan bütünleşik sistem için toplam maliyeti minimum yapmayı amaçlamışlardır. Sayısal analiz sonucunda taşıma maliyetini bütünleşik sistem maliyetine dahil etmenin toplam maliyette tasarruf sağladığını ve bunun da üretim ve sipariş kararlarını etkilediğini elde etmişlerdir. Ben-Daya vd. [33], tek bir satıcı ve tek bir alıcıdan oluşan bütünleşik sistem için optimum parti büyüklüğü belirleme politikalarının genişletilmiş bir özetini ve Goyal ve Nebebe [31] tarafından geliştirilen modelin daha genel bir halini önermişlerdir. Bu modelde, ilk tane teslimatın geometrik değişimli parti büyüklüğü politikasının izlenerek teslim edildiği, sonraki tane teslimatın birbirine eşit ve partinin büyüklüğü kadar olduğu eşit parti büyüklüğü politikasının izlenerek teslim edildiği varsayılmıştır. Üretim sürecinin kontrol altında olduğu iki aşamalı tedarik zinciri problemleri üzerine birçok araştırma yapılmıştır [34-39].

Huang [40, 41], kusurlu ürünler içeren stok kontrol problemine satıcı-alıcı entegrasyonu yaklaşımını dahil etmiştir. Bütünleşik toplam maliyeti minimum yapacak optimum parti büyüklüğü ve sevkiyat sayısı önerilen bir algoritma ile elde edilmiştir. Aynı yıl içerisinde Abdul-Jalbar vd. [42], tek kalem ürün için tek bir satıcı ve iki alıcıdan oluşan problemi bütünleşik stok kontrol modeli yardımıyla formüle etmişlerdir. Bütünleşik toplam maliyet, her iki alıcı için stokta tutma maliyeti ve taşıma maliyeti, stokuz kalma maliyeti ile birlikte sabit üretime hazırlık maliyeti toplamlarından oluşmaktadır. Su [43], teslim alınan her partide kusurlu ürünler bulunduğu ve bu kusurlu ürünlerin 100% tarama sonucunda elde edildiği tek bir satıcı ve tek bir alıcıdan oluşan bütünleşik stok kontrol probleminde, kusurlu ürünlerin tamamının bir sonraki sipariş teslimi sırasında satıcıya gönderildiğini varsaymıştır. Stokuz kalmaya izin verilmektedir ve bir sonraki sipariş ile talep tamamen karşılanmaktadır. Satış miktarını artırmak amacıyla alıcıya ödemedeki belirli bir süre gecikmeye izin verilmektedir. Jha ve Shanker [44], tek satıcı ve çok alıcıdan oluşan iki aşamalı tedarik zinciri probleminde, üretilen tek kalem ürünün aynı kapasitedeki araçlar ile farklı bölgelerdeki alıcılara taşındığını varsaymıştır. Bütünleşik sistemin toplam maliyetini minimum yapacak üretim ve stok miktarları, hizmet düzeyi kısıtı altında yinelemeli bir yaklaşım ile elde edilmiştir. Kumar vd. [45], tek üretici ve tek alıcıdan oluşan bütünleşik stok kontrol problemi için üreticiden alıcıya gönderilen parti büyüklüklerinin eşit ve talep miktarının üçgen bulanık sayı olması varsayımları altında matematik bir model önermiştir. Kim vd. [46], stokuzluk, rassal tedarik süresi ve kusurlu ürün üretilmesi varsayımları altında iki aşamalı tedarik zinciri problemi için geliştirilen matematik modelde parti büyüklüğü, sevkiyat sayısı, yeniden sipariş noktası ve tedarik süresini optimum yapmayı amaçlamışlardır. Gharaei vd. [47], çok üretilen ve çok alıcılı iki aşamalı tedarik zinciri probleminde

bütünleşik toplam maliyeti, taşıma ve depolamadan kaynaklanan emisyon vergisi maliyetleri ile stokta tutulan ürünlerden kaynaklanan maliyetler ve üretim kapasitesitesi sınırlaması varsayımları altında minimum yapmışlardır. Öztürk [48], alıcı tarafından belirlenen kusurlu ürünlerin dışkaynak kullanılarak tamiri ve ürünlerin alıcıya eşit ve geometrik değişimli sevkiyat büyüklükleri izlenerek teslimi varsayımları altında iki aşamalı tedarik zinciri problemini matematik olarak modellemiştir. Khanna vd. [49], kusurlu ürün, kusurlu ürünlerin aynı üretici tarafından tamiri, üreticinin ürünleri alıcıya satışı sonrası tamir maliyetlerini içeren garanti politikası, üretim tamamlandıktan sonra önleyici bakım ve alıcı için stoksuz kalma varsayımlarının iki aşamalı tedarik zinciri toplam maliyeti üzerindeki birlikte etkisini araştırmışlardır. Kusurlu ürünler içeren üretim süreçleri için farklı varsayımlar altında birçok oldukça fazla tedarik zinciri modeli geliştirilmiştir [50-53].

Yukarıdaki tüm çalışmalarda üretim çevrim süresi içerisinde üretim sürecinde herhangi bir gecikmenin olmadığı varsayılmıştır. Gerçek yaşamda, makine arızalanması, bakım ve malzeme tedariginde yaşanabilecek problemler nedeniyle üretim gecikmektedir. Dolayısıyla, makine kullanılmama süresinin bir üretim çevriminden diğerine farklılık göstermesi kaçınılmazdır. Bu durum, optimum üretim-stok politikasını belirlemede üretim çevrimi süresi içerisinde makine kullanılmama süresinin de dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

Literatürde, makine kullanılmama süresinin bir sabit olduğunun yanı sıra bir rassal değişken olduğu ve bilinen bir dağılıma uyduğu varsayımı altında optimum stok politikasını belirlemeyi amaçlayan çok sayıda çalışma bulunmaktadır [54-59]. Bu çalışmaların hepsinde sadece üretim stok kontrol problemi ele alınmış olup optimum üretim miktarı belirlenmiştir. Ele alınan çalışmaların bir kısmında makine kullanılmama süresi üretim sırasında makine arızalanmasından kaynaklanan tamir süresi, önleyici bakım süresi ve/veya vardiya değişimi, kalite problemleri, makine ve ekipman sıkıntısından kaynaklı makine duruş (ara verme) süresi olarak düşünülürken, diğer kısmında ise makine kullanılmama süresinin üretimden sonra makine bakım süresi ya da malzeme tedarigi ve üretim için gerekli hammaddenin zamanında teslim alınmamasından kaynaklanan süre olduğu düşünülmektedir. Yine bu çalışmalardan bir kısmı üretim sürecinin tamamen kusursuz olduğunu, diğer kısmı ise üretim sürecinin kusurlu olduğunu ve üretim sırasında bazı kusurlu ürünlerin de üretildiğini varsayılmıştır. Üretim sırasında kusurlu ürünler üretilmesi varsayımını dikkate alan çalışmaların tümü bu kusurlu ürünlerin aynı üretim sisteminde bir başka ifade ile aynı üretici tarafından tamir edildiğini / yeniden işlendiğini düşünmüştür. Tablo 1'de çalışmalara ilişkin bilgiler verilmektedir. Tablo 1 incelendiğinde makine kullanılmama süresinin tek bir satıcı ve tek bir alıcıdan oluşan bütünleşik stok kontrol

problemi için optimum üretim-sipariş miktarı üzerindeki etkisini araştıran ilk çalışmanın Wee ve Widyadana [60] tarafından yapıldığı görülmektedir.

Wee ve Widyadana [60], tek bir üretici ve tek bir alıcıdan oluşan bütünleşik problemde üreticiden alıcıya üretim sırasında da teslimatların yapıldığını, sevkiyat büyüklüklerinin birbirine eşit ve sadece kusursuz ürünlerden oluştuğunu varsayımlardır. Yazarlar çalışmalarında, makine ve ekipman için gerekli malzeme temininin ve/veya hammadde tedarikinin istenilen zamanda yapılmamasından dolayı makinelerin kullanılmadığı zamanlar olduğunu ve üretimin geciktiğini, bunun sonucunda da alıcı için kayıp satışların ortaya çıktığını düşünmüşlerdir. Makine kullanılmama süresinin rassal bir değişken olduğu ve sırasıyla tekdüze ve üstel dağılım gösterdiği çalışmadaki diğer varsayımlardır. Bu çalışmada ele alınan problemde de makine kullanılmama süresinin üretimden sonra ortaya çıkabilecek problemlerden kaynaklı üretim gecikme süresi olduğu varsayılmaktadır. Taleizadeh vd. [61], üreticinin ürünleri taradıktan sonra alıcıya eşit büyüklükteki sevkiyatlar şeklinde sadece kusursuz ürünleri teslim ettiğini, kusurlu ürünlerin ise üretimden sonra tek parti halinde hurda olarak ayrıldığını varsayımlardır. Makine kullanılmama / tamir süresi bilinmemektedir, tamir işleminin ardından eldeki ürünlerin tüketimi beklenmekte ve bir sonraki parti üretimine başlanmaktadır. Chiu vd. [62], tek bir üretici ve tek bir alıcıdan oluşan bütünleşik sistemde talep edilen ürünlerin bir kısmının üretici tarafından üretildiğini kalan kısmının ise dışkaynaklardan temin edildiğini, üretim sırasında üretilen kusurlu ürünlerin hurda olarak ayrıldığını, teslimatların birden fazla sayıda, eşit büyüklükte ve tüm sipariş miktarının üretiminin tamamlanmasından sonra yapıldığını varsayımlardır. Bunlarla birlikte, makine arızalanmasından dolayı üretimin gecikmesi, tamir işlemi için gerekli sürenin sabit olması ve üretimin tamir işleminden sonra da devam etmesi ele alınan problemdeki diğer varsayımlardır.

Bütünleşik stok kontrol problemlerinde, kusurlu ürün üretilmesi, bu kusurlu ürünlerin dışkaynak kullanılarak tamir edilmesi ve hammadde tedarikinin gecikmesi ya da bakım onarım ve makine ekipman için gerekli malzeme temininin zamanında yapılamaması gibi sebeplerden dolayı üretimin gecikmesi varsayımlarının optimum üretim-sipariş miktarı üzerindeki etkisini birlikte ele alan hiçbir çalışma bulunmamaktadır. Literatürdeki bu boşlukta hareketle bu çalışmada, kusurlu ürün, tamir ve kayıp satışlar varsayımları altında tek bir üretici ve tek bir alıcıdan oluşan iki aşamalı merkezi tedarik zinciri problemi matematik olarak modellenmektedir. Bu problemdeki amaç, satıcı ve alıcı tarafından ortaya çıkan bütünleşik toplam maliyeti minimum yapacak, optimum sipariş miktarı ve sipariş başına teslimat sayısının (sevkiyat sayısını) belirlenmesidir.

Tablo 1. Literatürdeki çalışmalar ve varsayımları

Yazar(lar)	Problem	Makine kullanılmama / Tamir süresi	Üretimden sonraki ürün kalitesi		
			Kusursuz ürünler	Kusurlu ürünler	
				Hurda	Tamir edilebilir Üretici
Groenevelt vd. [54]	Tekil (Üretici)	Rassal	x		
Abboud vd. [55]	Tekil (Üretici)	Rassal	x		
Chen vd. [56]	Tekil (Üretici)	Sabit	x		x
Dhouib vd. [57]	Tekil (Üretici)	Rassal	x	x	
Huang vd. [58]	Tekil (Üretici)	Rassal	x		
Deiranlou vd. [59]	Tekil (Üretici)	Rassal	x		
Wee ve Widyadana [60]	Bütünleşik (Üretici-Alıcı)	Rassal	x		
Taleizadeh vd. [61]	Bütünleşik (Üretici-Alıcı)	Sabit	x	x	
Chiu vd. [62]	Bütünleşik (Üretici-Alıcı)	Sabit	x	x	
Bu çalışma	Bütünleşik (Üretici-Alıcı)	Rassal	x		x

III. PROBLEMİN TANIMI

Bu bölümde, öncelikle çalışmada ele alınan tedarik zinciri probleminin bir tanımı yapılmaktadır. Daha sonra, matematiksel modeli geliştirmede kullanılacak semboller ve varsayımlar verilmektedir. Tek kalem ürün tek bir üretici tarafından üretilmektedir ve bu ürün için tek bir alıcı bulunmaktadır. Alıcı, bu üründen Q miktar sipariş vermektedir ve sipariş verme maliyeti A_B 'dir. Üretici bu ürünü partiler halinde üretmektedir ve üretime hazırlık maliyeti A_V 'dir. Üretim, anlık değil sabit üretim hızı P ile sürekli olarak gerçekleştiği düşünülmektedir. Üretim hızı yüksek olursa fazla stok ve sonucunda yüksek elde bulundurma maliyetlerine, düşük olursa stokların daha kısa sürede tükenmesine ve sonrasında karşılanamayan talepler nedeniyle kayıp satışlara ve ceza maliyetlerine neden olur. Üretici, üretim planlama aşamasında bu iki maliyeti dengeleyecek üretim hızını belirlemektedir. Cam, elektronik, ilaç, dokuma ve otomotiv endüstrilerinde üretim hızının sabit olduğu üretim sistemleri kullanılmaktadır [63]. Üretici her üretim çevrimi süresi içerisinde sipariş miktarını alıcıya düzenli periyotlarla n tane gönderi yaparak teslim etmektedir. Üreticiden alıcıya gönderilen teslimat büyüklükleri birbirine eşittir ve her teslimat q birimden oluşmaktadır. Bu durumda, $Q=nq$ 'dir. Üretici ilk sevkiyat miktarının (q) üretimi tamamlandıktan hemen sonra alıcıya teslimini yapmaktadır ve birim sevkiyat (taşıma) maliyeti c_t 'dir.

Üretici için bir birim ürünü stokta tutma maliyeti h_V 'dir. Alıcı tarafından teslim alınan her partide θ oranında kusurlu ürün bulunmaktadır. Bu nedenle her parti teslim alınır alınmaz birim zamandaki tarama hızı X ile tamamen taranmaktadır. Kusurlu ürünler için birim stokta tutma maliyeti h_d 'dir. Tarama süresi tamamlandıktan sonra kusurlu ürünler, tamir edilmek / yeniden işlenmek üzere eldeki stoktan çıkarılmaktadır ve tamir işlemini yapacak firmaya gönderilmektedir. Kusurlu ürünler için birim zamandaki tamir miktarı R ve birim tamir maliyeti $(1+m)\left[(S+2A)/\theta q+c_1+c_T+h't_R\right]$ 'dir. Burada, m , kâr oranını, S , tamir için gerekli hazırlık maliyetini, A , kusurlu ürünlerin tamir işlemi için sabit taşıma maliyetini, c_1 , birim malzeme ve işçilik maliyetini, c_T , kusurlu ürünlerin birim taşıma maliyetini, h' , tamir işlemini gerçekleştirecek firmadaki birim stokta tutma maliyetini ve t_R ($t_R=\theta q/R$), kusurlu ürünlerin tamir işlemi için gerekli süreyi ifade etmektedir [16]. Tamir edilen ürünler, eldeki stok tükenmeden önce teslim alınmaktadır. Tamir edilen ürünler için birim stokta tutma maliyeti h_R 'dir.

Matematiksel modeli geliştirmede kullanılacak semboller aşağıda verilmiştir:

A_B	Sipariş verme maliyeti
A_V	Üretim hazırlık maliyeti
c_t	Sevkiyat başına taşıma maliyeti
h_V	Üretici için bir birim ürünü bir birim zaman stokta tutma maliyeti
h_B	Alıcının kusursuz ürünler için birim stokta tutma maliyeti
h_d	Alıcının kusurlu ürünler için birim stokta tutma maliyeti
h_R	Alıcının tamir edilen ürünler için birim stokta tutma maliyeti
S_B	Alıcının birim kayıp satışlar maliyeti
S_V	Üreticinin teslimat başına gecikme maliyeti
Q	Sipariş miktarı
q	Üreticiden alıcıya gönderilen teslimatların büyüklükleri
D	Birim zamandaki talep miktarı
P	Birim zamandaki üretim miktarı
R	Birim zamandaki tamir miktarı
X	Birim zamandaki tarama miktarı
θ	Kusurlu ürün oranı
n	Her üretim çevrim süresi içerisinde üreticiden alıcıya gönderilen teslimatların sayısı
T	Çevrim süresi
t_n	Tüm siparişin teslimi için geçen süre (üretim ve üretimin yapılmadığı süre toplamları)
t_p	Toplam sipariş miktarının üretilmesi için gereken süre (üretim süresi)
t_f	Üretimden sonra kalan siparişlerin teslim süresi (üretimin yapılmadığı süre)
t_s	Stoksuz kalmaya izin verilmekte olan süreye (kayıp satışların ortaya çıktığı süre)
$TCUB$	Alıcının birim zamandaki beklenen toplam maliyeti
$TCUV$	Üreticinin birim zamandaki beklenen toplam maliyeti
TCU	Bütünleşik toplam maliyet

Matematiksel modeli geliştirmek için yapılan varsayımlar aşağıdaki gibidir:

- Talep miktarı bilinmektedir, sabittir ve süreklidir.
- Birim zamandaki üretim miktarı, birim zamandaki talep miktarından büyüktür, $P > D$.
- Birim zamandaki tarama ve tamir miktarı, birim zamandaki talep miktarından büyüktür, $X > D$ ve $R > D$.
- Stoksuz kalmaya izin verilmektedir. Bu dönemde karşılanamayan talep, kayıp satışlar olarak düşünülmektedir.
- Alıcı tarafından teslim alınan her parti %100 tarama sürecinden geçirilmektedir. Tarama

süreci tamamen güvenilirdir ve tarama maliyeti ihmal edilmektedir.

- Tedarik süresi sıfırdır.
- Planlama dönemi sonsuzdur.

IV. MATEMATİKSEL MODEL

Bu bölümde, sipariş miktarının tamamını üretinceye kadar üretimin devam ettiği ve üretim sırasında da alıcıya eşit büyüklükte teslimatların yapıldığı iki aşamalı merkezi bir tedarik zinciri problemi matematik olarak formüle edilmektedir. İlk olarak alıcı ve üretici için çevrim başına toplam maliyet fonksiyonları türetilmektedir. Sonra, üretimin gecikme süresi/makine kullanılmama süresinin tekdüze ve üstel dağılıma uyması varsayımları altında alıcı ve üretici için birim zamandaki toplam maliyetler türetilmektedir. Daha sonra, bütünleşik toplam maliyeti minimum yapan optimum sevkiyat sayısı ve sevkiyat başına taşıma miktarı, önerilen bir algoritma yardımıyla elde edilmektedir.

Bütünleşik sistemde alıcı ve üretici için stok seviyelerinin zamanla değişim grafiği Şekil 1'de gösterilmektedir. Alıcının stok seviyesinin zamanla değişimi Şekil 1-(a) ile verilirken, üreticinin stok seviyesinin zamanla değişimi Şekil 1-(b) de gösterilmektedir. Sistemde üretim ve dağıtım işlemlerinin işleyişi aşağıdaki gibidir. Üretici, alıcının sipariş bilgilerini daha önceden bildiği için ilk partiyi (q) üretmek üzere üretime başlamaktadır. İlk sevkiyatı üretip alıcıya teslim ettikten sonra üreticinin stok seviyesi sıfıra düşmektedir. Üretici, siparişten kalan miktarı ($(n-1)q$) üretmek üzere t_p zaman periyodu süresince üretime devam etmekte, bu süre içerisinde de alıcıya teslimat yapmaktadır ve üretim hızı talep hızından büyük olduğu için ürünler stokta birikmektedir. Bu durumda, üreticinin stok seviyesi düşerken alıcının stok seviyesi artmaktadır. Bu işlem üreticinin tüm ürünleri alıcıya teslim etmesine kadar devam etmektedir. Üretici, üretimi tam zamanında gerçekleştiremez ve t_s zaman periyodu süresince alıcı tarafından verilen siparişi karşılayamaz. Bundan dolayı, alıcı bu süre içerisinde kayıp satışlar ile karşılaşmaktadır. Joglekar [64], tek bir üretici ve tek bir alıcıdan oluşan iki aşamalı tedarik zinciri probleminde üreticiden alıcıya gönderilen teslimatların eşit büyüklükte (q) olduğunu varsaymış ve üretici için toplam stok miktarının (eğri altında kalan alan) hesaplanmasını ayrıntılı olarak incelemiştir. Bu çalışmada da üreticiden alıcıya gönderilen sevkiyatlar eşit büyüklükte (q) olduğundan üreticinin toplam stok miktarının hesaplanması işlemi için Joglekar [64]'in çalışması referans çalışma olarak gösterilmekte, burada sadece elde edilen ifade farklı parametreler ile yeniden verilmektedir. Bu durumda üreticinin zaman ağırlıklı stok miktarı (t_{wi}) Şekil 1-(b)'den Eşitlik 1'deki gibidir.

$$t_{wi} = n^2 q^2 \left[\frac{1}{2P} + \left(\frac{1}{D} - \frac{1}{P} \right) \left(1 - \frac{1}{n} \right) - \frac{n-1}{2nD} \right] \quad (1)$$

Üreticinin toplam stok maliyeti, üretime hazırlık maliyeti, elde bulundurma maliyeti ve stoksuzluk (ceza) maliyetleri toplamından oluşmaktadır. Bu modelde, üretici teslimatların gecikmesinden dolayı alıcıya ceza maliyeti ödemektedir. Ceza maliyeti, teslim edilecek siparişin gecikme süresine bağlı olup sipariş miktarından bağımsızdır. Bu durumda, üreticinin bir çevrimdeki beklenen toplam stok maliyeti Eşitlik 2'deki gibidir.

$$E(TCV) = A_v + h_v n^2 q^2 \left[\frac{1}{2P} + \left(\frac{1}{D} - \frac{1}{P} \right) \left(1 - \frac{1}{n} \right) - \frac{n-1}{2nD} \right] + S_v \int_{t=t_f}^{\infty} (t-t_f) f(t) dt \quad (2)$$

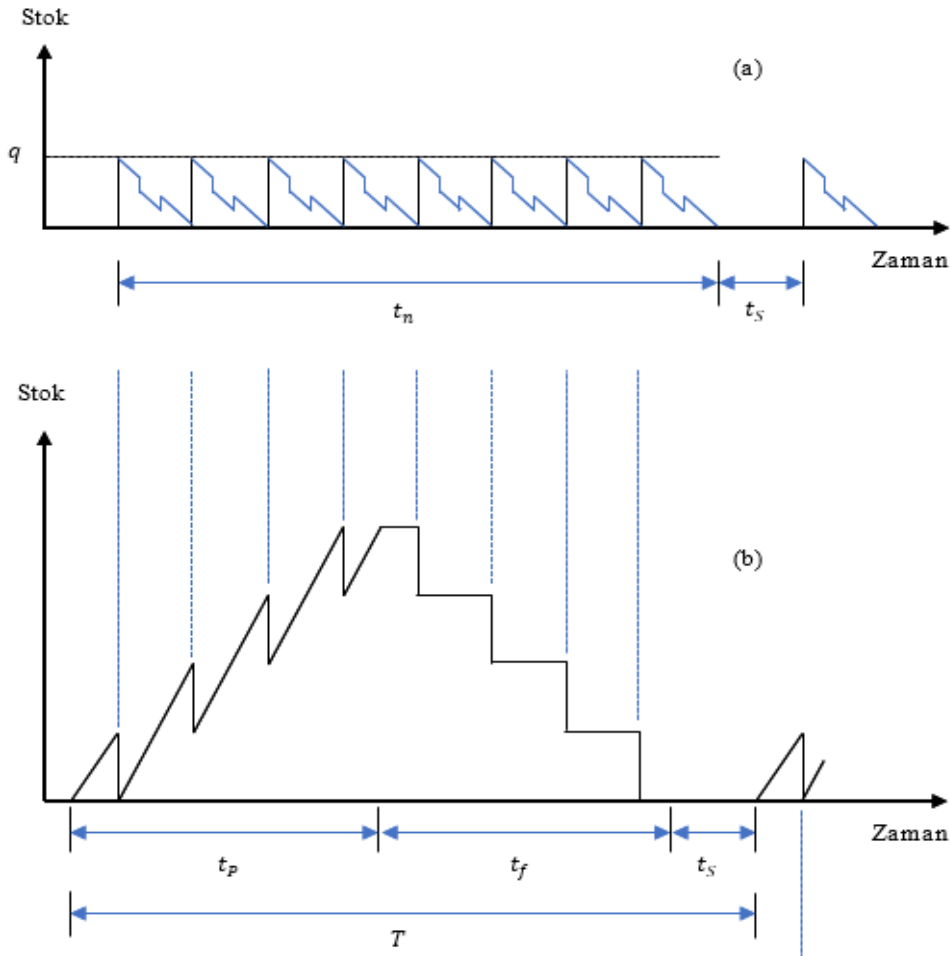
Üretimin başladığı andan itibaren bir sonraki üretim başlangıcına kadar geçen süre üretim çevrim süresidir. Bu süre, üç zaman aralığından oluşmaktadır. Birinci

zaman aralığında, hem üretim yapılmaktadır hem de talep karşılanmaktadır. İkinci zaman aralığında, üretim yapılmayıp sadece talep karşılanmaktadır. Üçüncü zaman aralığında, eldeki stok miktarı tükendiğinden bir sonraki üretim başlangıcına kadar stoksuz kalma durumuna izin verilmektedir. Bu süre rassal bir değişkendir ve bilinen bir olasılık dağılımına uymaktadır. Bu süre içerisinde karşılanamayan talep, kayıp satış olarak değerlendirilmektedir. Buradan, üretim çevrim süresinin beklenen değeri ($E(T)$) Eşitlik 3'teki gibidir.

$$E(T) = t_n + t_s = t_n + \int_{t=t_f}^{\infty} (t-t_f) f(t) dt \quad (3)$$

Üreticinin birim zamandaki beklenen toplam maliyeti, yenilenen ödül teoreminden bir çevrimdeki beklenen toplam maliyetin, çevrim süresinin beklenen değerine oranlanmasıyla elde edilir ve Eşitlik 4'te verilmektedir.

$$TCUV(n, q) = \frac{A_v + h_v n^2 q^2 \left[\frac{1}{2P} + \left(\frac{1}{D} - \frac{1}{P} \right) \left(1 - \frac{1}{n} \right) - \frac{n-1}{2nD} \right] + S_v \int_{t=t_f}^{\infty} (t-t_f) f(t) dt}{t_n + \int_{t=t_f}^{\infty} (t-t_f) f(t) dt} \quad (4)$$



Şekil 1. Bütünleşik sistemde (a) alıcının ve (b) üreticinin stok seviyesinin zamanla değişimi (tek kurulum ve sekiz teslimat)

Alicının stok seviyesinin zamana göre değişimi Şekil 1-(a) da gösterilmiştir (Ayrıntılı bilgi için bkz 'Ek'). Alıcı, ilk siparişi teslim alır almaz bir taraftan ürünlerin tarama işlemini yaparken diğer tarafta müşterilerin taleplerini karşılamaktadır. Tarama süresi sonunda belirlenen kusurlu ürünler tamir edilmek üzere stoktan çıkarılmaktadır ve talep eldeki kusursuz ürünlerden karşılanmaya devam etmektedir. Tamir edilen ürünler gerekli kalite standartlarını sağlamaktadır. Tamir işleminin ardından bu ürünler eldeki stok tükenmeden önce teslim alınmakta ve bu ürünlerden de oluşan talep karşılanmaktadır. Alıcı, stok seviyesi sıfıra düştüğü anda q büyüklüğünde yeni bir sipariş vermektedir ve anında teslim almaktadır. Talep miktarı bilindiğinden ve sevkiyatlar düzenli periyotlarla yapıldığından tedarik süresi (siparişin verilmesiyle alınması arasındaki süre) sabittir ve bilinmektedir. Genelliği kaybetmeden, tedarik süresi sıfır olarak alınmaktadır [65, 66]. Alıcı, t_n zaman periyodu sonunda eldeki tüm stoğu bitirir ve stok seviyesi sıfırdır.

Alicının toplam stok maliyeti, sipariş maliyeti, taşıma maliyeti, elde bulundurma maliyeti, kayıp satışlar maliyeti ve ceza maliyeti gelirinden oluşmaktadır. Alicının bir çevrimdeki beklenen toplam stok maliyeti Eşitlik 5 ile ifade edilmektedir.

$$E(TCU) = A_B + c_t n + (1+m) \left(S+2A+(c_1+c_T)E(\theta)q+h'E(\theta^2)q^2/R \right) n + \frac{h_B E((1-\theta)^2) n q^2}{2D} + \frac{h_d E(\theta) n q^2}{X} + h_R n q^2 E(\theta) \left(\frac{1}{D} - \frac{1}{X} - E(\theta) \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{2D} \right) \right) + (S_B D - S_V) \int_{t=t_f}^{\infty} (t-t_f) f(t) dt \tag{5}$$

Benzer olarak, alıcının birim zamandaki beklenen toplam maliyeti yenilenen ödül teoreminden Eşitlik 6 ile ifade edilir.

$$TCUB = \frac{A_B + c_t n + (1+m) \left(S+2A+(c_1+c_T)E(\theta)q+h'E(\theta^2)q^2/R \right) n + \frac{h_B E((1-\theta)^2) n q^2}{2D} + \frac{h_d E(\theta) n q^2}{X} + h_R n q^2 E(\theta) \left(\frac{1}{D} - \frac{1}{X} - E(\theta) \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{2D} \right) \right) + (S_B D - S_V) \int_{t=t_f}^{\infty} (t-t_f) f(t) dt}{t_n + \int_{t=t_f}^{\infty} (t-t_f) f(t) dt} \tag{6}$$

Alicı, toplam sipariş miktarını (Q) eşit büyüklükteki (q) parti hacimleri ile n tane sevkiyat ile teslim almaktadır. Bu durumda, $Q=nq$ elde edilmektedir. Tüm siparişlerin tüketimi için geçen süre (t_n) Eşitlik (7) ile hesaplanır.

$$t_n = \frac{nq}{D} \tag{7}$$

Üreticinin toplam sipariş miktarını ($Q = nq$) üretinceye kadar geçen süre olan üretim süresi (t_p) Şekil 1'den Eşitlik (8)'deki gibi hesaplanır.

$$t_p = \frac{nq}{P} \tag{8}$$

Yine Şekil 1-(b)'den, üretimden sonra eldeki stok miktarının tükenmesine kadar geçen süre (t_f) Eşitlik (9) ile hesaplanır.

$$t_f = \frac{nq}{D} - \frac{nq}{P} = \frac{nq}{D} \left(1 - \frac{D}{P} \right) \tag{9}$$

4.1. Makine Kullanılmama Süresinin Tekdüze Dağılıma Uyması Durumu

Makine kullanılmama süresi, $[0,b]$ aralığında tanımlı sürekli tekdüze dağılıma uyan rassal bir değişken olsun. Bu durumda, olasılık yoğunluk fonksiyonu ($f(t)$) Eşitlik (10) ile verilir.

$$f(t) = \begin{cases} 1/b, & 0 \leq t \leq b \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \tag{10}$$

Üreticinin birim zamandaki beklenen toplam maliyeti, Eşitlik (10)'da verilen olasılık yoğunluk fonksiyonun Eşitlik (4)'te yerine yazılmasıyla Eşitlik (11) ile verilir.

Benzer olarak, alıcının birim zamandaki beklenen toplam maliyeti, tekdüze dağılımın olasılık yoğunluk fonksiyonunun Eşitlik (6)'da yerine yazılmasıyla Eşitlik (12) ile verilir.

$$TCUVU = \frac{A_V + h_V n^2 q^2 \left[\frac{1}{2P} + \left(\frac{1}{D} - \frac{1}{P} \right) \left(1 - \frac{1}{n} \right) - \frac{n-1}{2nD} \right] + S_V \left[(b - (nq/D)(1-D/P))^2 / 2b \right]}{(nq/D) + \left[(b - (nq/D)(1-D/P))^2 / 2b \right]} \tag{11}$$

$$TCUB_U = \frac{A_B + c_I n + (1+m) \left(S + 2A + (c_1 + c_T) E(\theta) q + h' E(\theta^2) q^2 / R \right) n + \frac{h_B E((1-\theta)^2) n q^2}{2D} + \frac{h_d E(\theta) n q^2}{X} + h_R n q^2 E(\theta) \left(\frac{1}{D} - \frac{1}{X} - E(\theta) \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{2D} \right) \right) + (S_B D - S_V) \left[(b - (nq/D)(1-D/P))^2 / 2b \right]}{(nq/D) + \left[(b - (nq/D)(1-D/P))^2 / 2b \right]} \quad (12)$$

Özel olarak, üretimden sonra eldeki stoğu tüketmek için geçen sürenin (t_f), makine kullanılmama süresinin tanımlı olduğu aralığın üst limit değerinden (b) büyük ya da eşit ($t_f \geq b$) olduğu dikkate alınır, bu süre içerisinde alıcı için herhangi bir kayıp satış ortaya çıkmayacaktır. Bu durumda, üretici ve alıcı için birim zamandaki beklenen toplam maliyetler sırasıyla Eşitlik (13) ve (14)'te verilmektedir.

$$TCUV_{WL} = \frac{A_V + h_V n^2 q^2 \left[\frac{1}{2P} + \left(\frac{1}{D} - \frac{1}{P} \right) \left(1 - \frac{1}{n} \right) - \frac{n-1}{2nD} \right]}{(nq/D)} \quad (13)$$

$$TCUB_{WL} = \frac{A_B + c_I n + (1+m) \left(S + 2A + (c_1 + c_T) E(q) q + h' E(q^2) q^2 / R \right) n + \frac{h_B E((1-q)^2) n q^2}{2D} + \frac{h_d E(q) n q^2}{X} + h_R n q^2 E(q) \left(\frac{1}{D} - \frac{1}{X} - E(q) \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{2D} \right) \right)}{(nq/D)} \quad (14)$$

$$TCU_U = TCUB_U + TCUV_U$$

$$= \frac{A_V + h_V n^2 q^2 \left[\frac{1}{2P} + \left(\frac{1}{D} - \frac{1}{P} \right) \left(1 - \frac{1}{n} \right) - \frac{n-1}{2nD} \right] + A_B + c_I n + (1+m) \left(S + 2A + (c_1 + c_T) E(\theta) q + h' E(\theta^2) q^2 / R \right) n + \frac{h_B E((1-\theta)^2) n q^2}{2D} + \frac{h_d E(\theta) n q^2}{X} + h_R n q^2 E(\theta) \left(\frac{1}{D} - \frac{1}{X} - E(\theta) \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{2D} \right) \right) + S_B D \left[(b - (nq/D)(1-D/P))^2 / 2b \right]}{(nq/D) + \left[(b - (nq/D)(1-D/P))^2 / 2b \right]} \quad (15)$$

$$\frac{\partial TCU_U}{\partial q} = \frac{2 \left\{ h_V n^2 q \left[\frac{1}{2P} + \left(\frac{1}{D} - \frac{1}{P} \right) \left(1 - \frac{1}{n} \right) - \frac{n-1}{2nD} \right] + \frac{(1+m)(c_1 + c_T) E(\theta) n}{2} + (1+m) h' E(\theta^2) n q / R + \frac{h_B E((1-\theta)^2) n q}{2D} \right\} + \frac{h_d E(\theta) n q}{X} + h_R n q E(\theta) \left(\frac{1}{D} - \frac{1}{X} - E(\theta) \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{2D} \right) \right) - S_B n (1-D/P) \left[(b - (nq/D)(1-D/P))^2 / 2b \right]}{(nq/D) + \left[(b - (nq/D)(1-D/P))^2 / 2b \right]} \quad (16)$$

$$- \frac{W_U \left\{ \frac{A_V + h_V n^2 q^2 \left[\frac{1}{2P} + \left(\frac{1}{D} - \frac{1}{P} \right) \left(1 - \frac{1}{n} \right) - \frac{n-1}{2nD} \right] + A_B + c_I n + (1+m) \left(S + 2A + (c_1 + c_T) E(\theta) q + h' E(\theta^2) q^2 / R \right) n + \frac{h_B E((1-\theta)^2) n q^2}{2D} + \frac{h_d E(\theta) n q^2}{X} + h_R n q^2 E(\theta) \left(\frac{1}{D} - \frac{1}{X} - E(\theta) \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{2D} \right) \right) + S_B D \left[(b - (nq/D)(1-D/P))^2 / 2b \right] \right\}}{\left\{ (nq/D) + \left[(b - (nq/D)(1-D/P))^2 / 2b \right] \right\}^2} = 0$$

Burada, $W_U = n/D - n(1-D/P) \left[(b - (nq/D)(1-D/P)) / bD \right]$ 'dir.

Diğer taraftan, üretimden sonra eldeki stok miktarının tükenmesi için gerekli sürenin makine kullanılmama süresinin tanımlı olduğu aralığın üst limit değerinden büyük ya da eşit olduğu durum dikkate alındığında bütünleşik toplam maliyet Eşitlik (17)'de

Sonuç olarak, tek bir üretici ve tek bir alıcıdan oluşan bütünleşik sistem için toplam maliyet Eşitlik (15)'te verilmektedir.

Optimum sevkiyat büyüklüğü (q), Eşitlik (15)'te verilen bütünleşik toplam maliyet fonksiyonunun birinci mertebeden kısmi türevinin sıfıra eşitlenmesiyle Eşitlik (16) yardımıyla bulunabilir.

verilmektedir.

Optimum sevkiyat büyüklüğü (q_{WL}^*), Eşitlik (17)'de verilen bütünleşik toplam maliyet fonksiyonunun (q) değişkenine göre birinci merteden kısmi türevinin sıfıra eşitlenmesiyle elde edilir ve Eşitlik (18) ile verilir.

$$TCU_{WL} = TCUB_{WL} + TCUV_{WL}$$

$$A_V + h_V n^2 q^2 \left[\frac{1}{2P} + \left(\frac{1}{D} - \frac{1}{P} \right) \left(1 - \frac{1}{n} \right) - \frac{n-1}{2nD} \right] + A_B + c_i n + (1+m) \left(S + 2A + (c_1 + c_T) E(\theta) q + h' E(\theta^2) q^2 / R \right) n$$

$$= \frac{\frac{h_B E((1-\theta)^2) n q^2}{2D} + \frac{h_d E(\theta) n q^2}{X} + h_R n q^2 E(\theta) \left(\frac{1}{D} - \frac{1}{X} - E(\theta) \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{2D} \right) \right)}{(nq/D)} \tag{17}$$

$$q_{WL}^* = \sqrt{\frac{D \left(\frac{A_V + A_B}{n} + c_i + (1+m)(S + 2A) \right)}{h_V D n \left[\frac{1}{2P} + \left(\frac{1}{D} - \frac{1}{P} \right) \left(1 - \frac{1}{n} \right) - \frac{n-1}{2nD} \right] + (1+m) h' E(\theta^2) D / R + \frac{h_B E((1-\theta)^2)}{2} + \frac{h_d E(\theta) D}{X} + h_R D E(\theta) \left(\frac{1}{D} - \frac{1}{X} - E(\theta) \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{2D} \right) \right)} } \tag{18}$$

Makine kullanılmama süresinin sürekli tekdüze dağılıma uyması varsayımı altında tek bir üretici ve tek bir alıcıdan oluşan bütünleşik stok kontrol problemi için Eşitlik (15)'de verilen toplam maliyet fonksiyonunun kapalı formda (tam olarak) çözümü elde edilememektedir. Çünkü, Eşitlik (16)'daki denklemin kapalı form çözümü yoktur. Bu durumda, optimum çözüm aşağıdaki algoritma yardımıyla elde edilecektir ([48,60]):

- Adım 1. Başla.
- Adım 2. $n=1$ olarak belirle.
- Adım 3. Eşitlik (18) den q_{WL}^* 'ı hesapla.
- Adım 4. Adım 3'de elde edilen q_{WL}^* için Eşitlik (9) dan t_f 'yi hesapla.
- Adım 5. Eğer, $t_f < b$ (b , makine kullanılmama süresinin tanımlı olduğu aralığın üst limit değeri) ise Adım 6'ya git. Değilse, Adım 7'ye git.
- Adım 6. Eşitlik (16)'dan q 'yu hesapla. Eğer, $TCU(n,q) \leq TCU(n-1,q)$ ve $TCU(n,q) \leq TCU(n+1,q)$ ise Adım 8'e git. Değilse, $n=n+1$ olarak belirle ve Adım 3'e git.
- Adım 7. $TCU(n^*, q^*) = TCU_{WL}(1, q_{WL}^*)$ olarak belirle ve Eşitlik (17)'den $TCU_{WL}(1, q_{WL}^*)$ 'yi hesapla.
- Adım 8. Bitir.

4.2. Makine Kullanılmama Süresinin Üstel Dağılıma Uyması Durumu

Bu durumda, makine kullanılmama süresi, üstel dağılıma uyan rassal bir değişken olsun. O halde, olasılık yoğunluk fonksiyonu ($f(t)$) Eşitlik (19) verilir.

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad t > 0 \tag{19}$$

Buradan, makine kullanılmama süresinin beklenen değeri Eşitlik (20)'de hesaplanmaktadır.

$$E(t_S) = \int_{t_f}^{\infty} (t - t_f) f(t) dt$$

$$= \frac{e^{-\lambda t_f}}{\lambda} \tag{20}$$

Üreticinin birim zamandaki beklenen toplam maliyeti, Eşitlik (19)'da verilen olasılık yoğunluk fonksiyonun Eşitlik (4)'te yerine yazılmasıyla Eşitlik (21) ile verilmektedir.

Alıcının birim zamandaki beklenen toplam maliyeti Eşitlik (6)'dan aşağıdaki gibidir.

Makine kullanılmama süresinin üstel dağılıma uyması varsayımı altında tek üretici ve tek alıcıdan oluşan bütünleşik sistem için toplam maliyet Eşitlik (23) ile verilmektedir.

Optimum sevkiyat büyüklüğü (q), Eşitlik (23)'de verilen toplam maliyet fonksiyonunun birinci mertebeden kısmi türevinin sıfıra eşitlenmesiyle elde edilebilir ve Eşitlik (24)'te ifade edilmektedir.

$$TCUV_E = \frac{A_V + h_V n^2 q^2 \left[\frac{1}{2P} + \left(\frac{1}{D} - \frac{1}{P} \right) \left(1 - \frac{1}{n} \right) - \frac{n-1}{2nD} \right] + S_V \left(e^{-\lambda [(nq/D)(1-D/P)]} / \lambda \right)}{(nq/D) + \left(e^{-\lambda [(nq/D)(1-D/P)]} / \lambda \right)} \tag{21}$$

$$TCUB_E = \frac{A_B + c_T n + (1+m) \left(S + 2A + (c_1 + c_T) E(\theta) q + h' E(\theta^2) q^2 / R \right) n + \frac{h_B E((1-\theta)^2) n q^2}{2D} + \frac{h_d E(\theta) n q^2}{X} + h_R n q^2 E(\theta) \left(\frac{1}{D} - \frac{1}{X} - E(\theta) \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{2D} \right) \right) + (S_B D - S_V) \left(e^{-\lambda [(nq/D)(1-D/P)]} / \lambda \right)}{(nq/D) + \left(e^{-\lambda [(nq/D)(1-D/P)]} / \lambda \right)} \tag{22}$$

$$TCU_E = TCUB_E + TCUV_E$$

$$= \frac{A_V + h_V n^2 q^2 \left[\frac{1}{2P} + \left(\frac{1}{D} - \frac{1}{P} \right) \left(1 - \frac{1}{n} \right) - \frac{p-1}{2nD} \right] + A_B + c_T n + (1+m) \left(S + 2A + (c_1 + c_T) E(\theta) q + h' E(\theta^2) q^2 / R \right) n + \frac{h_B E((1-\theta)^2) n q^2}{2D} + \frac{h_d E(\theta) n q^2}{X} + h_R n q^2 E(\theta) \left(\frac{1}{D} - \frac{1}{X} - E(\theta) \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{2D} \right) \right) + S_B D \left(e^{-\lambda [(nq/D)(1-D/P)]} / \lambda \right)}{(nq/D) + \left(e^{-\lambda [(nq/D)(1-D/P)]} / \lambda \right)} \tag{23}$$

$$\frac{\partial TCU_E}{\partial q} = \frac{2 \left\{ h_V n^2 q \left[\frac{1}{2P} + \left(\frac{1}{D} - \frac{1}{P} \right) \left(1 - \frac{1}{n} \right) - \frac{p-1}{2nD} \right] + \frac{(1+m)(c_1 + c_T) E(\theta) n}{2} + (1+m) h' E(\theta^2) n q / R + \frac{h_B E((1-\theta)^2) n q}{2D} + \frac{h_d E(\theta) n q}{X} + h_R n q E(\theta) \left(\frac{1}{D} - \frac{1}{X} - E(\theta) \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{2D} \right) \right) \right\}}{(nq/D) + \left(e^{-\lambda [(nq/D)(1-D/P)]} / \lambda \right)} - \frac{S_B \lambda n (1-D/P) \left(e^{-\lambda [(nq/D)(1-D/P)]} / \lambda \right)}{(nq/D) + \left(e^{-\lambda [(nq/D)(1-D/P)]} / \lambda \right)} - \frac{W_E \left\{ A_V + h_V n^2 q^2 \left[\frac{1}{2P} + \left(\frac{1}{D} - \frac{1}{P} \right) \left(1 - \frac{1}{n} \right) - \frac{p-1}{2nD} \right] + A_B + c_T n + (1+m) \left(S + 2A + (c_1 + c_T) E(\theta) q + h' E(\theta^2) q^2 / R \right) n + \frac{h_B E((1-\theta)^2) n q^2}{2D} + \frac{h_d E(\theta) n q^2}{X} + h_R n q^2 E(\theta) \left(\frac{1}{D} - \frac{1}{X} - E(\theta) \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{2D} \right) \right) + S_B D \left(e^{-\lambda [(nq/D)(1-D/P)]} / \lambda \right) \right\}}{\left\{ (nq/D) + \left(e^{-\lambda [(nq/D)(1-D/P)]} / \lambda \right) \right\}^2} = 0 \tag{24}$$

Burada,

$$W_E = n/D - \lambda (n/D)(1-D/P) \left(e^{-\lambda [(nq/D)(1-D/P)]} / \lambda \right), \text{ dir.}$$

Benzer olarak, makine arızalanma süresinin üstel dağılıma uyması varsayımı altında tek bir üretici ve tek bir alıcıdan oluşan bütünleşik stok kontrol problemi için elde edilen toplam maliyet fonksiyonunun kapalı form çözümleri elde edilemediğinden optimum çözümler bir önceki altbölümde geliştirilen algoritma yardımıyla elde edilebilecektir.

V. SAYISAL ÖRNEK VE DUYARLILIK ANALİZİ

Çalışmanın bu bölümünde, önerilen bütünleşik stok kontrol probleminin uygulanabilirliği ve geçerliliği sayısal bir örnek ile gösterilmektedir. Önemli model parametrelerinin optimum sonuçlar üzerindeki etkisi duyarlılık analizi yardımıyla incelenmektedir. Model parametrelerinin değerleri Tablo 2’de verilmektedir:

Ayrıca, kusurlu ürün oranı θ , [0,0.04] aralığında tanımlı sürekli tekdüze dağılıma uyan rassal bir değişkendir. Makine kullanılmama süresi (t_S), sırasıyla sürekli

tekdüze dağılım ([0,1] aralığında tanımlı, $b=1$) ve üstel dağılım ($\lambda=1$) gösteren rassal bir değişkendir.

Tablo 2. Parametre değerleri

$D = 50000$ birim/yıl	$S = 100$ PB
$P = 160000$ birim/yıl	$A = 200$ PB
$R = 50000$ birim/yıl	$c_1 = 5$ PB/birim
$X = 175200$ birim/yıl	$c_T = 2$ PB/birim
$S_B = 10$ PB*/birim	$h' = 4$ PB/birim
$S_V = 50$ PB	$h_B = 5$ PB/birim/yıl
$A_B = 100$ PB/sipariş	$h_d = 6$ PB/birim/yıl
$A_V = 300$ PB/hazırlık (kurulum)	$h_R = 6$ PB/birim/yıl
$c_t = 25$ PB/sevkiyat	$h_V = 2$ PB/birim/yıl
$m = 0.20$ (%)	

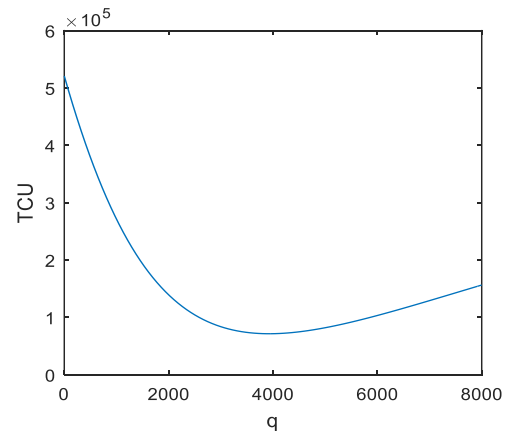
*PB: Para Birimi

Tablo 3. Makine kullanılmama süresi tekdüze dağılım gösterdiğinde optimum değerler için algoritmadaki tüm adımlar

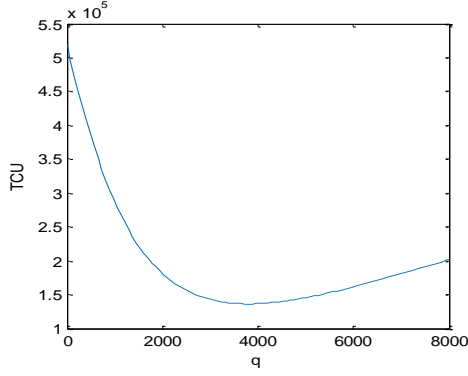
n	t_f	q	$Q = nq$	$TCUB$	$TCUV$	TCU
1	0.05848468	43722.934	43722.934	151144.59	12843.07	163987.65
2	0.09413589	26012.527	52025.054	91173.34	25317.02	116490.36
3	0.12382599	18487.311	55461.934	67753.43	30689.43	98442.86
4	0.14966744	14340.497	57361.989	55455.63	33666.22	89121.85
5	0.17275335	11716.694	58583.470	47976.82	35565.21	83542.03
6	0.19375077	9907.693	59446.157	43016.83	36889.52	79906.34
7	0.21310205	8585.179	60096.251	39537.62	37871.74	77409.37
8	0.23111732	7576.256	60610.046	37002.38	38634.01	75636.39
9	0.24802312	6781.249	61031.244	35105.63	39246.53	74352.16
10	0.26399043	6138.667	61386.675	33660.79	39752.54	73413.32
11	0.27915170	5608.520	61693.720	32547.44	40180.09	72727.52
12	0.29361179	5163.678	61964.138	31684.41	40548.18	72232.59
13	0.30745527	4785.090	62206.164	31015.01	40870.13	71885.14
14	0.32075144	4458.981	62425.740	30498.40	41155.58	71653.98
15	0.33355783	4175.151	62627.260	30104.47	41411.63	71516.11
16	0.34592282	3925.878	62814.044	29810.49	41643.68	71454.17
17	0.35788748	3705.214	62988.646	29599.01	41855.86	71454.87
18	0.36948704	3508.504	63153.063	29456.39	42051.41	71507.80
19	0.38075196	3332.046	63308.882	29371.82	42232.91	71604.73
20	0.39170875	3172.869	63457.374	29336.64	42402.42	71739.06
21	0.40238069	3028.552	63599.593	29343.78	42561.64	71905.43
22	0.41278832	2897.115	63736.540	29387.37	42712.06	72099.43
23	0.42294985	2776.890	63868.481	29462.93	42854.51	72317.44
24	0.43288154	2666.515	63996.371	29566.21	42990.20	72556.40

Makine kullanılmama süresinin tekdüze dağılıma uyması varsayımı altında elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir: tek üretici ve tek alıcıdan oluşan bütünleşik sistem için birim zamandaki toplam maliyet 71454.17 PB, üretici için birim zamandaki toplam maliyet 41643.68 PB ve alıcı için birim zamandaki toplam maliyet 29810.49 PB'dir. Bununla birlikte, optimum sevkiyat miktarı $q=3925.878$ birim, optimum sipariş miktarı $Q=62814.044$ birim ve optimum sevkiyat sayısı $n=16$ olarak elde edilmiştir. Geliştirilen algoritma MS Excel programı ile çözülmüş ve gerekli algoritma adımları Tablo 3'te özetlenmiştir. $n=16$ için bütünleşik toplam maliyet fonksiyonunun sevkiyat miktarına göre değişim grafiği Şekil 2'de gösterilmiştir. Bütünleşik sistemden farklı olarak tedarik zincirini oluşturan taraflar birbirlerinden bağımsız olarak karar aldıklarında aşağıdaki sonuçlar elde edilmektedir. Tedarik zincirinde liderliği üretici üstlendiğinde kendisi açısından minimum maliyeti veren senaryo, sevkiyat sayısı $n=1$ olduğunda elde edilmektedir ve üreticinin birim zamandaki toplam maliyeti 12843.07 PB olmaktadır. Tersine, alıcının liderliği üstlendiği dikkate alınır

minimum maliyeti veren senaryo, sevkiyat sayısı $n=20$ olduğunda elde edilmektedir ve alıcının birim zamandaki toplam maliyeti 29336.64 PB olmaktadır. İlgili değerler Tablo 3'te koyu renk ile gösterilmektedir.



Şekil 2. Makine kullanılmama süresinin tekdüze dağılım göstermesi durumunda bütünleşik toplam maliyetin sevkiyat başına taşıma miktarına göre değişimi



Şekil 3. Makine kullanılmama süresinin üstel dağılım göstermesi durumunda bütünleşik toplam maliyetin sevkiyat başına taşıma miktarına göre değişimi

Makine kullanılmama süresinin üstel dağılıma uyması varsayımı altında elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir: tek üretici ve tek alıcıdan oluşan bütünleşik sistem için birim zamandaki toplam maliyet 136474.96 PB, üretici için

birim zamandaki toplam maliyet 73267.68 PB ve alıcı için birim zamandaki toplam maliyet 63207.28 PB'dir. Bununla birlikte, optimum sevkiyat başına taşıma miktarı $q = 3789.250$ birim, optimum sipariş miktarı $Q=117466.753$ birim ve optimum sevkiyat sayısı $n=31$ olarak elde edilmiştir. Gerekli algoritma adımları Tablo 4'te özetlenmiştir. $n=31$ için bütünleşik toplam maliyet fonksiyonunun sevkiyat miktarına göre değişim grafiği Şekil 3'te gösterilmiştir. Tedarik zincirini oluşturan tarafların birbirlerinden bağımsız olarak karar aldıkları dikkate alınırsa aşağıdaki sonuçlar elde edilmektedir. Tedarik zincirinde liderliği üretici üstlendiğinde kendisi açısından minimum maliyeti veren senaryo, sevkiyat sayısı $n=1$ olduğunda elde edilmektedir ve üreticinin birim zamandaki toplam maliyeti 13290.61 PB olmaktadır. Tersine, alıcının liderliği üstlendiği dikkate alınırsa minimum maliyeti veren senaryo, sevkiyat sayısı $n=49$ olduğunda elde edilmektedir ve alıcının birim zamandaki toplam maliyeti 61698.37 PB olmaktadır.

Tablo 4. Makine kullanılmama süresi üstel dağılım gösterdiğinde optimum değerler için algoritmadaki tüm adımlar.

n	q	$Q = nq$	$TCUB$	$TCUV$	TCU
1	58104.079	58104.079	251594.66	13290.61	264885.27
2	38488.952	76977.904	178688.18	31577.88	210266.06
3	28910.775	86732.326	144568.80	41677.93	186246.73
4	23201.212	92804.846	124706.45	48046.46	172752.90
5	19397.876	96989.381	111696.29	52442.92	164139.21
6	16678.028	100068.169	102519.08	55672.14	158191.22
7	14634.248	102439.734	95708.105	58152.13	153860.23
8	13041.433	104331.464	90461.73	60122.88	150584.61
9	11764.641	105881.773	86304.89	61731.24	148036.13
10	10718.009	107180.085	82937.74	63072.30	146010.04
11	9844.310	108287.407	80161.14	64210.78	144371.91
12	9103.825	109245.903	77838.21	65191.64	143029.85
13	8468.227	110086.95	75870.84	66048.01	141918.85
14	7916.608	110832.514	74188.16	66803.49	140991.65
15	7433.370	111500.544	72736.16	67476.91	140213.08
16	7006.528	112104.450	71473.90	68082.46	139556.36
17	6626.694	112653.803	70370.25	68630.56	139000.81
18	6286.557	113158.022	69399.34	69130.83	138530.17
19	5980.145	113622.746	68541.91	69589.56	138131.48
20	5702.716	114054.328	67781.07	70013.20	137794.27
21	5450.306	114456.434	67104.18	70405.86	137510.04
22	5219.687	114833.123	66500.02	70771.74	137271.76
23	5008.168	115187.857	65959.22	71114.37	137073.59
24	4813.427	115522.241	65474.86	71435.77	136910.63
25	4633.580	115839.488	65039.75	71739.02	136778.78
26	4466.975	116141.343	64648.48	72026.02	136674.50
27	4312.192	116429.182	64296.51	72298.28	136594.80
28	4168.014	116704.401	63979.79	72557.30	136537.09
29	4033.394	116968.417	63694.63	72804.51	136499.14
30	3907.404	117222.133	63438.09	73040.90	136478.99
31	3789.250	117466.753	63207.28	73267.68	136474.96
32	3678.211	117702.766	63000.10	73485.45	136485.55
33	3573.674	117931.254	62814.18	73695.25	136509.44
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
48	2515.579	120747.800	61699.44	76201.02	137900.46
49	2467.522	120908.562	61698.37	76339.71	138038.07
50	2421.345	121067.235	61703.21	76476.15	138179.36

5.1. Duyarlılık analizleri

Bu altbölümde, geliştirilen tedarik zinciri modelinin önemli parametrelerindeki (S_B, A_B, A_V, D, P) değişimlerin optimum sonuçlar üzerindeki etkisi incelenmektedir. Parametre değerlerinin $\mp\%30$ oranında değiştiği varsayılmaktadır. Makine kullanılmama süresinin tekdüze dağılım göstermesi durumunda parametrelerdeki değişimlerin optimum çözümler üzerindeki etkisi Tablo 5'te verilmektedir. Tablo 5'ten aşağıdaki çıkarımlar yapılabilir:

- Kayıp satışlar maliyeti arttığında bütünlük toplam maliyet ve üreticinin toplam maliyeti artarken, alıcının toplam maliyeti azalmaktadır. Kayıp satışlar maliyeti arttığında, sevkiyat sayısı ve sipariş miktarı artmaktadır, ancak sevkiyat başına taşıma miktarı azalmaktadır.
- Alıcının sabit sipariş verme maliyeti arttığında, bütünlük toplam maliyet ve sevkiyat başına taşıma miktarı artmaktadır, sevkiyat sayısı değişmemektedir.
- Üreticinin üretim hazırlık maliyeti arttığında, beklendiği gibi bütünlük toplam maliyet artmaktadır. Bir üretim çevrimi içerisindeki sevkiyat sayısı, üreticinin üretim hazırlık maliyetindeki değişimlerden etkilenmemektedir.
- Talep miktarı arttığında bütünlük toplam maliyet, üreticinin ve alıcının toplam maliyetleri artmaktadır. Bununla birlikte, talep miktarı arttığında sevkiyat sayısı, sevkiyat başına taşıma miktarı ve sipariş miktarı da artmaktadır.
- Üretim miktarı arttığında bütünlük toplam maliyet ve alıcının toplam maliyeti azalmaktadır, üreticinin toplam maliyeti ise artmaktadır. Üretim hızı arttığında sevkiyat sayısı azalmaktadır.

Makine kullanılmama süresinin üstel dağılım göstermesi durumunda parametrelerdeki değişimlerin optimum çözümler üzerindeki etkisi Tablo 6'da verilmektedir. Tablo 6'dan aşağıdaki çıkarımlar yapılabilir:

- Kayıp satışlar maliyeti arttığında bütünlük toplam maliyet, üreticinin ve alıcının toplam maliyeti artmaktadır. Kayıp satışlar maliyeti $\%30$ arttığında, bütünlük toplam maliyet, üreticinin ve alıcının toplam maliyeti sırasıyla $\%7.49$, $\%13.39$ ve $\%0.66$ oranında artmaktadır. Beklenildiği gibi kayıp satışlar maliyetindeki değişimlerden üreticinin daha fazla etkilendiği görülmektedir. Kayıp satışlar maliyeti arttığında, sevkiyat sayısı ve sipariş miktarı artmaktadır.
- Alıcının sabit sipariş verme maliyeti arttığında, bütünlük toplam maliyet ve sevkiyat başına taşıma miktarı artmaktadır. Üreticiden alıcıya yapılan sevkiyatların sayısı, sabit sipariş verme maliyetindeki değişimlere karşı duyarlı değildir.
- Üreticinin üretim hazırlık maliyeti arttığında bütünlük toplam maliyet ve üreticinin toplam maliyeti artarken alıcının toplam maliyeti artmaktadır. Sevkiyat sayısı üretim hazırlık maliyetindeki değişimlerden etkilenmemektedir.
- Talep miktarı arttığında bütünlük toplam maliyet, üreticinin ve alıcının toplam maliyeti artmaktadır. Talep miktarı $\%30$ oranında arttığında bütünlük toplam maliyet, üreticinin ve alıcının birim zamandaki toplam maliyeti sırasıyla $\%24.78$, $\%25.87$ ve $\%23.52$ oranında artmaktadır. Bununla birlikte, talep miktarı arttığında sevkiyat sayısı, sevkiyat başına taşıma miktarı ve sipariş miktarı da artmaktadır.
- Üretim miktarı arttığında bütünlük toplam maliyet artmaktadır, sevkiyat sayısı azalırken sevkiyat başına taşıma miktarı artmaktadır.

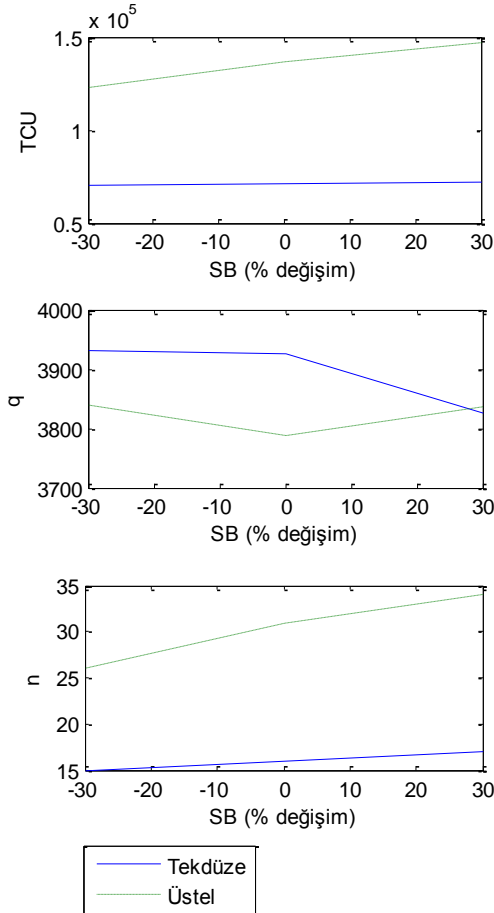
Tablo 5. Makine kullanılmama süresinin tekdüze dağılım gösterdiği durum için kayıp satışlar maliyetinin ve talep miktarının optimum çözümler üzerindeki etkisi

Parameter	Değer	n	q	$Q = nq$	$TCUB$	$TCUV$	TCU
S_B	7(-%30)	15	3931.127	58966.904	31179.86	38732.85	69912.71
	10(%0)	16	3925.878	62814.044	29810.49	41643.68	71454.17
	13(+%30)	17	3826.026	65042.437	28952.39	43326.81	72279.20
A_B	70(-%30)	16	3925.642	62810.271	29789.51	41640.96	71430.47
	100(%0)	16	3925.878	62814.044	29810.49	41643.68	71454.17
	130(+%30)	16	3926.114	62817.817	29831.48	41646.40	71477.88
A_V	210(-%30)	16	3925.170	62802.726	29818.67	41564.38	71383.05
	300(%0)	16	3925.878	62814.044	29810.49	41643.68	71454.17
	390(+%30)	16	3926.585	62825.363	29802.33	41722.95	71525.28
D	35000(-%30)	12	3280.874	39370.482	23039.28	28990.45	52029.72
	50000(%0)	16	3925.878	62814.044	29810.49	41643.68	71454.17
	65000(+%30)	22	4219.541	92829.903	36219.11	54099.26	90318.38
P	112000(-%30)	21	3609.874	75807.352	30221.36	41423.51	71644.87
	160000(%0)	16	3925.878	62814.044	29810.49	41643.68	71454.17
	208000(+%30)	15	3846.324	57694.858	29414.04	41812.83	71226.87

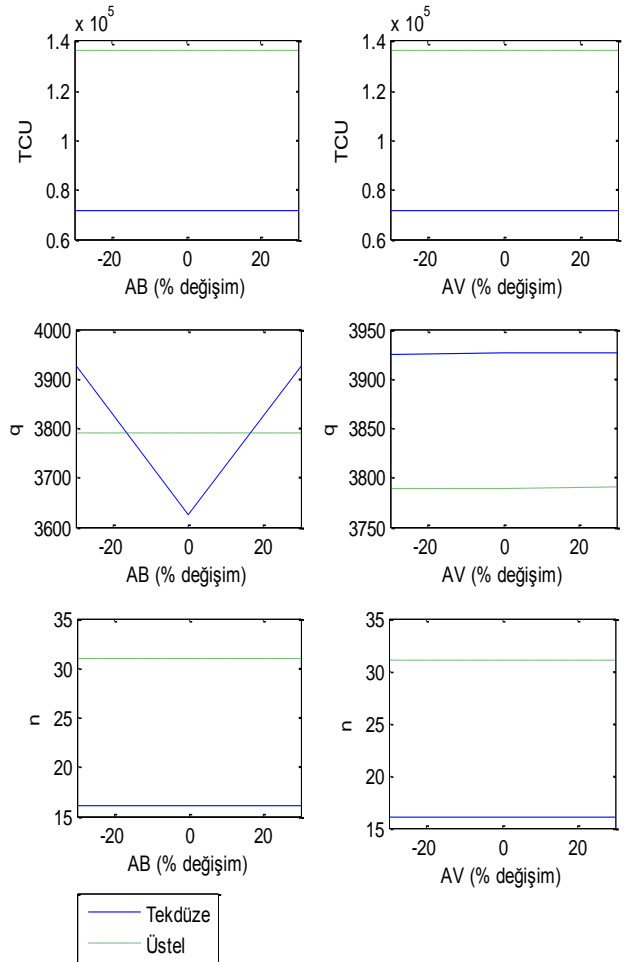
Tablo 6. Makine kullanılmama süresinin üstel dağılım gösterdiği durum için kayıp satışlar maliyetinin ve talep miktarının optimum çözümler üzerindeki etkisi

Parameter	Değer	n	q	$Q = nq$	$TCUB$	$TCUV$	TCU
S_B	7(-%30)	26	3839.396	99824.303	62728.20	59759.64	122487.85
	10(%0)	31	3789.250	117466.753	63207.28	73267.68	136474.96
	13(%30)	34	3837.180	130464.128	63624.98	83077.99	146702.97
A_B	70(-%30)	31	3789.089	117461.750	63199.26	73263.93	136463.19
	100(%0)	31	3789.250	117466.753	63207.28	73267.68	136474.96
	130(+%30)	31	3789.387	117471.003	63215.87	73270.86	136486.73
A_V	210(-%30)	31	3788.790	117452.497	63217.96	73221.68	136439.64
	300(%0)	31	3789.250	117466.753	63207.28	73267.68	136474.96
	390(+%30)	31	3789.686	117480.256	63197.17	73313.11	136510.28
D	35000(-%30)	22	3407.404	74962.892	47435.62	52218.02	99653.64
	50000(%0)	31	3789.250	117466.753	63207.28	73267.68	136474.96
	65000(+%30)	41	4125.740	169155.331	78071.09	92223.69	170294.79
P	112000(-%30)	38	3583.743	136182.234	61806.47	69469.49	131275.96
	160000(%0)	31	3789.250	117466.753	63207.28	73267.68	136474.96
	208000(+%30)	28	3916.495	109661.854	63873.52	74949.70	138823.22

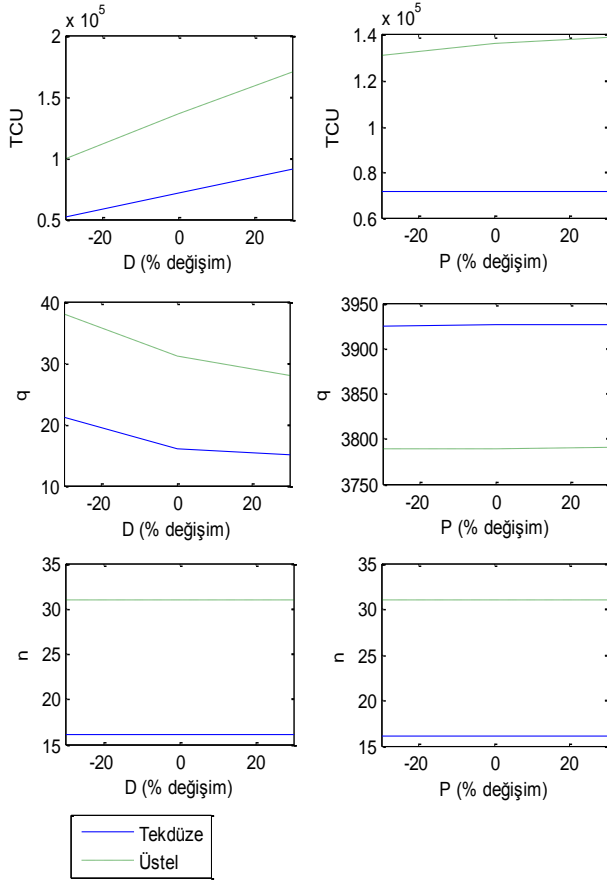
Parametrelerdeki değişimlerin makine kullanılmama süresinin tekdüze ve üstel dağılım gösterdiği durumda optimum sonuçlar üzerindeki etkilerini gösteren grafikler Şekil 4-6'da verilmiştir.



Şekil 4. Kayıp satışlar (S_B) maliyetinin bütünlük toplam maliyet, sevkiyat başına taşıma miktarı ve sevkiyat sayısı üzerindeki etkisi



Şekil 5. Sipariş (A_B) ve üretim hazırlık (A_V) maliyetlerinin bütünlük toplam maliyet, sevkiyat başına taşıma miktarı ve sevkiyat sayısı üzerindeki etkisi



Şekil 6. Talep (D) ve üretim (P) hızlarının bütünlük toplam maliyet, sevkiyat başına taşıma miktarı ve sevkiyat sayısı üzerindeki etkisi

VI. SONUÇ

Literatürde, üretim sırasında üretilen kusurlu ürünlerin sadece üretici tarafından tamir edildiği yada yeniden işlendiği varsayımı altında geliştirilen birçok merkezi tedarik zinciri modeli bulunmaktadır. Bu çalışmada, kusurlu ürünlerin tamiri ve makine kullanılmama süresinin rassal bir değişken olması varsayımları altında tek bir üretici ve tek bir alıcıdan oluşan iki aşamalı merkezi tedarik zinciri modeli analiz edilmiştir. Kusurlu ürünlerin tamir işlemi dışkaynak kullanılarak yapılmaktadır. Üretimin gecikmesinden dolayı siparişlerin istenilen zamanda teslim edilememesi durumu üretici için ceza maliyeti ile ilişkilendirilmiş, müşterilerin taleplerinin karşılanmaması durumu ise alıcı için kayıp satışlar maliyeti ile ilişkilendirilmiştir. Üretimin gecikmesinden kaynaklanan makine kullanılmama süresinin ise tekdüze ve üstel dağılım gösterdiği ayrıca geliştirilen modele dahil edilmiştir. Bu varsayımlar altında bütünlük toplam maliyeti minimum yapan optimum sipariş miktarı ve sevkiyat sayısı, önerilen bir algoritma yardımıyla elde edilmiştir. Modelin işleyişi sayısal bir örnek yardımıyla açıklanmış, önemli model parametrelerinin optimum sonuçlar üzerindeki etkisi duyarlılık analizi yardımıyla incelenmiştir.

Sayısal çözümler ve duyarlılık analizi sonucunda, makine kullanılmama süresinin hem tekdüze hem de üstel

dağılım gösterdiği durumlar için talep miktarındaki artışın toplam maliyette de artışa neden olduğu görülmüştür. Kayıp satışlar maliyetindeki artış, makine kullanılmama süresinin tekdüze dağılım gösterdiği durumda sevkiyat başına taşıma miktarını azaltırken, makine kullanılmama süresinin üstel dağılım gösterdiği durumda sevkiyat başına taşıma miktarını artırmıştır. Kayıp satışlar maliyetinin artmasıyla bir üretim çevrim süresi içerisinde üreticiden alıcıya gönderilen sevkiyatların sayısında artmıştır. Bu artış, makine kullanılmama süresinin üstel dağılıma uyduğu durumda daha fazla olmuştur. Bu şartlar altında, kayıp satışlar maliyetindeki herhangi bir azalma hem üretici ve alıcı için maliyet tasarrufu sağlayacaktır. Sonuç olarak, bu çalışmada geliştirilen model, kusurlu ürünlerin dışkaynak kullanılarak tamir edilmesi varsayımı ile makinelerin kullanım dışı kalma süreleri ve kayıp satışlardan kaynaklanan sevkiyat sayısı değişimlerini birlikte ele aldığından işletme yöneticilerine karar vermede önemli bir araç ve işletmelerin maliyetlerini optimize etmelerine yardımcı olacaktır.

Çalışma bazı kısıtlar içermektedir. Tek çeşit ürün üretimi ve bu ürüne olan talebin sabit ve biliniyor (deterministik) olması çalışmadaki en önemli kısıtlardandır. Gerçek yaşamda talep belirsizdir ve birçok durumda stokastik (olasılıklı) yapı göstermektedir [67]. Bu durumda tedarik süresi bir değişkendir sabit değildir. Tedarik zincirinde tam zamanında üretim sisteminin benimsenmesi işletmeleri stoklarla ilgili maliyetlerden kurtarmaktadır. Tedarikçi ve alıcı arasında yapılan uzun dönemli satış sözleşmeleri ile satın alınan ürünlerin daha küçük sevkiyatlar halinde ve daha sık teslimi yapılabilir ve sonucunda ürün kalitesi artırılabilir, stok maliyeti ve tedarik süresi azaltılabilir [68, 69]. Bu nedenle, tedarik süresinin kontrol edilmesi, tam zamanında üretim düşüncesinin gerçekleşmesi için önemli faktörlerden biridir [70]. Geliştirilen modelde tedarik süresi dikkate alınabilir [71]. Bununla birlikte, talep ürüne bağlı olarak birçok faktörden etkilenmektedir. Örneğin, talebin fiyata karşı duyarlı olması onun en temel özelliklerinden biridir. Talep miktarının satış fiyatının bir fonksiyonu olduğu modele dahil edilebilir [72]. Artan rekabet ortamında işletmeler varlıklarını devam ettirmek ve müşteri istek ve ihtiyaçlarına cevap verebilmek amacıyla tek çeşit ürün üretiminin gerçekleştiği montaj hatları üzerinde iyileştirmeler yaparak daha çok ürün üretmektedirler [73]. Çok ürün üretilmesinin modele dahil edilmesiyle sonraki çalışmalar yapılabilir. Bu çalışmada geliştirilen iki aşamalı merkezi tedarik zinciri modelinde üretim sırasında kusurlu ürünlerin üretildiği ve bu ürünlerin alıcı tarafından gerçekleştirilen tamamen güvenilir tarama işlemi sonucunda tespit edilerek tamir edildiği varsayılmıştır. Tarama sırasında bazı kusursuz ürünler kusurlu olarak (Tip 1 hata), kusurlu ürünler de kusursuz olarak (Tip 2 hata) seçilebilir. Geliştirilen model, tarama hatalarının da dahil edilmesiyle genişletilebilecektir. Tamir edilen kusurlu ürünler içerisinde bu ürünlerin tekrar işleme taşınmasından yada süreç hatalarından kaynaklı kusurlu ürünler olabilir. Tamir edilen ürünler içerisinde de

belirli oranda kusurlu ürünler olabileceği varsayımı modele dahil edilebilir. Bunlarla birlikte, makine kullanılmama süresinin farklı dağılıma uymasının (örneğin, Poisson dağılımı), üreticiden alıcıya gönderilen sevkiyat büyüklüklerinin eşit ve geometrik değişim göstermesinin ve çevre maliyetlerinin (üretim, taşıma ve stok) bu çalışmada geliştirilen modele dahil edilmesiyle sonraki çalışmaların yapılabileceği düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR

Yazar, Editörlere ve makaleyi dikkatli ve özverili bir şekilde okuyan ve çok değerli katkılar sunan hakemlere çok teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

[1] Ataman, G. (2002). Tedarik zinciri ve yönetimi: değişim mühendisliği ve dış kaynaklardan yararlanma ilişkisi üzerine bir irdeleme. *Öneri*, 5(17), 35-42.

[2] Sarı, K. & Güngör, C. (2010). Tedarikçi yönetimli envanter yaklaşımının tedarik zinciri performansına etkileri. *İtüdergisi/d mühendislik*, 6(2), 29-40.

[3] Toktaş Palut, P., & Ülengin, F. (2011). Kapasitesi sınırlı çoklu tedarikçiden oluşan iki kademeli bir tedarik zincirinin koordinasyonu. *İtüdergisi/d*, 10(2), 15-26.

[4] Torun, H., & Canbulut, G. (2019). İki aşamalı tedarik zinciri koordinasyonunun bulanık talep altında analizi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(3), 1315-1328.

[5] Yazgan, H. R., Sarı, Ö., & Seri, V. (1998). Toyota üretim sisteminin özellikleri. *SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2, 129-134.

[6] Gersil, A. (2007). Üretim sistemleri ve teknolojilerindeki gelişmelerin ve küreselleşmenin geleneksel maliyet muhasebesine etkileri. *Ankara Üniversitesi SBF Dergisi*, 62(4), 107-123.

[7] Goyal, S. K. (1976). An integrated inventory model for a single supplier-single customer problem. *International Journal of Production Research*, 15(1), 107-111.

[8] Pekin Alakoç, N. (2012). Bulanık Kalite Kontrol Grafiklerinde Yeni Bir Yaklaşım (Oran Yaklaşımı). Doktora tezi, Ankara Üniversitesi, Türkiye, s. 13-16.

[9] Yıldırım, H., & Karaca, E. (2013). Üretim sürecinde istatistiksel proses kontrol (İPK) uygulamaları ve elektronik sektöründe bir inceleme. *Öneri*, 10(39), 77-87.

[10] Hayek, P. A., & Salameh, M. K. (2001). Production lot sizing with the reworking of imperfect quality items produced. *Production Planning & Control*, 12(6), 584-590.

[11] Yüksel, H., & Çelikoğlu, C. C. (2004). Yeniden üretim faaliyetlerinin planlaması ve kontrolü için bir yöntem önerisi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 6(3), 152-166.

[12] Hsu, J., & Hsu, L. (2012). An integrated single-vendor single-buyer production-inventory model for items with imperfect quality and inspection errors. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 3(5), 703-720.

[13] Tseng, C. T., Wu, M. F., Lin, H. D., & Chiu, Y. S. P. (2014). Solving a vendor-buyer integrated problem with rework and a specific multi-delivery policy by a two-

phase algebraic approach. *Economic Modelling*, 36, 30-36.

[14] Wahab, M. I. M., Mamun, S. M. H., & Ongkunaruk, P. (2011). EOQ models for a coordinated two-level international supply chain considering imperfect items and environmental impact. *International Journal of Production Economics*, 134(1), 151-158.

[15] Khara, B., Dey, J. K., & Mondal, S. K. (2020). An integrated imperfect production system with advertisement dependent demand using branch and bound technique. *Flexible Services and Manufacturing Journal*. <https://doi.org/10.1007/s10696-020-09377-5>.

[16] Jaber, M. Y., Zaroni, S., & Zavanella, L. E. (2014). Economic order quantity models for imperfect items with buy and repair options. *International Journal of Production Economics*, 155, 126-131.

[17] Tanyeri, M., & Fırat, A. (2005). Rekabet değişkeni olarak dış kaynak kullanımı (Outsourcing). *Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 7(3), 268-279.

[18] Zalluhoğlu, A. E., & Özhan Dedeoğlu, A. (2011). Tedarik zinciri yönetiminde dış kaynak kullanımı: otomotiv sektörü üzerine alan araştırması. *Ege Stratejik Araştırmalar Dergisi*, 2(2), 49-63.

[19] Acar, D. ve Aslantaş Ateş, B. (2011). Tedarik zincirinin temel faaliyetlerinde dış kaynak kullanımı: tekstil-konfeksiyon sektörü işletmelerinde bir araştırma. *Mali Çözüm Dergisi*, 105, 17-46.

[20] Zhang, Y., He, Z., He, S., Cai, K., & Wang, D. (2020). Manufacturer warranty service outsourcing strategies in a dual-channel supply chain. *International Transactions in Operational Research*, 27(6), 2899-2926.

[21] Kuruca, H. İ., & Rumeysa, K. E. (2019). Otomatik üretim sistemlerinde verimlilik analizi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 7(4), 897-905.

[22] Taleizadeh, A. A., Sari-Khanbaglo, M. P., & Cárdenas-Barrón, L. E. (2019). Outsourcing rework of imperfect items in the economic production quantity (EPQ) inventory model with backordered demand. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 49(12), 2688-2699.

[23] Arslan, A. R., Sönmez, A., & Gürleyen, L. (2009). Türkiye mobilya işletmelerinin rekabet gücünü etkileyen faktörlerin incelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 12(1), 47-53.

[24] Yılmaz, H. (2005). İşletmelerde finansal verimliliğin artırılması ve KOBİ'lerde bir araştırma. *Muhasebe ve Finansman Dergisi*, 27, 125-133.

[25] Çatı, K., Çömlekçi, İ., & Zengin, E. (2015). Dış kaynak kullanımının işletme finansal performansına etkisi: Düzce ili imalat sanayisinde kobi yöneticileri üzerinde bir araştırma. *KMÜ Sosyal ve Ekonomik Araştırmalar Dergisi*, 17(28), 56-67.

[26] Yorgancı, C., & Eren, T. (2013). Tek makineli çizelgelemede takım değişikliği durumunda maksimum gecikme minimizasyonu: tamsayı programlama modeli. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 5(1), 19-22.

[27] Sütçü, A., Karşıyaka, O., & Burhan, M. E. (2019). Bir mobilya üretim tesisinde iş analizi ve benzetim uygulaması ile süreç verimliliğinin artırılması. *Avrupa*

Bilim ve Teknoloji Dergisi, 17, 45-57.

- [28] Belbağ, S., Çimen, M., & Soysal, M. (2020). Üretim sistemlerinde endüstri 4.0'in envanter maliyetlerine etkisi üzerine bir senaryo incelemesi. *Verimlilik Dergisi*, 2, 125-143.
- [29] Banerjee, A. (1986). A joint economic-lot-size model for purchaser and vendor. *Decision Sciences*, 17(3), 292-311.
- [30] Goyal, S. K. (1995). A one-vendor multi-buyer integrated inventory model: A comment. *European Journal of Operational Research*, 82(1), 209-210.
- [31] Goyal, S. K., & Nebebe, F. (2000). Determination of economic production-shipment policy for a single vendor-single-buyer system. *European Journal of Operational Research*, 121(1), 175-178.
- [32] Ertogral, K., Darwish, M., & Ben-Daya, M. (2007). Production and shipment lot sizing in a vendor-buyer supply chain with transportation cost. *European Journal of Operational Research*, 176(3), 1592-1606.
- [33] Ben-Daya, M., Darwish, M., & Ertogral, K. (2008). The joint economic lot sizing problem: Review and extensions. *European Journal of Operational Research*, 185(2), 726-742.
- [34] Ouyang, L. Y., Ho, C. H., & Su, C. H. (2009). An optimization approach for joint pricing and ordering problem in an integrated inventory system with order-size dependent trade credit. *Computers & Industrial Engineering*, 57(3), 920-930.
- [35] Yang, M. F. (2010). Supply chain integrated inventory model with present value and dependent crashing cost is polynomial. *Mathematical and Computer Modelling*, 51(5-6), 802-809.
- [36] Hoque, M. A. (2013). A vendor-buyer integrated production-inventory model with normal distribution of lead time. *International Journal of Production Economics*, 144(2), 409-417.
- [37] Huang, Y. S., Fang, C. C., & Lin, Y. A. (2020). Inventory management in supply chains with consideration of Logistics, green investment and different carbon emissions policies. *Computers & Industrial Engineering*, 139, 106207.
- [38] Seliama, M., Cárdenas-Barrón, L., & Rushd, S. (2020). An algebraic decision support model for inventory coordination in the generalized n-stage non-serial supply chain with fixed and linear backorders costs. *Symmetry*, 12, 1-20.
- [39] Huang, Y. S., Ho, J. W., Jian, H. J., & Tseng, T. L. B. (2021). Quantity discount coordination for supply chains with deteriorating inventory. *Computers & Industrial Engineering*, 152, 106987.
- [40] Huang, C. K. (2001). An integrated inventory model for supplier and retailer with defective items. *Journal of Information and Optimization Sciences*, 22(3), 509-519.
- [41] Huang, C. K. (2002). An integrated vendor-buyer cooperative inventory model for items with imperfect quality. *Production Planning & Control*, 13(4), 355-361.
- [42] Abdul-Jalbar, B., Gutierrez, J. M., & Sicilia, J. (2007). An integrated inventory model for the single-vendor two-buyer problem. *International Journal of Production Economics*, 108(1-2), 246-258.
- [43] Su, C. H. (2012). Optimum replenishment policy for an integrated inventory system with defective items and allowable shortage under trade credit. *International Journal of Production Economics*, 139(1), 247-256.
- [44] Jha, J. K., & Shanker, K. (2014). An integrated inventory problem with transportation in a divergent supply chain under service level constraint. *Journal of Manufacturing Systems*, 33(4), 462-475.
- [45] Kumar, R. S., Tiwari, M. K., & Goswami, A. (2016). Two-echelon fuzzy stochastic supply chain for the manufacturer-buyer integrated production-inventory system. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 27(4), 875-888.
- [46] Kim, M. S., Kim, J. S., Sarkar, B., Sarkar, M., & Iqbal, M. W. (2018). An improved way to calculate imperfect items during long-run production in an integrated inventory model with backorders. *Journal of Manufacturing Systems*, 47, 153-167.
- [47] Gharaei, A., Karimi, M., & Shekarabi, S. A. H. (2019). An integrated multi-product, multi-buyer supply chain under penalty, green, and quality control policies and a vendor managed inventory with consignment stock agreement: The outer approximation with equality relaxation and augmented penalty algorithm. *Applied Mathematical Modelling*, 69, 223-254.
- [48] Öztürk, H. (2020). A study and comparison of shipment policies with repair options in a two-tier supply chain model. *Engineering Management Journal*, 33(2), 96-125.
- [49] Khanna, A., Gautam, P., Sarkar, B., & Jaggi, C. K. (2020). Integrated vendor-buyer strategies for imperfect production systems with maintenance and warranty policy. *RAIRO-Operations Research*, 54(2), 435-450.
- [50] Khan, M., Hussain, M., & Cárdenas-Barrón, L. E. (2017). Learning and screening errors in an EPQ inventory model for supply chains with stochastic lead time demands. *International Journal of Production Research*, 55(16), 4816-4832.
- [51] Tiwari, S., Daryanto, Y., & Wee, H. M. (2018). Sustainable inventory management with deteriorating and imperfect quality items considering carbon emission. *Journal of Cleaner Production*, 192, 281-292.
- [52] Marchi, B., Zanoni, S., & Jaber, M. Y. (2019). Economic production quantity model with learning in production, quality, reliability and energy efficiency. *Computers & Industrial Engineering*, 129, 502-511.
- [54] Groenevelt, H., Pintelon, L., & Seidmann, A. (1992). Production lot sizing with machine breakdowns. *Management Science*, 38(1), 104-123.
- [55] Abboud, N. E., Jaber, M. Y., & Noueihed, N. A. (2000). Economic lot sizing with the consideration of random machine unavailability time. *Computers & Operations Research*, 27(4), 335-351.
- [56] Chen, K. K., Chiu, Y. S. P., & Ting, C. K. (2010). Producer's replenishment policy for an EPQ model with rework and machine failure taking place in backorder reloading time. *WSEAS Transactions on Mathematics*, 9(4), 223-233.
- [57] Dhoub, K., Gharbi, A., & Aziza, M. B. (2012). Joint

optimum production control/preventive maintenance policy for imperfect process manufacturing cell. *International Journal of Production Economics*, 137(1), 126-136.

[58] Huang, H., He, Y., & Li, D. (2017). EPQ for an unreliable production system with endogenous reliability and product deterioration. *International Transactions in Operational Research*, 24(4), 839-866.

[59] Deiranlou, M., Dehghanian, F., & Pirayesh, M. A. (2019). The simultaneous effect of holding safety stock and purchasing policies on the economic production quantity model subject to random machine breakdown. *International Journal of Engineering*, 32(11), 1643-1655.

[60] Wee, H. M., & Widyadana, G. A. (2013). Single-vendor single-buyer inventory model with discrete delivery order, random machine unavailability time and lost sales. *International Journal of Production Economics*, 143(2), 574-579.

[61] Taleizadeh, A. A., Samimi, H., Sarkar, B., & Mohammadi, B. (2017). Stochastic machine breakdown and discrete delivery in an imperfect inventory-production system. *Journal of Industrial & Management Optimization*, 13(3), 1511.

[62] Chiu, Y., Zhao, Z., Chiu, S., & Chiu, V. (2020). A vendor-buyer coordinated system featuring an unreliable machine, scrap, outsourcing, and multiple shipments. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 11(3), 341-358.

[63] Shi, J., Katehakis, M. N., Melamed, B., & Xia, Y. (2014). Production-inventory systems with lost sales and compound Poisson demands. *Operations Research*, 62(5), 1048-1063.

[64] Joglekar, P. N. (1988). Note—Comments on “A quantity discount pricing model to increase vendor profits”. *Management Science*, 34(11), 1391-1398.

[65] Hahm, J., & Yano, C. A. (1992). The economic lot and delivery scheduling problem: The single item case. *International Journal of Production Economics*, 28(2), 235-252.

[66] Axsater, S. (2006). *Inventory Control*. Second edition, Springer.

[67] Taş, A. (2007). Deterministik ve stokastik talep varsayımları altında envanter parti büyüklüğü belirleme problemi için modeller. *Hacettepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 25(1), 215-237.

[68] Güner, E., & Karaca, M. (2004). Tam zamanında üretim sisteminde tedarikçi ilişkileri ve en iyi parti büyüklüğü üzerine bir uygulama. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 19(4), 443-454.

[69] Kiracı, M. (2009). Stok yönetimi ve karlılık ilişkisinin finansal oranlar aracılığıyla incelenmesi: İMKB imalat sektöründe bir araştırma. *ODTÜ Geliştirme Dergisi*, 36, 161-195.

[70] Ben-Daya, M. A., & Raouf, A. (1994). Inventory models involving lead time as a decision variable. *Journal of the Operational Research Society*, 45(5), 579-582.

[71] Pan, J. C. H., & Yang, J. S. (2002). A study of an integrated inventory with controllable lead time. *International Journal of Production*

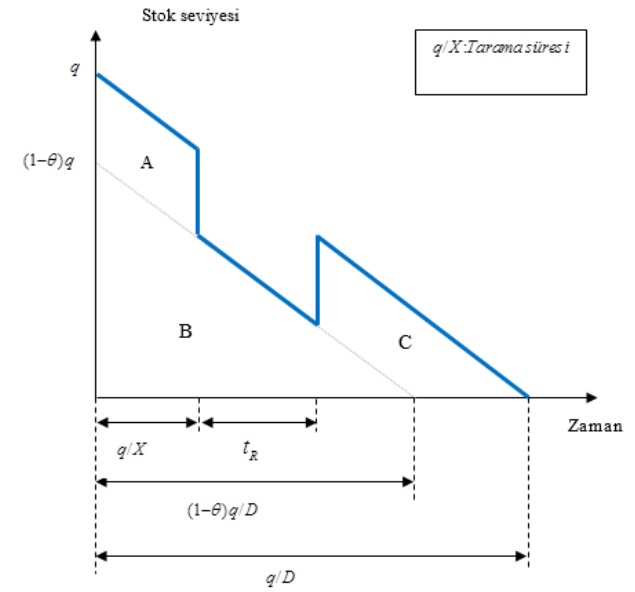
Research, 40(5), 1263-1273.

[72] Rad, M. A., Khoshalhan, F., & Glock, C. H. (2014). Optimizing inventory and sales decisions in a two-stage supply chain with imperfect production and backorders. *Computers & Industrial Engineering*, 74, 219-227.

[73] Özcan, U., & Peker, A. (2007). Karışık modellenli U-tipi montaj hatlarında hat dengeleme ve model sıralama problemleri için yeni bir sezgisel yaklaşım. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22(2), 277-286.

EK

Alıcı için stokta tutma maliyetinin hesaplanması



Alıcının herhangi sipariş çevrimindeki stok seviyesinin zamana göre değişimi yukarıdaki şekilde ayrıntılı olarak verilmiştir. Alıcı için çevrim başına stokta tutma (elde bulundurma) maliyeti toplam stok miktarının birim stok maliyeti ile çarpımı sonucu hesaplanır. Toplam stok miktarı eğri altında kalan alanlar toplamıdır.

□

$$A \text{ alanı} = (q/X)(\theta q) = \theta q^2 / X,$$

△

$$B \text{ alanı} = (1-\theta)q((1-\theta)q/D)/2 = (1-\theta)^2 q^2 / 2D,$$

□

$$C \text{ alanı} = [(q/D) - ((q/X) + t_R)](\theta q) - (\theta q)((\theta q)/D)/2$$

$$= \theta q^2 / D - \theta q^2 / X - (\theta q/R)(\theta q) - \theta^2 q^2 / 2D$$

$$= \theta q^2 (1/D - 1/X - \theta(1/R + 1/2D)).$$

Bir üretim çevrimi içerisinde n tane sevkiyat yapıldığını dikkate alırsak, alıcı için stokta tutma maliyeti (kusursuz, kusurlu ve tamir edilen ürünler) aşağıdaki gibidir:

$$\text{Stokta tutma maliyeti} = h_B (1-\theta)^2 n q^2 / 2D + h_d \theta n q^2$$

$$/ X + h_R \theta n q^2 (1/D - 1/X - \theta(1/R + 1/2D))$$

Efficiency Evaluation of European Countries in Terms of COVID-19

Avrupa Ülkelerinin COVID-19 Açısından Verimliliklerinin Değerlendirmesi

Gökçen BAYRAM¹ , Özlem YURTSEVER² 

¹Marmara University, Institute of Pure and Applied Sciences, Industrial Engineering, Istanbul / Turkey

²Marmara University, Vocational School of Technical Sciences, Department of Property Protection and Security, Istanbul / Turkey

Abstract

The COVID-19 Pandemic has effected millions of people all over the world. Therefore, the behaviour of countries is important to minimise the losses. In this paper the performance of 27 European countries on spread and deaths caused by COVID-19 pandemics is evaluated and compared by using input-oriented data envelopment analysis (DEA) method. The model is performed in two steps. In the first step, the contagion control efficiency is analysed whereas in the second step the medical treatment efficiency is evaluated. Moreover, the countries are classified into the four zone by using the area chart. For the countries in each zones, some recommendations are given.

Keywords: COVID-19, Data Envelopment Analysis, Contagion Control Efficiency, Medical Treatment Efficiency

Öz

COVID-19 pandemisi tüm dünyada milyonlarca insanı etkilemektedir. Bu nedenle, ülkelerin davranışları, kayıpları en aza indirmek için önemlidir. Bu çalışmada 27 Avrupa ülkesinin COVID-19 salgının neden olduğu yayılma ve ölümler üzerindeki performansı, girdi odaklı veri zarflama analizi (VZA) yöntemi kullanılarak değerlendirilmiş ve karşılaştırılmıştır. Buradak' model iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, bulaşma kontrolünün etkinliği analiz edilirken, ikinci aşamada tıbbi tedavi etkinliği değerlendirilmiştir. Ayrıca, ülkeler alan grafiği kullanılarak dört bölge de sınıflandırılmıştır. Her bölgedeki ülkeler için bazı öneriler verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: COVID-19, Veri Zarflama Analizi, Bulaşma Kontrolünün Etkinliği, Tıbbi Tedavi Etkinliği

I. INTRODUCTION

A pandemic can be defined as an epidemic or a new infectious disease that spread of a large area, continent or worldwide. It can effect a substantial number of people. Throughout the course of history, there has been a number of pandemics. In Table 1, the pandemics in history are listed [1].

Table 1. Pandemics throughout the history

Name of Pandemic	Year	The Number of Deaths
Plague of Athens	430 B.C.	Nearly 100,000
Antonine Plague	A.D. 165-180	5 million
Plague of Cyprian	A.D. 250-271	5,000
Plague of Justinian	A.D. 541-542	30 – 50 million
Japanese Smallpox Epidemic	A.D. 735-737	1 million
The Black Death	1346-1353	200 million
Smallpox	1520	56 million
Cocoliztli Epidemic	1545-1548	15 million
Great Plague of London	17 th Century	3 million
Great Plague of Marseille	18 th Century	600,000
Russian Plague	1770 - 1772	100,000
Philadelphia Yellow Fever Epidemic	1793	5,000
Cholera Epidemic	1817 - 1923	1 million
Plague	1855	12 million
Flu Pandemic	1889 - 1890	1 million
American Polio Epidemic	1916	6,000
Spanish Flu	1918 - 1920	40 – 50 million
Asian Flu	1957 - 1958	1,1 million
Hong Kong Flu	1968 - 1970	1 million
AIDS Pandemic and Epidemic	1981 – present day	25 – 35 million
SARS Pandemic	2002 - 2003	770,000
H1N1 Swine Flu Pandemic	2009 - 2010	200,000
MERS Pandemic	2012 – present day	850,000
Ebola Epidemic	2014 - 2016	11,300
COVID-19	2019 – present day	400,000 (still continues)

The novel coronavirus, which is also known as COVID-19, was detected for the first time in China in December 2019. Afterwards, the virus have spread to almost all of the countries. Globally there are more than 8 million confirmed cases and over 400,000 death cases by June 18, 2020 [2]. Total case distribution of the regions are given in Figure 1.

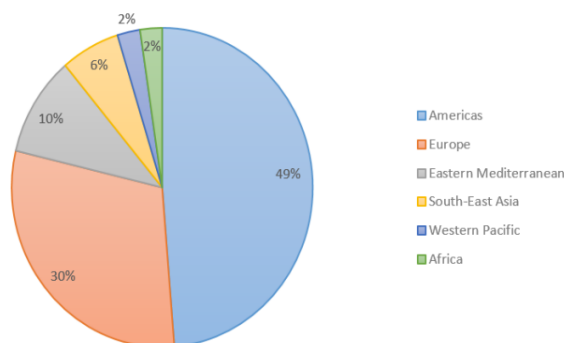


Figure 1. Share of total confirmed cases

COVID-19 has infected a tremendously larger population around the world and has many more death cases compared to previously well-known coronaviruses such as SERS or MERS [3]. The number of confirmed and death cases in a country and the increase/decrease rate depend profoundly on the readiness and the conditions of a country. Since COVID-19 become a focus issue for everyone, the studies on this disease are conducted with different perspectives [4, 5, 6, 7, 8 and 9]. In one study, authors have compared 19 selected countries in two dimensions by using dynamic data envelopment analysis. For the two analysis, population, population density and age 65 and above were the inputs where, the first output was COVID-19 virus confirmed cases and the second output was COVID-19 virus confirmed deaths. By using the first model, the objective was to compare the countries on controlling the prevalence of COVID-19, the objective of the second model was preventing the mortality caused by of COVID-19 [10]. In another study, authors have compared and classified 29 countries by using DEA model in two steps. In the first step, population density and average of 13 International Health Regulations Core Capacity Scores (IHRCC) were considered as inputs whereas the confirmed cases were outputs. In the second part of their model, confirmed cases were considered as input whereas the death and recovered cases were chosen as outputs. As a result, Singapore, Vietnam, and Belgium were the countries with the highest efficient in both models [11]. The same authors have performed another DEA model among with 30 countries by using the two weeks data. In this study, as input they considered days since the first confirmed case and population density, and as an

output average contagion rate is chosen [12].

In this study, the effectiveness of the countries in dealing with the COVID-19 pandemic is analysed by using the DEA model. Apart from the literature mentioned above, the DEA model is conducted in two stages. In the first stage, the effect of population and health security capabilities of the countries are questioned on confirmed cases. Later on, the death cases are analyzed according to the confirmed cases, hospital beds and 65 ages and over population of the countries. In order to find out the health security capabilities of the countries, Global Health Security (Index) is used. GHS Index, which covers global health security capabilities in 195 countries, is developed between the Nuclear Threat Initiative, Johns Hopkins Center for Health Security, and the Economist Intelligence Unit. GHS Index prioritizes countries' capacities as well as existence of functional, tested, proven capabilities for stopping outbreaks at the source by using 140 questions. These questions are categorized into six categories with 34 indicators as shown in the Table 2.

The scores are normalized between 0 and 100, where 100 is the most favorable. According to the index, there are three tiers. Countries that score between 0 and 33.3 are in the bottom tier, between 33.4 and 66.6 are in the middle tier, and between 66.7 and 100 are in the upper or "top" tier. The GHS Index ranks the countries that are best prepared for an epidemic or pandemic. According the 2019 report, among all of the 195 countries, none of them is fully prepared for the epidemics or pandemics [13]. According to the Index, for the year 2019, the top 10 country over the world is given in Table 3.

The COVID-19 Pandemic has effected millions of people all over the world. Therefore the behavior of the countries are important to minimize the losses. Since COVID-19 become a focus issue for everyone, the studies on this disease are conducted with different perspectives. The aim of this study is to evaluate and compare the performance of 27 European Countries on spread and deaths caused by COVID-19 pandemics by using input-oriented data envelopment analysis (DEA) method. Moreover, the countries are classified into the four zone by using the area chart. For the countries in each zones, some recommendations are given.

The construction of the paper is as follows. In the next section, the methodology is explained as well as the data definition and selection. Section 3 presents the results of the applied model with the several analyses. Finally, Section 4 concludes this paper.

Table 2. GHS index categories

Category	Explanation	Indicators
Prevent	Preventing the emergence or release of pathogens	1.1) Antimicrobial resistance (AMR) 1.2) Zoonotic disease 1.3) Biosecurity 1.4) Biosafety 1.5) Dual use research and culture of responsible science 1.6) Immunisation
Detect	Early detection and reporting epidemic of potential international concern	2.1) Laboratory systems 2.2) Real time surveillance and reporting 2.3) Epidemiology workforce 2.4) Data integration between human/animal/environmental health sectors
Respond	Rapidly responding to and mitigating the spread of an epidemic	3.1) Emergency preparedness and response planning 3.2) Exercising response plans 3.3) Emergency response operation 3.4) Linking public health and security authorities 3.5) Risk communication 3.6) Access to communications infrastructure 3.7) Trade and travel restrictions
Health	Sufficient and robust health sector to treat the sick and protect health workers	4.1) Health capacity in clinics, hospitals and community care centres 4.2) Medical countermeasures and personnel deployment 4.3) Healthcare access 4.4) Communications with healthcare workers during a public health emergency 4.5) Infection control practices and availability of equipment 4.6) Capacity to test and approve new medical countermeasures
Norms	Commitments to improving national capacity, financing and adherence to norms	5.1) International Health Regulations (IHR) reporting compliance and disaster risk reduction 5.2) Cross-border agreements on public health emergency response 5.3) International commitments 5.4) JEE and PVS 5.5) Financing 5.6) Commitment to sharing of genetic & biological data & specimens
Risk	Risk environment and vulnerability to biological threats	6.1) Political and security risk 6.2) Socio-economic resilience 6.3) Infrastructure adequacy 6.4) Environmental risks 6.5) Public health vulnerabilities

Table 3. Top ten countries according to GHS index, 2019

Rank	Country	Score/100
1	United States	83.5
2	United Kingdom	77.9
3	Netherlands	75.6
4	Australia	75.5
5	Canada	75.3
6	Thailand	73.2
7	Sweden	72.1
8	Denmark	70.4
9	South Korea	70.2
10	Finland	68.7

II. MATERIAL AND METHOD

The performance of the countries dealing with the COVID-19 pandemics is analysed. The novel disease is appeared rapidly and the countries faced to deal with this uncertain conditions. Thus, the research is still young about this disease. Inorder to choose the method, a brief literature survey is conducted. In healthcare system, DEA method is frequently used in the literature to measure the efficiency [14, 15, 16, 17, 18 and 19]. In this study, to analyse the effectiveness of the countries dealing the COVID-19 pandemics, the DEA method is chosen for two reasons. Bu using the DEA method, efficiency is measured by comparing the best application instead of the average. Additionally, unlike from the other parametric methods, DEA does not necessitate as much data [10].

DEA is a linear programming method planned to measure the relative efficiencies of a set of Decision Making Units (DMU) such as hospitals, education,

manufacturing sector and banking sector with multiple inputs and multiple outputs [20]. In addition, DEA which is a data oriented method is used to compare and sort the efficiency of DMUs [21].

DEA is materialized as the assumption of constant returns to scale based on Charnes, Cooper, Rhodes (CCR). The CCR model can be input or output oriented. In an input orientation, for a certain level of output, DEA minimizes the input which shows how much an institution can decrease its input for a particular output. In an output orientation, for a certain level of input, DEA maximizes the output which shows how much an institution can increase its output for a particular input [22]. The controllability of inputs and outputs is the main factor on deciding the main theme of the model [23]. In other words, if the decision maker has an audit on input, the model is input oriented whereas, if the decision maker has an audit on output, the model is output oriented. In health sector, for the decision makers it is generally hard to control the outputs however they have the authority to control the inputs. The CCR model, is a fractional linear programming problem and can be transformed into an equivalent linear program. Thus, the CCR with an input oriented model can be formulated as the following [24]:

$$\begin{aligned}
 & \text{Maximize} && \mu_0, v_i && \sum_{k=1}^p \mu_k y_{ko} \\
 \text{Subject to} &&& \sum_{i=1}^m v_i x_{io} = 1, \\
 &&& \sum_{k=1}^p \mu_k y_{kj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ki} \leq 0, \\
 &&& j=1, \dots, n, \\
 &&& \mu_0 \geq \epsilon, \quad v_i \geq \epsilon, \quad k = 1, \dots, p; \\
 &&& i = 1, \dots, m.
 \end{aligned}$$

This study designed as three steps based on DEA:

1. Definition and selection of DMUs: Since the countries are compared, they are considered as the DMUs. The critical situation in Europe led the study based on the European countries which are listed in the data selection part.
2. Detection of the variables of inputs and outputs: DEA does not perform adequate results when the number of inputs or outputs are large. Consequently, this study is executed in two steps. In the first step as shown in Figure 2, GHS Index of a country is taken as input whereas the ratio of confirmed cases to the population is output. Thus the performance ratio analysis (efficiency=output/input) of the countries are considered. In the second step, DEA model is used, where the output is the ratio of death cases over confirmed cases where hospital beds and 65

ages&over population are inputs as shown in Figure 3.



Figure 2. The first step of the performance ratio analysis model

It should be noted that the ratio of confirmed cases to the population is an undesirable output. A solution to the first step of this model gives the Contagion Inefficiency for each country.



Figure 3. The second step of the DEA model

It should be noted that Population ages 65 and above (% of total population) is an undesirable input and the ratio of death cases to the confirmed cases is an undesirable output. If the death rate is the most efficient for a country, then that country is the worst, thus the death rate is considered as an undesired output in this manner. A solution to this model gives the Medical Treatment Efficiency for each country.

3. Implementation of the model and evaluation of the results: In the final part of the study, the conditions of the countries regarding the confirmed cases and death cases are discussed.

Due to the lack of testing capacity, a large proportion of the suspected cases may not be not tested. Thus, it should be noted that “confirmed cases” differ than “actual cases”.

In one study, Shirouyehzad and his friends have compared and classified 29 countries by using DEA model as mentioned before. They have classified the countries by using the chart area [11]. In this paper, similar to the mentioned paper, European Countries are classified as shown in Figure 4. The horizontal axis and vertical axis represent the medical treatment efficiency and contagion inefficiency, respectively. The total mean values of the DEA result will be used to divide the chart into four areas.

The countries are placed in the chart according to their DEA results in the first and second step. The description of the areas is given as in Table 4.

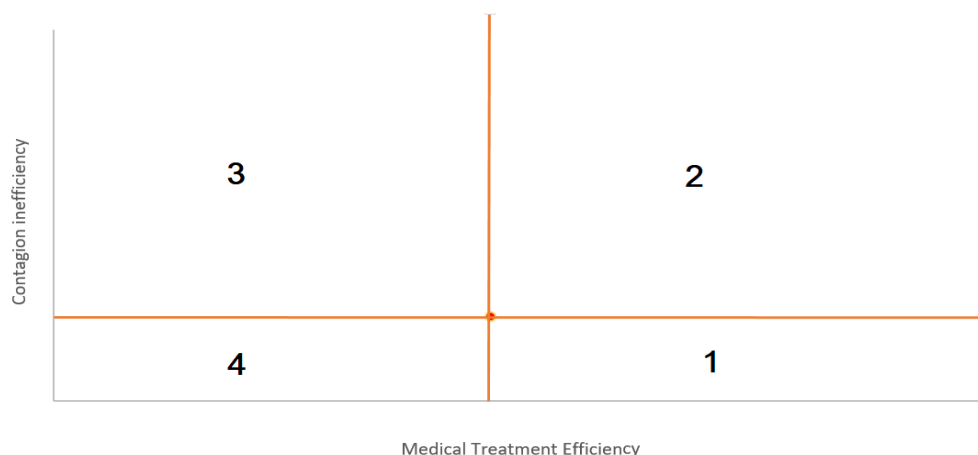


Figure 4. Classification area of European counties

Table 4. Description of the country classification

Area	Description
1	Good performance both in contagion spread and efficiency in medical treatment
2	Good performance in medical treatment but poor performance in spread of contagion
3	Poor performance both in contagion spread and efficiency in medical treatment
4	Poor performance in medical treatment but good performance in spread of contagion

In order to get a meaningful analysis, suitable inputs and outputs must be selected. The selection of factors that design the model and analyzed process is the most important task [18]. In this study the CCR model that depends on constant returns to scale, is used as input oriented method.

In literature there are two explanations about the sufficient number of DMUs [25]:

- I. When, m is the number of inputs and p is the number of outputs, the number of DMUs (N) should be at least one more than the total of inputs and outputs as shown in the Equation 1.

$$N \geq m + p + 1 \tag{1}$$

- II. When, m is the number of inputs and p is the number of outputs, the number of DMUs must be at least two times of the sum of total

number of inputs and outputs as show in the Equation 2.

$$N \geq 2 \times (m + p) \tag{2}$$

Due to the data limitation, 27 European countries were selected for which information on COVID-19, hospital beds, population and GHS Index is available. The selected countries are Austria, Bulgaria, Croatia, Cyprus, Czech Republic, Denmark, Estonia, Finland, France, Germany, Greece, Hungary, Iceland, Italy, Luxembourg, Malta, Montenegro, Netherlands, North Macedonia, Norway, Poland, Portugal, Romania, Slovakia, Spain, Switzerland and Turkey. The year and source of the data used for this study is summarized as in Table 5.

Table 5. Summary of the data used in DEA

Data Description	Data Source	Year
Cumulative cases of COVID19	World Health Organization (WHO)	2020 (latest data is on June 18)
Cumulative deaths from COVID19	World Health Organization (WHO)	2020 (latest data is on June 18)
Population of the countries	Worldbank	2018
Population ages 65 and above (% of total population)	Worldbank	2018
Available hospital beds	EUROSTAT	2017
GHS index values	GHS index	2019

III. FINDINGS AND DISCUSSIONS

Since the number of hospital beds will vary depending on the country population, the number of hospital beds per thousand people is used as the input variable. In this study, the measurement of the effectiveness of decision units (countries) was carried out with the DEAP 2.1 program. The effectiveness of European countries on spread and deaths caused by COVID-19 pandemics is evaluated by using input-oriented DEA model. In health industry, the power of countries to control and change output is limited. Countries can make changes in inputs to carry out more effective policies. Thus, they can achieve the goals they want to reach in the output. In addition to the input-oriented method, the CCR model was used in this study.

In this study, data envelopment analysis compares the countries to identify the causes of ineffectiveness in countries' health systems. Therefore, it is not possible to conclude that the countries which are effective, are the countries with the best health system. However, it can be said that they have relatively effective health systems compared to the existing decision units in the model.

In this paper, the model is conducted in two steps to compare the 27 European countries in terms of COVID-19. In the first step, to find out the contagion control efficiency, GHS Index of a country is taken as input whereas the ratio of confirmed cases to the population is output. In the second step, to find out the medical treatment efficiency, hospital beds and 65 ages&over population are taken as inputs whereas the ratio of death cases over confirmed cases is output. The first step efficiency column represents the contagion control inefficiency in comparison to other countries. In the first step efficiency column, the value 1 indicates that the related country has had poor performance in contagion control of COVID-19 according to the GHS Index and the number of confirmed cases to population. The results of the DEA analysis are demonstrated in Table 6.

According to the results, Luxemburg has an efficiency value of 1 showing that it has a poor performance in contagion control. In addition, Denmark and Iceland have an efficiency value of 1 showing that these countries have had good performance in medical treatment of COVID-19 patients in comparison to other countries in the study.

Table 6. The Efficiency Values of the Steps

No	Country	1 st Step Efficiency Contagion Control Inefficiency	2 nd Step Efficiency Medical Treatment Efficiency	No	Country	1 st Step Efficiency Contagion Control Inefficiency	2 nd Step Efficiency Medical Treatment Efficiency
1	Austria	0.212	0.476	15	Luxembourg	1	0.555
2	Bulgaria	0.072	0.496	16	Malta	0.245	0.901
3	Croatia	0.074	0.622	17	Montenegro	0.075	0.680
4	Cyprus	0.122	0.745	18	Netherlands	0.242	0.761
5	Czechia	0.126	0.548	19	North Macedonia	0.351	0.505
6	Denmark	0.195	1	20	Norway	0.162	0.815
7	Estonia	0.172	0.727	22	Poland	0.094	0.474
8	Finland	0.124	0.971	22	Portugal	0.390	0.995
9	France	0.220	0.441	23	Romania	0.171	0.439
10	Germany	0.228	0.488	24	Slovakia	0.041	0.533
11	Greece	0.036	0.754	25	Spain	0.516	0.858
12	Hungary	0.048	0.359	26	Switzerland	0.351	0.634
13	Iceland	0.720	1	27	Turkey	0.274	0.495
14	Italy	0.454	0.942	Average		0.249	0.675

IV. CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS

In this study, European countries are analysed and compared in two steps in the context of COVID-19 pandemics. In the first step, GHS Index was taken as input and the ratio of confirmed cases over population was taken as output. Data Envelopment Analysis shows the active countries as the value 1. However, the value 1 for the ratio of confirmed cases over population means that these countries are very active to spread the COVID-19 which is an undesirable output. In the analysis the countries that have value 1 are accepted as ineffective countries.

The values in Table 6, are used to create the four areas depicted in Figure 5. In this figure, the average efficiency for the first step, 0.249, and for the second step, 0.675, are used to divide the chart into four areas. According to these areas, the countries are classified in to the four group to analyze their efficiencies.

From Figure 5, it can be seen that Malta, Montenegro, Cyprus, Denmark, Estonia, Finland, Greece, Netherlands and Norway are in Area 1, showing that these countries have been acted efficiently both in contagion control and medical treatment of the patients. After all, Malta lies on the border is considered in the first area since its contagion control inefficiency value, 0.245, is slightly below to the average value of all the countries, 0.249. Italy, Spain, Iceland and Portugal are in Area 2. These countries have had good performance in medical treatment but they have had controlled the contagion inefficiently. The countries which have been acted inefficiently both in contagion control and medical treatment of the patients are in Area 3. Luxembourg, North Macedonia, Switzerland and Turkey are in critical conditions in this manner. Lastly, Poland, Romania, Slovakia, Austria, Bulgaria, Czechia, Hungary, France, Germany and Croatia are in Area 4. These countries have been successful in providing a good performance in contagion control but they have had poor performance in medical treatment.

According to the classification of areas in Figure 5, Montenegro, Netherlands, Malta, Germany, France and Austria need to pay a special attention to maintain their current performance.

Montenegro is in the first area which is the best performance area. However, if Montenegro acts as Hungary in terms of medical treatment efficiency, then the performance area will change to the fourth zone. Since the average value of step 2 analysis is 0.675 and the value for Hungary is 0.359, it means that Hungary is the worst country in terms of medical treatment efficiency. Thus, Montenegro needs to be careful in keeping its medical treatment capability as it is.

The contagion control inefficiency value of Netherlands and Malta are 0.242 and 0.245, respectively. These values are very close to the average value of 0.249. The countries with the values below 0.249 are efficient whereas the others are inefficient. Inefficiency increases as it approaches to the value of 1. The most inefficient country of step 1 analysis is Luxemburg. If Netherlands and Malta behave like Luxemburg, then their zone will change from 1 to 2. Thus they will be one of the contagion control inefficient countries.

Germany, France and Austria are in the fourth zone. In this zone they are already inefficient in terms of medical treatment. However they are trying to control their contagion efficiently. Like Netherlands and Malta, if these countries act like Luxemburg their zone will downgrade to the third area which is the worst case. On the other hand, the average value of contagion control inefficiency is 0.249 whereas Turkey's value is 0.274. Turkey which is on the third area, can easily go up to the fourth area with a little effort by controlling the contagion efficiently like Greece and Slovakia. In summary, the countries are classified in to the four zones according to their performance in this manner. The classification of the countries and the conclusion about these countries are given in Table 7.

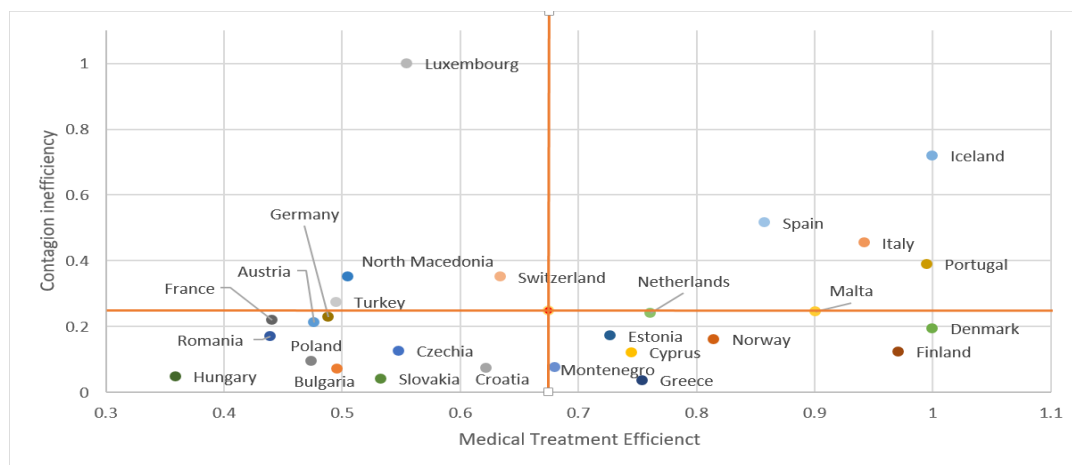


Figure 5. The area chart for classification of the European countries

Table 7. Classification of the countries

Area	Countries	Conclusion
1	Malta, Montenegro, Cyprus, Denmark, Estonia, Finland, Greece, Netherlands, Norway	High performance
2	Italy, Spain, Iceland, Portugal	Average performance, needs to learn contagion control as in the countries in the area 1 and 4
3	Luxembourg, North Macedonia, Switzerland, Turkey	In critical conditions
4	Poland, Romania, Slovakia, Austria, Bulgaria, Czechia, Hungary, France, Germany, Croatia	Average performance, needs to learn medical treatment as in the countries in the area 1 and 2

According to Table 7, Malta, Montenegro, Cyprus, Denmark, Estonia, Finland, Greece, Netherlands, and Norway are the countries with high performance both in contagion control and medical treatment. Thus all the other countries should take these countries as an example. However, Luxembourg, North Macedonia, Switzerland and Turkey are in critical conditions and need a special attention.

If the bed numbers in hospitals are low, then it means that, because of the low capacity the patients cannot be treated fully leading the higher number of death ratios. If the number of beds in hospitals is high, patients diagnosed with COVID-19 can be quarantined in hospitals, the possibility of spread is reduced, and mortality rates can be reduced with rapid treatment. In addition, it is known that the possibility of death from COVID-19 for elderly people (65+) and people with chronic diseases are high then the others. Thus, if the population of elderly people (65+) is relatively low then it is expected the death rates being low.

The world map shown in Figure 6 gives the biref visual summary of the related countries according to this

study’s classification.

According to this research study’s model, the regions 4 and 2 are opposite of each other both in the sense of medical treatment and contagion inefficiency. One of the reasons can be the healthcare system model. The healthcare system of all countries in the 4th region has the similar social security system. Predominant source of financing for public health expenditure is social security system which is by mandatory fees paid by employers and workers or through taxes. On the other hand, all countries in the 2nd region has the similar system such as major source of financing for public health expenditure is taxes.

The indicators chosen can affect the results of the model easily. Therefore, different inputs and outputs can change the results and analysis. These indicators can be more comprehensive in further studies for extended results. Furthermore, as a future work, the factors such as social distancing, lockdown measures or population density can be added to the model to find the efficiencies of the countries which are used in this study.



Figure 6. The visual summary of this study

REFERENCES

- [1] LePan, N., (2020). Visualizing the History of Pandemics. Visual Capitalist. <https://www.visualcapitalist.com/history-of-pandemics-deadliest>. (accessed Jul. 05, 2020).
- [2] WHO. (2020). Coronavirus disease (COVID-19). <https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019> (accessed Jun. 18, 2020).
- [3] Jouzdani, J., & Shirouyehzad, H. (2020). Fight against COVID-19: What can be done in the case of Iran? *Journal of Applied Research on Industrial Engineering*, 7(1), 1–12. <https://doi.org/10.22105/jarie.2020.223981.1145>
- [4] Berman, J. D., & Ebisu, K. (2020). Changes in U.S. air pollution during the COVID-19 pandemic. *Science of The Total Environment*, 739, 139864. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139864>
- [5] Adekunle, I. A., Onanuga, A. T., Akinola, O. O., & Ogunbanjo, O. W. (2020). Modelling spatial variations of coronavirus disease (COVID-19) in Africa. *Science of The Total Environment*, 729, 138998. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138998>
- [6] Wu, Y., Jing, W., Liu, J., Ma, Q., Yuan, J., Wang, Y., Du, M., & Liu, M. (2020). Effects of temperature and humidity on the daily new cases and new deaths of COVID-19 in 166 countries. *Science of The Total Environment*, 729, 139051. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139051>
- [7] Thu, T. P. B., Ngoc, P. N. H., Hai, N. M., & Tuan, L. A. (2020). Effect of the social distancing measures on the spread of COVID-19 in 10 highly infected countries. *Science of The Total Environment*, 742, 140430. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140430>
- [8] Oksanen, A., Kaakinen, M., Latikka, R., Savolainen, I., Savela, N., & Koivula, A. (2020). Regulation and Trust: 3-Month Follow-up Study on COVID-19 Mortality in 25 European Countries. *JMIR Public Health and Surveillance*, 6(2), e19218. <https://doi.org/10.2196/19218>
- [9] Singh, R. K., Rani, M., Bhagavathula, A. S., Sah, R., Rodriguez-Morales, A. J., Kalita, H., Nanda, C., Sharma, S., Sharma, Y. D., Rabaan, A. A., Rahmani, J., & Kumar, P. (2020). Prediction of the COVID-19 Pandemic for the Top 15 Affected Countries: Advanced Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA) Model. *JMIR Public Health and Surveillance*, 6(2), e19115. <https://doi.org/10.2196/19115>
- [10] Ghasemi, A., Boroumand, Y., & Shirazi, M. (2020). How do governments perform in facing COVID-19? *Munich Personal RePEc Archive*, Apr. 15, 2020, Accessed: Jul. 05, 2020. [Online]. Available: <https://mpra.ub.uni-muenchen.de/99844/>.
- [11] Shirouyehzad, H., Jouzdani, J., & Khodadadi Karimvand, M. (2020). Fight against COVID-19: A global efficiency evaluation based on contagion control and medical treatment. *Journal of Applied Research on Industrial Engineering*, 7(2), 109–120. <https://doi.org/10.22105/jarie.2020.225087.1146>
- [12] Shirouyehzad, H., Jouzdani, J., & Khodadadi-Karimvand, M. (2020). An Analysis of the COVID-19 Contagion Growth in European Countries. *Iranian Journal of Optimization*, 12(1), 11–19.
- [13] Cameron, E. E., Nuzzo, J. B., & Bell, J. A. (2019). Global health security index: Building collective action and accountability. *Nuclear Threat Initiative and Johns Hopkins Bloomberg School of Public Health*.
- [14] Popescu, C., Asandului, L., & Fatulescu, P. (2014). A Data Envelopment Analysis for Evaluating Romania's Health System. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 109, 1185–1189. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.12.609>
- [15] Stefko, R., Gavurova, B., & Kocisova, K. (2018). Healthcare efficiency assessment using DEA analysis in the Slovak Republic. *Health Economics Review*, 8(1), 1–12.
- [16] Ozcan, Y. A. (2008). Health Care Benchmarking and Performance Evaluation: An Assessment using Data Envelopment Analysis (DEA). Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-75448-2>
- [17] Kaya Samut, P., & Cafri, R. (2016). Analysis of the Efficiency Determinants of Health Systems in OECD Countries by DEA and Panel Tobit. *Social Indicators Research*, 129(1), 113–132. <https://doi.org/10.1007/s11205-015-1094-3>
- [18] Kohl, S., Schoenfelder, J., Fügener, A., & Brunner, J. O. (2019). The use of Data Envelopment Analysis (DEA) in healthcare with a focus on hospitals. *Health Care Management Science*, 22(2), 245–286. <https://doi.org/10.1007/s10729-018-9436-8>
- [19] Azadi, M., & Farzipoor Saen, R. (2013). A combination of QFD and imprecise DEA with enhanced Russell graph measure: A case study in healthcare. *Socio-Economic Planning Sciences*, 47(4), 281–291. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2013.05.001>
- [20] Tlotlego, N., Nonvignon, J., Sambo, L. G., Asbu, E. Z., & Kirigia, J. M. (2010). Assessment of productivity of hospitals in Botswana: A DEA application. *International Archives of Medicine*, 3, 27. <https://doi.org/10.1186/1755-7682-3-27>
- [21] Morita, H., & Avkiran, N. K. (2009). Selecting inputs and outputs in data envelopment analysis by designing statistical experiments. *Journal of the Operations Research Society of Japan*, 52(2), 163–173. <https://doi.org/10.15807/jorsj.52.163>
- [22] Huguenin, J.-M. (2012). Data envelopment analysis (DEA): A pedagogical guide for decision makers in the public sector. IDHEAP.
- [23] Ray, S. C. (2004). *Data Envelopment Analysis: Theory and Techniques for Economics and*

-
- Operations Research (1st ed.). Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511606731>
- [24] Yun, Y. B., Nakayama, H., & Tanino, T. (2004). A generalized model for data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research*, 157(1), 87-105.
- [25] Boussofiane, A., Dyson, R. G., & Thanassoulis, E. (1991). Applied data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research*, 52(1), 1–15. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(91\)90331-O](https://doi.org/10.1016/0377-2217(91)90331-O)

Spherical Fuzzy Version of EDAS and An Application

Küresel Bulanık EDAS ve Bir Uygulama

Sait GÜL¹ 

¹ Bahçeşehir University, Management Engineering Department, 34353, İstanbul, Turkey

Abstract

Several fuzzy set concepts have been developed after the first invention of fuzzy sets in the 1960s to demonstrate the uncertainty and vagueness in human preferences. Spherical fuzzy sets (SFS) as a recent one of these developments support this aim by giving a comprehensive preference domain to decision-makers. The distinctive feature of SFS is its rule saying that the squared sum of membership, non-membership, and hesitancy degrees should be within the interval of [0,1] while each element is independently assigned within the same interval. With this study, EDAS (Evaluation Based on Distance from Average Solution), one of the younger but stronger multiple attribute decision-making tools is modified for spherical fuzzy environment. Entropy-based objective attribute weighting is also integrated with this novel version of EDAS to avoid the undesired potential effects of subjective weighting such as longer data collection time. The novel version proposed is applied in an example of a product design selection problem for additive manufacturing. The proposed method is compared with neutrosophic sets and Pythagorean fuzzy extensions of EDAS. Also, a sensitivity analysis is conducted in order to check its robustness against the changes in attribute weights.

Keywords: EDAS, spherical fuzzy sets, entropy measure, linguistic assessment.

Öz

İnsan tercihlerindeki belirsizliği ve kesinsizliği temsil etmek amacıyla 1960'larda bulanık kümeler kavramı ortaya atılmış ve daha sonraki süreçte bir çok farklı bulanık küme tanımı geliştirilmiştir. Bu gelişmelerden oldukça yeni bir tanısı olan küresel bulanık kümeler (KBK), karar vericilere kapsamlı bir tercih alanı vererek bu amacı desteklemektedir. KBK'in ayırt edici özelliği, üyelik, üye-olmama ve tereddüt derecelerinin kareler toplamının [0,1] aralığında olması ve her bir unsurun aynı aralık içinde bağımsız olarak tanımlanabilmesidir. Bu çalışma ile, oldukça yeni ancak yazında sıkça kendine yer bulan bir çok ölçütlü karar verme yöntemi olan EDAS (Evaluation Based on Distance from Average Solution – Ortalama Çözüm Olan Uzaklığa Dayalı Değerlendirme), küresel bulanık ortam için uyarlanmaktadır. Entropi tabanlı nesnel ölçüt ağırlıklandırma, daha uzun veri toplama süresi gibi öznel ağırlıklandırma yöntemlerinin dezavantaj yaratan potansiyel etkilerinden kaçınmak için EDAS'ın bu yeni sürümüyle entegre edilmiştir. Önerilen yeni versiyon, eklemeli imalat (*additive manufacturing*) için bir ürün tasarımı seçme problemi örneğinde uygulanmıştır. Önerilen yöntem neutrosophic küme ve Pisagor bulanık küme kullanılan EDAS versiyonları ile karşılaştırılmış, ayrıca ölçüt ağırlıklarındaki değişim karşısında yöntemin gürbüzlüğünün test edilmesi amacıyla bir de duyarlılık analizi yapılmıştır.

Anahtar kelimeler: EDAS, küresel bulanık kümeler, entropi ölçüsü, dilsel değerlendirme.

I. INTRODUCTION

Decision-makers usually have to state their opinions or judgments when they are consulted about a decision problem. Linguistic terms can support them by providing different sorts of fuzzy sets. Fuzzy set concept was developed by Zadeh (1965) and symbolizes the judgments in the decision makers' subconscious. In classical fuzzy sets, there is only one element called membership degree (μ_A) and it can take any value in the range of [0,1]. Membership degree can represent the optimism or agreement level of a judgment.

During the last 6 decades, many researchers from various scientific fields developed different representation styles to ease the symbolization of the vagueness. Some important developments are summarized below.

Atanassov (1986) described the intuitionistic fuzzy sets and introduce a new element into fuzzy sets, called non-membership function. Non-membership degree (ν_A) adds flexibility into the representation of judgments because it states the pessimistic view or disagreement level of a judgment. After specifying this new parameter, Atanassov (1986) also presented a new measure regarding decision makers' hesitancy level so that intuitionistic fuzzy sets can handle three dimensions of judgments (membership, non-membership, and hesitancy). But here the hesitancy is related to the other two degrees and decision-maker does not have the opportunity to appoint any independent hesitancy degree: $\pi_A = 1 - \mu_A(x) - \nu_A(x)$.

Yager (2013)'s Pythagorean fuzzy sets concept is developed for supporting decision-makers about the boundaries of fuzzy sets or intuitionistic fuzzy sets. This system defines the membership (μ_A) and non-membership (ν_A) degrees in the manner of holding a rule saying that the squared sum of these two degrees should be between 0 and 1. Therefore, the hesitancy degree depends again on these two predetermined ones: $\pi_A = \sqrt{1 - \mu_A^2(x) - \nu_A^2(x)}$. As seen from the equation, the hesitancy is derived from the others.

q -rung orthopair fuzzy sets concept has emerged from Pythagorean fuzzy set concept and it can be accepted as its generalization. Yager (2017) identified this new understanding by changing the squaring rule with taking q^{th} power. So, the dependent hesitancy degree can be computed by the equation of $\pi_A = \sqrt[q]{1 - \mu_A^q(x) - \nu_A^q(x)}$ where $q \geq 1$.

Using the degree of hesitancy/indeterminacy as an independent component, Smarandache (1999) initiated the neutrosophic set theory. Neutrosophic set is defined where each element of the universe has specific nonstandard membership (μ_A), non-membership (ν_A), and hesitancy (π_A) degrees which satisfy the conditions that each degree should be within $]0^-, 1^+[$ and their sum should be within $]0^-, 3^+[$. Wang et al (2010) developed single-valued neutrosophic sets and Wang et al (2005) defined interval valued neutrosophic sets as instances with the aim of making this nonstandard notation more understandable and operationalizable. In this concept, there is an opportunity about assigning independent values for each of three elements in the set but there are different kinds of criticism about it, especially in terms of their mathematical complexity.

Intuitionistic, Pythagorean, q -rung orthopair fuzzy sets and neutrosophic sets are accepted as three-dimensional fuzzy sets because they can represent the uncertainty more comprehensively by involving three fuzziness degrees. In order to deal with the drawbacks explained above, Kutlu Gündoğdu and Kahraman (2019a) invented spherical fuzzy sets (SFS) as a synthesis of Pythagorean fuzzy sets and neutrosophic sets. SFS consists of three elements that can take independently any value between 0 and 1, namely membership, non-membership, and hesitancy degrees. The distinctive feature of SFS is that the squared sum of these three degrees should be within the interval of $[0, 1]$. Suppose a decision-maker saying that "I partially agree (0.80) and partially disagree (0.25) with your idea and I need to stay hesitant a little bit (0.10)". The sum of these values is greater than 1 ($0.80+0.25+0.10=1.15$) while the squared sum is lower than 1 (0.7125). This judgment can only be represented by SFS. So, it is seen that this novel form of fuzziness provides a more extensive preference domain to the decision-maker.

Among many multiple attribute decision-making methods, EDAS (Evaluation Based on Distance from Average Solution) was developed by Keshavarz Ghorabae et al (2015) to search the distances between each alternative and average solution. It is a method from distance-based method family such as TOPSIS and VIKOR. They consider the distances between each alternative and positive/negative ideal alternatives and then reach a decision accordingly: the best alternative should relatively be as distant as possible from the negative ideal and as close as possible to the positive ideal. EDAS eliminates the step of determining the positive/negative ideal solutions which can be complex that expected in terms of some situations since it measures the distance between each alternative and average solution. In the literature, authors chose to use various ideal alternative determination processes. For instance, Lima Junior et al (2014) considered constant ideal points such as triangular fuzzy numbers: (1,1,1) for positive ideal solution and (0,0,0) for negative ideal solution while Kutlu Gündoğdu and Kahraman (2019a) defuzzified the decision matrix for selecting the maximum values for the positive ideal and the minimum values for the negative ideal solutions. Biswas et al (2016) developed their own methodology for this process. EDAS does not require these types of discussions because it eliminates this step as a contribution to the literature. In this manner, EDAS makes the compromise solution method more stable in ranking alternatives (Feng et al, 2018; Darko and Liang, 2020).

This study aims to extend this new (it was developed just five years ago) and easily implementable (an extensive literature has been formed during a short period of time because its technical aspects are not so complex) methodology under spherical fuzzy environment because the crisp or current fuzzy versions of EDAS are not capable of considering independent hesitancy of decision-makers. The literature of EDAS is summarized in Section 2.

Another important issue that is handled in this study is the objective weighting of attributes. Subjective approaches such as pairwise comparison logic of AHP (Analytic Hierarchy Process) or direct importance allocation are based on the decision makers' expertise on the topic but objective methods conversely do not consider these individualistic preferences and just look at the performances which were collected with respect to each attribute. To minimize the risk arisen from the self-seeking/manipulative decision-makers or too long data collection period, many objective weighting methods are developed in the literature. In some real-life cases, such as credit rating of the firms by the creditors or performance assessment of an occupational health and safety policy application, the subjective weights based on expert opinions are not desired today.

For making the decision process more comprehensive and competent, this paper integrates entropy-based objective attribute weighting and EDAS methodology under spherical fuzzy environment. Its capability of operating decision makers' hesitancies as independent inputs, this novel version of EDAS, and objective weighting with spherical fuzzy numbers (SFN) can be accepted as the contributions of this study to the decision-making literature. The rest is organized as follows. While section 2 shares the results of the extensive literature review on three-dimensional fuzzy versions of EDAS, section 3 includes the preliminaries of SFSSs. In Section 4, the spherical fuzzy version of EDAS (SF-EDAS) is detailed step-by-step. In order to show its application possibility, an illustrative example about product design for additive manufacturing is demonstrated in Section 5. Section 6 concludes the study with the findings and the further research potential.

II. LITERATURE REVIEW ON THREE-DIMENSIONAL FUZZY VERSIONS OF EDAS

Traditional fuzzy extension of EDAS is a research area getting importance day-by-day in the literature. EDAS which was developed by Keshavarz Ghorabae et al (2015) found its very first application in multi-criteria inventory classification. There are many crisp versions of EDAS in the literature, e.g., Özmen (2020) proposed an SMAA-EDAS integration for evaluating OECD countries in terms of broadband infrastructures and structural services of the telecommunication sector; Özbek (2019) used EDAS method for ranking the cities of Turkey in terms of the livability criteria; Ulutaş (2018) integrated entropy-based objective attribute weighting and EDAS method in order to analyze the performances of logistics companies. There are also traditional fuzzy extensions of EDAS in the literature, e.g., Aldalou and Perçin (2020) utilized entropy for weighting attributes of financial performance evaluation problem of food and drink index and fuzzy EDAS for obtaining the best results, and then CRITIC-based scenario analysis was conducted for checking the robustness of the solution; Kas Bayrakdaroğlu and Kundakcı (2019) used a fuzzified version of EDAS while selecting the best R&D project; Mukul et al (2019) obtained the attribute weights via fuzzy AHP and the alternatives were evaluated through fuzzy EDAS in a strategic analysis of intelligent transportation systems; Erkayman et al (2018) modified fuzzy DEMATEL and integrated it with fuzzy EDAS for choosing the best ERP deployment project.

In this paper, we focus on three-dimensional (3D) fuzzy versions of EDAS rather than the traditional fuzzy versions of crisp ones. Table 1 depicts the results of the extensive literature survey on the related area. In Table 1, versions of 3D fuzzy sets which are considered by papers, the integrated methods with the reason for this integration, and the application area of the study are summarized in columns.

According to our extensive literature review on the field of 3D fuzzy extension attempts of EDAS, there are 15 studies: 4 papers using intuitionistic fuzzy versions, 8 papers using neutrosophic sets, 1 study using Pythagorean, and 2 ones q -rung orthopair fuzzy set versions. Different MADM methods are utilized for comparison purposes, i.e., 7 studies compared their EDAS version's results with fuzzified TOPSIS' results, and 3 papers used VIKOR for the same purpose. CODAS, WASPAS, ARAS, and GRA are other methods that were exploited for comparison results. In terms of attribute weighting, CRITIC, SWARA, entropy-based, divergence-based, closeness to ideal solution-based methods were used in an objective or subjective manner or a mixture of them. As seen from the literature, most of the studies have handled the weighting problem via various objective methods by considering their positive sides against subjective weighting. All these 15 papers have used their methods in solving real-life or numerical/experimental applications.

From the literature review, it is seen that there is a very important gap about a recent kind of fuzzy sets representing decision-makers' preferences in a more comprehensive way. Spherical fuzzy version of EDAS has not been developed yet. As mentioned in Chapter 1, intuitionistic and Pythagorean fuzzy sets or q -rung orthopair sets can handle hesitancy of the decision-makers in a limited manner because they do not consider an independent hesitancy degree. In neutrosophic sets, there is an independent hesitancy consideration, but different complexities are arising from the rule saying that the sum of membership, non-membership, and hesitancy degrees should be between 0 and 3. In order to handle these issues, spherical fuzzy sets are developed, and their operations are proposed clearly. This study's main contribution to the literature is that it develops a spherical fuzzy extension of EDAS for coping with the issue of hesitancy consideration which is hidden in the judgments of decision-makers. Another important contribution is that a novel entropy that has been proposed recently in the literature finds an application area in this study. This novel entropy is used for gathering the objective weights of attributes that are considered in the application section.

Table 1. The literature on three-dimensional fuzzy versions of EDAS

<i>Paper</i>	<i>Version of fuzziness</i>	<i>Integrated Methods</i>	<i>Application</i>
Kahraman et al (2017)	Interval-valued intuitionistic FS	-	Solid waste disposal site selection
Schitea et al (2019)	Intuitionistic FS	Closeness coefficient-based attribute weighting; WASPAS, COPRAS, and TOPSIS for comparison	Hydrogen mobility roll-up site selection in Romania
Mishra et al (2020)	Intuitionistic FS	Divergence measure-based attribute weighting; TOPSIS and VIKOR for comparison	Assessment of health-care waste disposal technology
Liang (2020)	Intuitionistic FS	CRITIC for attribute weighting; VIKOR and GRA for comparison	Evaluating green building energy-saving design project
Peng and Liu (2017)	Single-valued neutrosophic sets	Grey system theory for attribute weighting	Selection of a software development project to invest
Karaşan and Kahraman (2018a)	Interval-valued neutrosophic sets	TOPSIS for comparison	Prioritization of United Nations national sustainable development goals
Karaşan and Kahraman (2018b)	Interval-valued neutrosophic sets	TOPSIS for comparison	Selecting the best fertilizer supplier for the plantation area
Li et al (2019)	Linguistic neutrosophic numbers	Closeness based attribute weighting	Selecting a suitable property management company in Zhengzhou
Wang et al (2019)	Linguistic neutrosophic numbers	Different aggregation operators for comparison	Selecting the best construction project
Han and Wei (2020)	Multivalued neutrosophic sets	TODIM and TOPSIS for comparison	Choosing the most appropriate investment project
Supciller and Toprak (2020)	Single-valued neutrosophic sets	SWARA for attribute weighting; TOPSIS, VIKOR, and MULTIMOORA for comparison	Selection of wind turbines
Xu et al (2020)	Single-valued complex neutrosophic sets	-	Green supplier selection
Mohagheghi and Mousavi (2020)	Interval-valued Pythagorean FS	Entropy-based attribute weighting; COADAP, ARAS, and D-WASPAS for comparison	Sustainable Project Portfolio Problem
Li et al (2020)	q-rung Orthopair FS	Different aggregation operators for comparison	Selection of household refrigerator
Darko and Liang (2020)	q-rung Orthopair FS	Best-Worst Method for attribute weighting; TOPSIS, GRA, and COPRAS for comparison	Mobile payment platform selection

III. SPHERICAL FUZZY SETS

The concept of spherical fuzzy sets (SFS) is proposed by Kutlu Gündoğdu and Kahraman (2019a) as a generalization and synthesis of Pythagorean fuzzy sets and neutrosophic sets. It is aimed to let decision-makers express their hesitancy independently in their linguistic judgments on an alternative or attribute (Kutlu Gündoğdu, 2020). By using SFS, decision-makers can mention their hesitancy degree just like membership and non-membership degrees, independently. SFS copes with the mostly undesired features of neutrosophic sets (sum of three degrees is larger than 1) and Pythagorean fuzzy sets (it disregards independent hesitancy) (Kutlu Gündoğdu and Kahraman, 2019b).

Definition 1. An SFS \tilde{A}_S of the universe of discourse X is given by

$$\tilde{A}_S = \{ \langle x, \mu_{\tilde{A}_S}(x), \nu_{\tilde{A}_S}(x), \pi_{\tilde{A}_S}(x) | x \in X \rangle \} \quad (1)$$

where $\mu_{\tilde{A}_S}(x) : X \rightarrow [0,1], \nu_{\tilde{A}_S}(x) : X \rightarrow [0,1]$, $\pi_{\tilde{A}_S}(x) : X \rightarrow [0,1]$ and

$$0 \leq \mu_{\tilde{A}_S}^2(x) + \nu_{\tilde{A}_S}^2(x) + \pi_{\tilde{A}_S}^2(x) \leq 1, \forall x \in X \quad (2)$$

For each x , the $\mu_{\tilde{A}_S}(x), \nu_{\tilde{A}_S}(x)$, and $\pi_{\tilde{A}_S}(x)$ are the membership degree, non-membership degree, and hesitancy degree of x to \tilde{A}_S , respectively.

Definition 2. Let X_1 and X_2 be two universes and let $\tilde{A}_S = (\mu_{\tilde{A}_S}, \nu_{\tilde{A}_S}, \pi_{\tilde{A}_S})$ and $\tilde{B}_S = (\mu_{\tilde{B}_S}, \nu_{\tilde{B}_S}, \pi_{\tilde{B}_S})$ be two SFSs from the universes of discourse X_1 and X_2 . Basic operators are defined as given below.

Addition

$$\begin{aligned} \tilde{A}_S \oplus \tilde{B}_S = \{ & (\mu_{\tilde{A}_S}^2 + \mu_{\tilde{B}_S}^2 - \mu_{\tilde{A}_S}^2 \mu_{\tilde{B}_S}^2)^{\frac{1}{2}}, \nu_{\tilde{A}_S} \nu_{\tilde{B}_S}, \\ & ((1 - \mu_{\tilde{B}_S}^2) \pi_{\tilde{A}_S}^2 + (1 - \mu_{\tilde{A}_S}^2) \pi_{\tilde{B}_S}^2 - \pi_{\tilde{A}_S}^2 \pi_{\tilde{B}_S}^2)^{\frac{1}{2}} \} \end{aligned} \quad (3)$$

Multiplication

$$\begin{aligned} \tilde{A}_S \otimes \tilde{B}_S = \{ & \mu_{\tilde{A}_S} \mu_{\tilde{B}_S}, (\nu_{\tilde{A}_S}^2 + \nu_{\tilde{B}_S}^2 - \nu_{\tilde{A}_S}^2 \nu_{\tilde{B}_S}^2)^{\frac{1}{2}}, \\ & ((1 - \nu_{\tilde{B}_S}^2) \pi_{\tilde{A}_S}^2 + (1 - \nu_{\tilde{A}_S}^2) \pi_{\tilde{B}_S}^2 - \pi_{\tilde{A}_S}^2 \pi_{\tilde{B}_S}^2)^{\frac{1}{2}} \} \end{aligned} \quad (4)$$

Multiplication by a scalar ($\lambda > 0$)

$$\begin{aligned} \lambda * \tilde{A}_S = \{ & (1 - (1 - \mu_{\tilde{A}_S}^2)^\lambda)^{\frac{1}{2}}, \nu_{\tilde{A}_S}^\lambda, \\ & ((1 - \mu_{\tilde{A}_S}^2)^\lambda - (1 - \mu_{\tilde{A}_S}^2 - \pi_{\tilde{A}_S}^2)^\lambda)^{\frac{1}{2}} \} \end{aligned} \quad (5)$$

Definition 3. For aggregation purposes, spherical weighted arithmetic mean (SWAM) is defined as follows. The weights are given as w_j ($j = 1, \dots, n$) where $w_j \in [0,1]$ and $\sum_{j=1}^n w_j = 1$.

$$\begin{aligned} SWAM_w(\tilde{A}_{S1}, \tilde{A}_{S2}, \dots, \tilde{A}_{Sn}) &= w_1 \tilde{A}_{S1} + w_2 \tilde{A}_{S2} + \dots + w_n \tilde{A}_{Sn} \\ &= \left\{ \left[1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_{\tilde{A}_{Si}}^2)^{w_i} \right]^{\frac{1}{2}}, \prod_{i=1}^n \nu_{\tilde{A}_{Si}}^{w_i}, \right. \\ & \left. \left[\prod_{i=1}^n (1 - \mu_{\tilde{A}_{Si}}^2)^{w_i} - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_{\tilde{A}_{Si}}^2 - \pi_{\tilde{A}_{Si}}^2)^{w_i} \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

Definition 4. Score function (that can be used for defuzzification operation) and Accuracy function that can be used for ranking SFSs are defined by

$$sc(\tilde{A}_S) = (\mu_{\tilde{A}_S} - \pi_{\tilde{A}_S})^2 - (\nu_{\tilde{A}_S} - \pi_{\tilde{A}_S})^2 \quad (7)$$

$$ac(\tilde{A}_S) = \mu_{\tilde{A}_S}^2 + \nu_{\tilde{A}_S}^2 + \pi_{\tilde{A}_S}^2 \quad (8)$$

\tilde{A}_S can be preferred to \tilde{B}_S if and only if (i) $sc(\tilde{A}_S) > sc(\tilde{B}_S)$ or (ii) $sc(\tilde{A}_S) = sc(\tilde{B}_S)$ and $ac(\tilde{A}_S) > ac(\tilde{B}_S)$.

Definition 5. Normalized spherical distance between $\tilde{A}_S = (\mu_{\tilde{A}_S}, \nu_{\tilde{A}_S}, \pi_{\tilde{A}_S})$ and $\tilde{B}_S = (\mu_{\tilde{B}_S}, \nu_{\tilde{B}_S}, \pi_{\tilde{B}_S})$ can be found via

$$dis_n(\tilde{A}_S, \tilde{B}_S) = \frac{2}{\pi n} \sum_{i=1}^n \arccos(\mu_{\tilde{A}_S} \mu_{\tilde{B}_S} + \nu_{\tilde{A}_S} \nu_{\tilde{B}_S} + \pi_{\tilde{A}_S} \pi_{\tilde{B}_S}) \quad (9)$$

Decision analyst dealing with the decision problem has to choose a proper weighting approach for representing the importance of decision attributes since the aggregated performance values are obtained by using these weights. In literature, we have two general approaches for this purpose. Subjective weighting methods consider the decision-makers' judgments and opinions regarding the aforementioned importance while objective weighting approaches ignore these personal preferences and directly operationalize the performance values that are obtained with respect to each attribute (Koksalmis and Kabak, 2019). In literature, there are some drawbacks cited for subjective weighting, e.g., some risks can arise from self-seeking behaviors of decision-makers or long periods may be needed while collecting data from the decision-makers. To overcome these issues, one can apply objective weighting understanding (Aydoğdu and Gül, 2020).

The basic motivation of using an objective attribute weighting method in the study is to minimize the experts' possible negative influence on the decision and minimize the risk of manipulation. In the literature, there are some objective methods such as maximizing deviation method (Xiong and Cheng, 2018; Peng et al, 2018; Ju et al, 2021), variation coefficient method (Tian et al, 2017), CRITIC (Piasecki and Kostyrko, 2020), entropy-based approaches (Jin et al, 2019; Barukab et al, 2019; Aydoğdu and Gül, 2020), etc. Except for entropy, the mentioned methods are based on statistical measures such as variance and standard deviation and they also utilize mathematical programming models in calculating the unknown attribute weights. The study

preferred to use the entropy tool in attribute weighting because it is easier than other methods, especially in SFS-based MADM. Also, few articles are proposing objective attribute weighting in this field and novel approaches are required for this purpose. Developing new mathematical modeling and statistics-based models is out of the study's scope. Future studies should consider this issue.

As mentioned above, entropy measure is a good alternative way while objectively weighting attributes. It is a mathematical tool that is used for measuring fuzziness degree and a significant quantitative measure of uncertain information. Entropy-based weighting is based on one idea: an attribute has higher importance if a greater dispersion in evaluations of alternatives has occurred. According to this definition, the dispersion of the data in an attribute can be a measurement of its importance. In decision-making applications, after collecting the scores of the alternatives with respect to the attributes, these two data are processed together. In entropy-based weighting, the entropy value of each attribute is calculated and then they are normalized to get the weights. Subjective expert judgments are used here as representations of the alternative scores, not as the attribute weights. In most of the fuzzy-based decision-making applications, the authors prefer to collect additional subjective data about the importance set of attributes but in some cases, this additional operation can be improper. Thus, the expert's judgments are solely utilized for the purpose of alternative scoring. In this manner, the subjectivity is not totally removed, but limited. Aydoğdu and Gül (2020) developed an entropy measure for SFS as given below.

Definition 6. Let \tilde{A}_S be an SFS on X . The mapping

$$E(\tilde{A}_S) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{4}{5} [|\mu_{\tilde{A}_S}^2(x_i) - v_{\tilde{A}_S}^2(x_i)| + |\pi_{\tilde{A}_S}^2(x_i) - 0.25|] \right) \quad (10)$$

is an entropy measure for SFS.

IV. SPHERICAL FUZZY VERSION OF EDAS (SF-EDAS)

EDAS is one of the distance-based multiple attribute decision-making methods such as TOPSIS and VIKOR. These methods measure the distances between each alternative and positive/negative ideal alternatives and then consider these measures as a decision criterion. Under these circumstances, decision-makers should determine one positive and one negative ideal solution. EDAS can eliminate this additional step since it measures the distance between alternative and average solutions. So, decision-makers do not have to obtain positive/negative ideal solutions and just need to compute the average performance scores of each attribute. EDAS utilizes two measures: positive

distance from average (*PDA*) and negative distance from average (*NDA*). Naturally, the decision-makers desire higher positive distance and lower negative distance.

In this study, we have extended EDAS multiple attribute decision-making method under spherical fuzzy environment as a contribution to the literature. The novel concept of SFS can supply higher independence opportunities to the decision-makers since SFS allows them to state an independent hesitancy degree. In SFS, the geometric spherical surface gives a broader preference declaration opportunity to the decision-makers. The traditional EDAS and the existing 3D fuzzy versions of ARAS which are shown in Table 1, do not or rarely take this independent hesitancy element under consideration. To deal with this problem, SFS extension of EDAS is introduced in this study for the first time in the literature.

1.1 Step 1: Obtaining and Aggregating Decision Makers' Judgments

Decision-makers ($e=1, \dots, k$) are asked to express their judgments with linguistic terms stated in Table 2 about alternatives' ($i=1, \dots, m$) performances with respect to attributes ($j=1, \dots, n$). So, after collecting data from decision-makers, there will be k decision matrices (X^1, X^2, \dots, X^k). The linguistic terms have correspondences as membership, non-membership, and hesitancy degrees. If a decision-maker is fully informed or experienced with SFSs, he/she can express their own SF number instead of the given linguistic term. This is one of the benefits arisen from using an SFS extended EDAS.

The aggregated judgments are computed via SWAM operator (Equation 11) and the resulting aggregated matrix is obtained as given in Equation (12). In this step, the decision-makers can be weighted according to their expertise (ω_e). $\langle \mu_{ij}^e, v_{ij}^e, \pi_{ij}^e \rangle$ depicts the linguistic evaluation of e^{th} decision-maker and $\langle \mu_{ij}, v_{ij}, \pi_{ij} \rangle$ represents the aggregated performance evaluation. In this application, decision-makers select the most appropriate linguistic terms from Table 2 so that there are no outlier values in these evaluations as seen in the table and also, there are no proportional relations among them. For these reasons, we propose the usage of SWAM operator in the present SF-EDAS approach rather than the usage of SWGM (spherical weighted geometric mean) operator. Besides, Sharaf (2021) compared SWAM and SWGM operators in an application with SF-VIKOR and showed that SWAM operator give more stable and robust implementation results. If required, a decision analyst can use other operators like SWGM.

Table 2. Linguistic terms and corresponding SF numbers (Kutlu Gündoğdu and Kahraman, 2020a)

Linguistic Term	Abb.	μ	ν	π
Absolutely More Satisfactory	AMS	0.9	0.1	0.1
Very High Satisfactory	VHS	0.8	0.2	0.2
High Satisfactory	HS	0.7	0.3	0.3
Slightly More Satisfactory	SMS	0.6	0.4	0.4
Medium Satisfactory	MS	0.5	0.5	0.5
Slightly Low Satisfactory	SLS	0.4	0.6	0.4
Low Satisfactory	LS	0.3	0.7	0.3
Very Low Satisfactory	VLS	0.2	0.8	0.2
Absolutely Low Satisfactory	AL	0.1	0.9	0.1

$$\begin{aligned}
 X^{agg} &= SWAM_{\omega}(X^1, X^2, \dots, X^k) \\
 &= \omega_1 X^1 + \omega_2 X^2 + \dots + \omega_k X^k = \langle \mu_{ij}, \nu_{ij}, \pi_{ij} \rangle \\
 &= \left\{ \left[1 - \prod_{e=1}^k (1 - (\mu_{ij}^e)^2)^{\omega_e} \right]^{\frac{1}{2}}, \prod_{e=1}^k (\nu_{ij}^e)^{\omega_e}, \right. \\
 &\left. \left[\prod_{e=1}^k (1 - (\mu_{ij}^e)^2)^{\omega_e} - \prod_{e=1}^k (1 - (\mu_{ij}^e)^2 - (\pi_{ij}^e)^2)^{\omega_e} \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (11)
 \end{aligned}$$

$$X^{agg} = \begin{bmatrix} \langle \mu_{11}, \nu_{11}, \pi_{11} \rangle & \dots & \langle \mu_{1n}, \nu_{1n}, \pi_{1n} \rangle \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \langle \mu_{m1}, \nu_{m1}, \pi_{m1} \rangle & \dots & \langle \mu_{mn}, \nu_{mn}, \pi_{mn} \rangle \end{bmatrix} \quad (12)$$

Step 2: Calculation of Weights

In order to operate the model, the decision analyst needs to find the attribute weights since all the attributes can have different importance for the problem at hand. Objective weighting is chosen in this study for minimizing the potential manipulative effect of misbehaving decision-makers. If required, the decision analyst is free to use any subjective method such as SWARA or AHP. In entropy-based objective weighting, there two basic operations. Firstly, the entropy of each attribute should be calculated via Equation (10). For this purpose, alternatives' aggregated performance scores are considered. Then, objective weights of attributes are computed via Equation (13). m is here the number of attributes.

$$w_j = \frac{(1 - E_{n_j})}{\sum_{i=1}^m (1 - E_{n_j})} \quad (13)$$

Step 3: Finding Average Solutions

The basic distinctive feature of EDAS is the consideration of average scores rather than positive or negative ideals. In this step, the SF average scores of each attribute will be obtained. For this purpose, all the aggregated performance scores depicted in columns of X^{agg} matrix are averaged as given in Equation (14). For the addition operation, Equation (3) is used. Then, multiplication by a scalar ($\lambda = 1/m$) operator which is defined in Equation (5) is executed.

$$\widetilde{AV}_j = \frac{1}{m} * \sum_{i=1}^m \langle \mu_{ij}, \nu_{ij}, \pi_{ij} \rangle = \langle \mu_{ij}^{AV}, \nu_{ij}^{AV}, \pi_{ij}^{AV} \rangle \quad (14)$$

Step 4: Calculation of Positive and Negative Distances from Average Solution

In a classical decision-making problem, the attributes can be either beneficial or non-beneficial ones but the current problem has just beneficial attributes because the performance scores are linguistic terms. A more positive statement means a higher value in SFS-based linguistic terms (please see Table 2). The basic difference is not about attribute types but the elements of SFS. A membership degree has a positive meaning and a higher membership degree is always desired. Conversely, non-membership and hesitancy degrees have negative meanings and lower values are naturally desired. Also, all these three degrees are independently determined, and they can be operated independently as well. So, while measuring the distances from average solutions, Equation (15) and Equation (16) are used for positive distance (\widetilde{PDA}_{ij}) and negative distance (\widetilde{NDA}_{ij}) from average, respectively.

$$\widetilde{PDA}_{ij} = \begin{cases} \frac{\max(0, (\mu_{ij}^{AV} - \mu_{ij}^e))}{sc(\widetilde{AV}_j)} & \text{if membership degree is considered,} \\ \frac{\max(0, (\nu_{ij}^{AV} - \nu_{ij}^e))}{sc(\widetilde{AV}_j)} & \text{if non - membership degree is considered,} \\ \frac{\max(0, (\pi_{ij}^{AV} - \pi_{ij}^e))}{sc(\widetilde{AV}_j)} & \text{if hesitancy degree is considered,} \end{cases} \quad (15)$$

$$\widetilde{NDA}_{ij} = \begin{cases} \frac{\max(0, (\mu_{ij}^{AV} - \mu_{ij}^e))}{sc(\widetilde{AV}_j)} & \text{if membership degree is considered,} \\ \frac{\max(0, (\nu_{ij}^{AV} - \nu_{ij}^e))}{sc(\widetilde{AV}_j)} & \text{if non - membership degree is considered,} \\ \frac{\max(0, (\pi_{ij}^{AV} - \pi_{ij}^e))}{sc(\widetilde{AV}_j)} & \text{if hesitancy degree is considered,} \end{cases} \quad (16)$$

In literature, there is no proposition for division operation of SFS so that we had to consider the score function value of the average solution ($sc(\widetilde{AV}_j)$) rather than the average solution itself (\widetilde{AV}_j). The development of division operation on SFS is out of our study's scope since it requires more complex mathematics. This

situation can be accepted as a limitation of our proposition. The score value of the average solution will be a scalar number so that we can use Equation (5) as a representation of division as multiplication by a scalar.

Step 5: Weighting of PDA and NDA Values

In this step, the objective attribute weights are aggregated with PDA and NDA values. The multiplication by a scalar operator (Equation 5) is used and then, Equation (3) showing the addition operation is utilized. Weighted PDA and NDA values are defined in Equation (17) and Equation (18).

$$\widehat{SP}_i = \sum_{j=1}^m w_j * \widehat{PDA}_{ij} \quad (17)$$

$$\widehat{SN}_i = \sum_{j=1}^m w_j * \widehat{NDA}_{ij} \quad (18)$$

Step 6: Normalization Process and Selection of the Best Alternative according to Appraisal Score

To aggregate positive and negative weighted values, they all require to be normalized. Firstly, \widehat{SP}_i and \widehat{SN}_i SF numbers should be defuzzified via score function (Equation 7) and then, Equation (19) and Equation (20) are operated for finding normalized values.

$$NSP_i = \frac{sc(\widehat{SP}_i)}{\max_i sc(\widehat{SP}_i)} \quad (19)$$

$$NSN_i = 1 - \frac{sc(\widehat{SN}_i)}{\max_i sc(\widehat{SN}_i)} \quad (20)$$

As aggregation of normalized weighted positive and negative distances, the appraisal score of each alternative (AS_i) is calculated via Equation (21). All the alternatives can be ranked according to AS_i .

$$AS_i = \frac{NSP_i + NSN_i}{2} \quad (21)$$

V. AN APPLICATION ON PRODUCT DESIGN SELECTION PROBLEM

In this study, we have aimed to develop a fuzzified version of EDAS under a SF environment. We have also tried to keep the computations spherical fuzzy until the very end of the steps. The proposed SF-EDAS is here applied in an illustrative product design selection problem for additive manufacturing (Kutlu Gündoğdu and Kahraman, 2020b). In this example, 7 attributes are considered: speed of movement (C_1), temperature control range (C_2), machine overall cost (C_3), safety standards (C_4), rate of failure occurrence (C_5), modular

design (C_6), and axes motion accuracy (C_7). Three experts with the same significance level were asked to assess 5 alternative designs: A, B, C, D, and E.

In Step 1, three decision-makers ($e=1,2,3$) share their judgments involving the evaluations of alternatives ($i=1,\dots,5$) with respect to attributes ($j=1,\dots,7$) according to the linguistic terms given in Table 2. The personal decision matrices (X^1, X^2, X^3) are obtained as given in Table 3. Then, they are aggregated by performing SWAM operator given in Equation (11). Kutlu Gündoğdu and Kahraman (2020b) stated that the expert group is composed of experienced engineers and customers in additive manufacturing. They used an expert weight set of (0.3, 0.4, 0.3) but we assume $\omega_j = 1/3$ as the weight of each decision-maker in this study because we use an existing data set and do not have enough information about the expertise differences among them. In fact, the original weights are very close to each other so that we use equal expert weights in this hypothetical application of the proposed SF-EDAS. Table 4 gives the aggregated SF decision matrix (X^{agg}).

In Step 2, the entropy-based objective weights are obtained. Firstly, the entropies are computed by operating Equation (10). As a depiction of calculations, the entropy of C_1 is given below. Other entropies are $En_2=0.588$, $En_3=0.624$, $En_4=0.824$, $En_5=0.564$, $En_6=0.544$, and $En_7=0.459$. The weights of attributes are determined via Equation (13): $w_1=0.180$, $w_2=0.141$, $w_3=0.129$, $w_4=0.060$, $w_5=0.149$, $w_6=0.156$, and $w_7=0.185$.

Step 3 finds the average values by operating Equation (14). The last row of Table 4 includes the spherical fuzzy average solutions of each attribute and corresponding score function values, respectively. In Step 4, the positive and negative spherical distances from average solution of each alternative are measured degree by degree. The appropriate equation (in Equation 15 and Equation 16) is used for each case representing membership, non-membership, and hesitancy degrees. The \widehat{PDA}_{ij} and \widehat{NDA}_{ij} values are given in Table 5. In Step 5, the weighted positive and negative distances are calculated via Equation (17) and Equation (18) and they are depicted in Table 6. The summation of these values is given in Table 7. Step 6 is the last step of the methodology and includes the defuzzification, normalization (Equation 19 and Equation 20), and ranking the alternatives according to their AS_i (Equation 21).

At the end of the procedure, the ranks of the alternatives are obtained: $E > B > D > A > C$. So, the best one is the product design alternative E . It can be concluded that E is relatively the most distant alternative to the average solution.

Table 3. Evaluations of the experts

		C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7
A	E1	HS	MS	AMS	LS	AMS	MS	AMS
	E2	VHS	VHS	SLS	HS	SLS	VHS	SLS
	E3	HS	AMS	SLS	VLS	SLS	AMS	SLS
B	E1	AMS	HS	HS	HS	HS	HS	HS
	E2	MS	HS	AMS	LS	AMS	HS	AMS
	E3	VHS	HS	VHS	SLS	VHS	HS	VHS
C	E1	HS	MS	AMS	LS	AMS	MS	AMS
	E2	VHS	VHS	SLS	HS	SLS	VHS	SLS
	E3	HS	AMS	SLS	VLS	SLS	AMS	SLS
D	E1	VHS	SMS	HS	VLS	AMS	SMS	HS
	E2	SMS	VLS	LS	HS	SMS	VLS	VHS
	E3	HS	SMS	SLS	SMS	SMS	SMS	HS
E	E1	LS	MS	LS	HS	SLS	MS	AMS
	E2	VHS	VHS	HS	SMS	MS	VHS	MS
	E3	VHS	SLS	VLS	LS	MS	SLS	VHS

VI. COMPARISONS

In order to check the validity of the proposed entropy-based SF-EDAS tool, we have performed two comparisons. As indicated before, SFS concept is the generalization of Pythagorean fuzzy sets and neutrosophic sets. In the first comparison, for showing the novel extension’s validity, the same case is solved by neutrosophic set version of EDAS which is developed by Supciller and Toprak (2020), and Pythagorean fuzzy extension of EDAS which is proposed by Mohagheghi and Mousavi (2020). The interested reader can examine the methods in the papers which are specified. Appropriate linguistic term conversions are operated, and the relevant steps are performed respectively. The results are depicted in Table 8.

The other two method’s basic drawback is their early defuzzification perspective. After collecting the data from the experts and aggregating them, they preferred to defuzzify the decision matrix and proceed to the remaining steps as the classical way of EDAS suggests. For clarifying the importance of keeping the whole process spherical fuzzy until the very end of the method, we also performed a modified version of the proposed SF-EDAS. For this purpose, the aggregated decision matrix is defuzzified in the early stages and the classical EDAS is proceeded as the other extensions implement.

Table 8 shows that the proposed SF-EDAS gave significantly different results than the others in terms of alternative rankings. Early defuzzification implementing methods, namely neutrosophic EDAS (NS-EDAS),

Pythagorean fuzzy EDAS (PF-EDAS), and SF-EDAS (Early-Def) found the same rankings. This interesting finding emphasizes the importance of keeping the whole process spherical fuzzy until the very end.

In the second comparison, a sensitivity analysis is conducted to introduce the robustness of the method against the attribute weight changes. We use the same methodology by considering different weight sets. In the first trial, we assume that all the attribute weights are equal ($w_j = 1/7$). In the second trial, the entropy measure proposed by Barukab et al (2019) which is given in Eq. (22) is used in calculating the weights. The resulting weight set is found as (0.158, 0.143, 0.136, 0.105, 0.146, 0.149, 0.162). When we compare this new set with the first weight set which is based on Eq. (10), (0.180, 0.141, 0.129, 0.060, 0.149, 0.156, 0.185), it is seen that the attribute weights changed in magnitude but their priority ranking does not.

$$E(\tilde{A}_S) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[1 - \left| \mu_{\tilde{A}_S}^2(x_i) - \pi_{\tilde{A}_S}^2(x_i) \right| \frac{2 - \mu_{\tilde{A}_S}^2(x_i) - v_{\tilde{A}_S}^2(x_i) - \pi_{\tilde{A}_S}^2(x_i)}{2} \right] \quad (22)$$

Table 9 shows the results of the sensitivity analysis. From the table, it is seen that there are no significant differences between the comparisons. The leading alternative (E) is keeping its ranking while the pairs of (B,D) and (A,C) takes the order pairs of (2,3) and (4,5), respectively. Therefore, the method’s robustness against the changes in attribute weights is shown in this manner. Future studies can retest it via applying the method in solving larger and more complex decision problems.

Table 4. Aggregated SF decision matrix (X^{agg}) and average solutions

	C_1		C_2		C_3		C_4		C_5		C_6		C_7								
A	0.739	0.262	0.266	0.793	0.215	0.255	0.699	0.330	0.274	0.486	0.552	0.286	0.699	0.330	0.274	0.793	0.215	0.255	0.699	0.330	0.274
B	0.793	0.215	0.255	0.700	0.300	0.300	0.821	0.182	0.194	0.519	0.501	0.338	0.821	0.182	0.194	0.700	0.300	0.300	0.821	0.182	0.194
C	0.739	0.262	0.266	0.793	0.215	0.255	0.699	0.330	0.274	0.500	0.528	0.307	0.699	0.330	0.274	0.793	0.215	0.255	0.699	0.330	0.274
D	0.714	0.288	0.298	0.517	0.504	0.369	0.519	0.501	0.338	0.566	0.458	0.330	0.757	0.252	0.284	0.629	0.400	0.290	0.739	0.262	0.266
E	0.714	0.304	0.229	0.625	0.391	0.364	0.486	0.552	0.286	0.577	0.438	0.344	0.470	0.531	0.474	0.625	0.391	0.364	0.793	0.215	0.255
\widetilde{AV}_j	0.742	0.265	0.264	0.707	0.307	0.305	0.675	0.353	0.271	0.532	0.494	0.323	0.714	0.305	0.297	0.720	0.294	0.292	0.756	0.257	0.252
$sc(\widetilde{AV}_j)$	0.228		0.161		0.157		0.015		0.174		0.183		0.254								

Table 5. \widetilde{PDA}_{ij} and \widetilde{NDA}_{ij} values

\widetilde{PDA}_{ij}	C_1		C_2		C_3		C_4		C_5		C_6		C_7								
A	0.000	0.000	0.000	0.654	0.000	0.122	0.376	0.000	0.000	0.000	0.000	0.300	0.000	0.000	0.055	0.582	0.000	0.085	0.000	0.000	0.000
B	0.453	0.000	0.019	0.000	0.000	0.013	0.796	0.000	0.182	0.000	0.000	0.000	0.692	0.000	0.238	0.000	0.000	0.000	0.480	0.000	0.114
C	0.000	0.000	0.000	0.654	0.000	0.122	0.376	0.000	0.000	0.000	0.000	0.136	0.000	0.000	0.055	0.582	0.000	0.085	0.000	0.000	0.000
D	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.955	0.000	0.000	0.475	0.000	0.030	0.000	0.000	0.005	0.000	0.000	0.000
E	0.000	0.000	0.073	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.979	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.370	0.000	0.000

\widetilde{NDA}_{ij}	C_1		C_2		C_3		C_4		C_5		C_6		C_7								
A	0.113	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.009	0.980	0.000	0.000	0.288	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.455	0.000	0.044
B	0.000	0.000	0.000	0.201	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.765	0.000	0.119	0.000	0.000	0.000	0.322	0.000	0.019	0.000	0.000	0.000
C	0.113	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.009	0.946	0.000	0.000	0.288	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.455	0.000	0.044
D	0.339	0.000	0.070	0.854	0.000	0.144	0.813	0.000	0.158	0.000	0.000	0.056	0.000	0.000	0.000	0.638	0.000	0.000	0.256	0.000	0.027
E	0.342	0.000	0.000	0.642	0.000	0.143	0.859	0.000	0.036	0.000	0.000	0.171	0.894	0.000	0.354	0.649	0.000	0.164	0.000	0.000	0.006

Table 6. \widetilde{SP}_{ij} and \widetilde{SN}_{ij} values

\widetilde{SP}_{ij}	C ₁		C ₂		C ₃		C ₄		C ₅		C ₆		C ₇								
A	0.000	0.009	0.000	0.275	0.124	0.059	0.139	0.045	0.000	0.000	0.000	0.075	0.000	0.000	0.021	0.250	0.114	0.040	0.000	0.000	0.000
B	0.201	0.093	0.009	0.000	0.014	0.005	0.052	0.235	0.103	0.000	0.000	0.000	0.304	0.166	0.124	0.000	0.000	0.000	0.218	0.152	0.055
C	0.000	0.009	0.000	0.032	0.124	0.059	0.008	0.045	0.000	0.000	0.000	0.033	0.000	0.000	0.021	0.250	0.114	0.040	0.000	0.000	0.000
D	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.368	0.000	0.000	0.193	0.080	0.013	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000
E	0.000	0.000	0.031	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.417	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.164	0.098	0.000

\widetilde{SN}_{ij}	C ₁		C ₂		C ₃		C ₄		C ₅		C ₆		C ₇								
A	0.048	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.420	0.000	0.000	0.113	0.042	0.000	0.000	0.000	0.000	0.205	0.149	0.021
B	0.000	0.000	0.000	0.076	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.227	0.000	0.045	0.000	0.000	0.000	0.130	0.014	0.008	0.000	0.000	0.000
C	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.356	0.000	0.000	0.113	0.042	0.000	0.000	0.000	0.000	0.205	0.149	0.021
D	0.012	0.511	0.031	0.410	0.241	0.096	0.361	0.209	0.092	0.000	0.000	0.014	0.000	0.000	0.000	0.280	0.148	0.000	0.112	0.022	0.012
E	0.012	0.558	0.000	0.269	0.114	0.068	0.398	0.265	0.023	0.000	0.000	0.042	0.462	0.278	0.327	0.286	0.138	0.082	0.000	0.000	0.003

Table 7. Defuzzification, normalization, and AS_i values for ranking alternatives

	\widetilde{SP}_i	$sc(\widetilde{SP}_i)$	NSP_i	\widetilde{SN}_i	$sc(\widetilde{SN}_i)$	NSN_i	AS_i	Rank				
A	0.388	0.000	0.099	0.074	0.429	0.473	0.000	0.019	0.205	0.000	0.215	4
B	0.416	0.000	0.159	0.040	0.235	0.270	0.000	0.045	0.049	0.762	0.498	2
C	0.252	0.000	0.079	0.024	0.137	0.417	0.000	0.020	0.158	0.232	0.184	5
D	0.410	0.000	0.012	0.158	0.921	0.584	0.000	0.121	0.200	0.025	0.473	3
E	0.443	0.000	0.028	0.172	1.000	0.660	0.000	0.289	0.054	0.739	0.870	1

Table 8. Comparison of alternative rankings

	AS	SF-EDAS	AS	SF-EDAS (Early-Def)	AS	NS-EDAS	AS	PF-EDAS
A	0.215	4	0.393	3	0.652	2, 3	0.662	2, 3
B	0.498	2	0.957	1	0.993	1	0.998	1
C	0.184	5	0.513	2	0.652	2, 3	0.662	2, 3
D	0.473	3	0.294	4	0.279	4	0.169	4
E	0.870	1	0.235	5	0.082	5	0.078	5

Table 9. Results of sensitivity analysis

	AS	SF-EDAS (Eq. 10)	AS	SF-EDAS (Equal)	AS	SF-EDAS (Eq. 22)
A	0.215	4	0.072	5	0.110	5
B	0.498	2	0.424	3	0.445	3
C	0.184	5	0.142	4	0.156	4
D	0.473	3	0.671	2	0.612	2
E	0.870	1	0.922	1	0.907	1

VII. CONCLUSION

This study proposes a novel spherical fuzzy version of EDAS with the integration of entropy-based objective weighting to solve the problem of consideration of hesitancy which is possibly hidden in the decision maker's preference and judgments. The main contributions can be explained as given below.

- EDAS is one of the literature's younger but stronger methods in recent years. It is extended into a spherical fuzzy environment in this study. The novel method's contribution stems from its representation strength of hesitancy.
- Entropy-based objective attribute weighting is utilized with the integration of SF-EDAS, but the methodology is generalizable with both objective and subjective approaches.
- Most of the computation required by EDAS is adapted by the mathematics of SFS and the entire calculation stage is tried to be kept spherical fuzzy until the end of SF-EDAS. So, the early defuzzification problem is not valid for this version.

Besides its contributions, the study also requires some improvement. Firstly, the requirement involving the utilization of a predetermined and constant linguistic term set (Table 2) should be revised. A future study can research the decision makers' direct allocations of membership, non-membership, and hesitancy degrees so that the preferences and opinions would be modeled more practically. Also, the measurement of consensus in a decision team should be investigated under spherical fuzzy environment. From a technical viewpoint, one last limitation of the EDAS method can be its consideration of the average solution. In case of having outlier expert evaluations, the method's behavior should be extensively researched because the EDAS solution of a decision problem may potentially be affected by these outlier evaluations.

REFERENCES

- [1] Aldalou, E., Perçin, S. (2020). Financial Performance Evaluation of Food and Drink Index Using Fuzzy MCDM Approach. *Int. J. Econ. Innov.*, 6(1), 1-19.
- [2] Atanassov, K.T. (1986). Intuitionistic fuzzy sets. *Fuzzy Set. Syst.*, 20, 87-96.
- [3] Aydoğdu, A., Gül, S. (2020). A novel entropy proposition for spherical fuzzy sets and its application in multiple attribute decision-making. *Int. J. Intell. Syst.*, 35(9), 1354-1374.
- [4] Barukab, O., Abdullah, S., Ashraf, S., Arif, M., Khan, S.A. (2019). A New Approach to Fuzzy TOPSIS Method Based on Entropy Measure under Spherical Fuzzy Information. *Entropy*, 21, 1231.
- [5] Biswas, P., Pramanik, S., Giri, B.C. (2016). TOPSIS method for multi-attribute group decision-making under single-valued neutrosophic environment. *Neural Comput. & Applic.*, 27, 727-737.
- [6] Darko, A.P., Liang, D. (2020). Some q-rung orthopair fuzzy Hamacher aggregation operators and their application to multiple attribute group decision making with modified EDAS method. *Eng. Appl. Artif. Intel.*, 87, 103259.
- [7] ErKayman, B., Khorshidi, M., Usanmaz, B. (2018). An integrated fuzzy approach for ERP deployment strategy selection under conflicting criteria. *Atatürk Üniv. İİB Dergisi*, 32(3), 807-823.
- [8] Feng, X., Wei, C., Liu, Q. (2018). EDAS Method for Extended Hesitant Fuzzy Linguistic Multicriteria Decision Making. *Int. J. Fuzzy Syst.*, 20(8), 2470-2483.
- [9] Han, L., Wei, C. (2020). An Extended EDAS Method for Multicriteria Decision-Making Based on Multivalued Neutrosophic Sets. *Complexity*, 7578507, 9 pages.

- [10] Jin, Y., Ashraf, S., Abdullah, S. (2019). Spherical Fuzzy Logarithmic Aggregation Operator Based on Entropy and Their Application in Decision Support Systems. *Entropy*, 21, 628.
- [11] Ju, Y., Liang, Y., Luo, C., Dong, P., Gonzalez, E.D.R.S., Wang, A. (2021). T-spherical fuzzy TODIM method for multi-criteria group decision-making problem with incomplete weight information. *Soft Comput*, 25, 2981-3001.
- [12] Kahraman, C., Keshavarz Ghorabae, M., Zavadskas, E.K., Cevik Onar, S., Yazdani, M., Oztaysi, B. (2017). Intuitionistic fuzzy EDAS method: an application to solid waste disposal site selection. *J. Environ. Eng. Landsc.*, 25(01), 1-12.
- [13] Karaşan, A., Kahraman, C. (2018a). A novel interval-valued neutrosophic EDAS method: prioritization of the United Nations national sustainable development goals. *Soft Comput.*, 22, 4891-4906.
- [14] Karaşan, A., Kahraman, C. (2018b). Interval-Valued Neutrosophic Extension of EDAS Method. In: Kacprzyk J, Szmidt E, Zadrozny S, Atanassov KT, Krawczak M (eds) *Advances in Fuzzy Logic and Technology 2017, Proceedings of EUSFLAT'17, September 11-15, Warsaw, Poland & IWIFSGN'17, September 13-15, Warsaw, Poland. Advances in Intelligent Systems and Computing, Switzerland: Springer* 642, 343-357.
- [15] Kas Bayrakdaroğlu, F., Kundakçı, N. (2019). Bulanık EDAS Yöntemi ile Ar-Ge Projesi Seçimi. *Uluslararası İkt. ve İd. İnc. Dergisi*, 24, 151-170.
- [16] Keshavarz Ghorabae, M., Zavadskas, E.K., Olfat, L., Turskis, Z. (2015). Multi-Criteria Inventory Classification Using a New Method of Evaluation Based on Distance from Average Solution (EDAS). *Informatica*, 26(3), 435-451.
- [17] Koksalmis, E., Kabak, Ö. (2019). Deriving decision makers' weights in group decision making: An overview of objective methods. *Inform. Fusion*, 49, 146-160.
- [18] Kutlu Gündoğdu, F. (2020). Principals of Spherical Fuzzy Sets. In: Kahraman C, Cebi S, Cevik Onar S, Oztaysi B, Tolga A, Sari I (eds) *Intelligent and Fuzzy Techniques in Big Data Analytics and Decision Making (INFUS'19)*, July 23-25, İstanbul, Turkey. *Advances in Intelligent Systems and Computing, Switzerland: Springer* 1029, 15-23.
- [19] Kutlu Gündoğdu, F., Kahraman, C. (2019a). Spherical fuzzy sets and spherical fuzzy TOPSIS method. *J. Intell. Fuzzy Syst.*, 36(1), 337-352.
- [20] Kutlu Gündoğdu, F., Kahraman, C. (2019b). A novel fuzzy TOPSIS method using emerging interval-valued spherical fuzzy sets. *Eng. Appl. Artif. Intel.*, 85, 307-323.
- [21] Kutlu Gündoğdu, F., Kahraman, C. (2020a). A novel spherical fuzzy analytic hierarchy process and its renewable energy application. *Soft Comput.*, 24, 4607-4621.
- [22] Kutlu Gündoğdu, F., Kahraman, C. (2020b). A novel spherical fuzzy QFD method and its application to the linear delta robot technology development. *Eng. Appl. Artif. Intel.*, 87, 103348.
- [23] Li, Y.Y., Wang, J.Q., Wang, T.L. (2019). A Linguistic Neutrosophic Multi-criteria Group Decision-Making Approach with EDAS Method. *Arab. J. Sci. Eng.*, 44, 2737-2749.
- [24] Li, Z., Wei, G., Wang, R., Wu, J., Wei, C., Wei, Y. (2020). EDAS method for multiple attribute group decision making under q-rung orthopair fuzzy environment. *Technol. Econ. Dev. Eco.*, 26(1), 86-102.
- [25] Liang, Y. (2020). An EDAS Method for Multiple Attribute Group Decision-Making under Intuitionistic Fuzzy Environment and Its Application for Evaluating Green Building Energy-Saving Design Projects. *Symmetry*, 12, 484.
- [26] Lima Junior, F.R., Osiro, L., Carpinetti, L.C.R.. (2014). A comparison between Fuzzy AHP and Fuzzy TOPSIS methods to supplier selection. *Appl. Soft Comput.*, 21, 194-209.
- [27] Mishra, A.R., Mardani, A., Rani, P., Zavadskas, E.K. (2020). A novel EDAS approach on intuitionistic fuzzy set for assessment of health-care waste disposal technology using new parametric divergence measures. *J. Clean. Prod.*, 272, 122807.
- [28] Mohagheghi, V., Mousavi, S.M. (2019). D-WASPAS: Addressing Social Cognition in Uncertain Decision-Making with an Application to a Sustainable Project Portfolio Problem. *Cogn. Comput.*, 12, 619-641.
- [29] Mukul, E., Büyüközkan, G., Güler, M. (2019). Strategic analysis of intelligent transportation systems. *Beykoz Akad. Dergisi*, Özel Sayı, 148-158.
- [30] Özbek, A. (2019). Türkiye'deki illerin EDAS ve WASPAS yöntemleri ile taşınabilirlik kriterlerine göre sıralanması. *Kırıkkale Üniv. SB Dergisi*, 9(1), 177-200.
- [31] Özmen, M. (2020). OECD ülkelerinin telekomünikasyon sektörü açısından SMAA-EDAS yöntemi ile değerlendirilmesi. *NOHU J. Eng. Sci.*, 9(1), 224-237.
- [32] Peng, H.G., Zhang, H.Y., Wang, J.Q. (2018). Probability multi-valued neutrosophic sets and its application in multi-criteria group decision-making problems. *Neural Comput. & Applic.*, 30, 563-583.
- [33] Peng, X., Liu, C. (2017). Algorithms for neutrosophic soft decision making based on EDAS, new similarity measure and level soft set. *J. Intell. Fuzzy Syst.*, 32, 955-968.
- [34] Piasecki, M., Kostyrko, K. (2020). Development of Weighting Scheme for Indoor Air Quality Model Using a Multi-Attribute Decision Making Method. *Energies*, 13, 3120.

- [35] Schitea, D., Deveci, M., Iordache, M., Bilgili, K., Akyurt, İ.Z., Iordache, I. (2019). Hydrogen mobility roll-up site selection using intuitionistic fuzzy sets based WASPAS, COPRAS and EDAS. *Int. J. Hydrogen Energ.*, 44, 8585-8600.
- [36] Sharaf, I.M. (2021). Spherical Fuzzy VIKOR with SWAM and SWGM Operators for MCDM. In: Kahraman C, Kutlu Gündoğdu F (eds) *Decision Making with Spherical Fuzzy Sets*. Studies in Fuzziness and Soft Computing 392, Switzerland: Springer, 217-240.
- [37] Smarandache, F. (1999). A unifying field in logics neutrosophy: neutrosophic probability, set and logic, Rehoboth: American Research Press.
- [38] Supciller, A.A., Toprak, F. (2020). Selection of wind turbines with multi-criteria decision making techniques involving neutrosophic numbers: A case from Turkey. *Energy*, 207, 118237.
- [39] Tian, Z.P., Wang, J., Wang, J.Q., Zhang, H.Y. (2017). An improved MULTIMOORA approach for multi-criteria decision-making based on interdependent inputs of simplified neutrosophic linguistic information. *Neural Comput. & Applic.*, 28 (Suppl 1), S585-S597.
- [40] Ulutaş, A. (2018). Entropi tabanlı EDAS yöntemi ile lojistik firmalarının performans analizi. *Uluslararası İkt. ve İd. Inc. Dergisi*, 23, 53-66.
- [41] Wang, H., Smarandache, F., Zhang, Y.Q., Sunderraman, R. (2005). Interval Neutrosophic Sets and Logic: Theory and Applications in Computing, Hexis, USA.
- [42] Wang, H., Smarandache, F., Zhang, Y.Q., Sunderraman, R. (2010). Single valued neutrosophic sets. In: Smarandache F (ed) *Multispace & Multistructure. Neutrosophic Transdisciplinarity Vol. IV*. North-European Scientific Publishers, Hanko, Finland, 410-413.
- [43] Wang, P., Wang, J., Wei, G. (2019). EDAS method for multiple criteria group decision making under 2-tuple linguistic neutrosophic environment. *J. Intell. Fuzzy Syst.*, 37(2), 1597-1608.
- [44] Xiong, W., Cheng, J. (2018). A Novel Method for Determining the Attribute Weights in the Multiple Attribute Decision-Making with Neutrosophic Information through Maximizing the Generalized Single-Valued Neutrosophic Deviation. *Information*, 9, 137.
- [45] Xu, D., Cui, X., Xian, H. (2020). An Extended EDAS Method with a Single-Valued Complex Neutrosophic Set and Its Application in Green Supplier Selection. *Mathematics*, 8, 282.
- [46] Yager, R.R. (2013). Pythagorean fuzzy subsets. *Proceedings of Joint IFSA World Congress and NAFIPS Annual Meeting*, June 24-28, 2013, Edmonton, Canada, 57-61.
- [47] Yager, R.R. (2017). Generalized Orthopair Fuzzy Sets. *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, 25(5), 1222-1230.
- [48] Zadeh, L.A. (1965). Fuzzy sets. *Inform. Control*, 8, 338-353.

Müşteri İlişkileri Yönetimi Uygulamasında Gösterge Paneli Kullanımı ile Kestirimci Bakım Yaklaşımı

Predictive Maintenance Approach with the Use of Dashboard and Graphics in Software Processes

Samet GÜRSEV¹ 

¹Turkcell Global Bilgi A.Ş., Ar-Ge Merkezi, 34722, İstanbul, Türkiye

Öz

Günümüzde pek çok bankacılık işlemi ve resmi işlemler online platformlar üzerinden yazılımlar ile sağlanmaktadır. Yazılım uygulamalarında günlük (log) dosyaları mesajlarının doğru anlaşılması sistem ve network devamlılığı için büyük önem taşımaktadır. Günlük (log) dosyaları mesajlarının doğru analiz edilebilmesi için log indeks ve pattern yapılarının doğru kurgulanması gerekmektedir. Bu uygulamalardaki kesintiler büyük maddi zararlara ve müşteri kayıplarına yol açmaktadır. Kurumların prestijlerinin korunması ve müşteri memnuniyeti sağlanması için kestirimci bakım uygulamaları önem taşımaktadır. Çalışmada yer alan çok sayıda müşterinin iş süreçlerini takip ettiği uygulamaların anlık günlük (log) dosyaları bilgilerinin grafikler ve dashboardlar yardımı ile takip edilmesi ve tekrar eden hataların önceden incelenip olası bir kesintinin engellenmesi konusunda yapılan araştırma ve çalışmaları incelemektedir.

Anahtar Kelimeler: Kestirimci Bakım, Müşteri İlişkileri Yönetimi, Yönetim Bilişim Sistemleri

Abstract

Today, many banking and official transactions are provided by software on online platforms. Correct understanding of log messages in software processes is of great importance for system and network continuity. Log index and pattern structures must be constructed correctly in order to analyze log messages correctly. The interruptions in these applications cause great financial damages and customer losses. Predictive maintenance practices are important to protect the prestige of institutions and to ensure customer satisfaction. It examines the research and studies conducted to monitor the instant log information of the applications where many customers in the study follow the collection and business processes with the help of graphs and dashboards, and to examine the repetitive errors in advance and prevent a possible interruption.

Keywords: Predictive Maintenance, Customer Relationship Management, Management Information Systems

I. GİRİŞ

Yazılım uygulamalarında günlük (log) dosyaları bilgisayar sistemlerinin, mobil cihazların ve yazılım uygulamalarının hareket ve performanslarının içerildiği kayıtlardır. Bir bilgisayar programı uygulaması daha önceden tanımlanmış olan günlük (log) dosyaları seviyesine göre kayıt mesajı oluşturmada ve hareketlerini kaydetmektedir. Günlük dosyaların mesajları farklı gün ve saatler içerisinde sistemin, network yapısının ve kullanıcının yaptığı hareketleri, aldığı hataları ve performans bilgilerini detaylı olarak kayıt altına almaktadır.

Günlük mesajları oluşturulmadan önce bu mesajın içeriği, tanımı ve zaman aralıkları ile ilgili yapılarını indeksleme çalışmalarının detaylı olarak yapılması büyük önem taşımaktadır. Uygulamalarda izlenebilirlik önemli bir özelliktir. İzlenebilirlik kavramı altında loglama, metrik toplama, takip etme, görselleştirme ve uyarma adımlarının bütünü içerilmektedir. Log dataları çok farklı sayıda kaynaktan tek bir data kaynağına aktarıldığında bunların sınıflandırılması ve kategori edilmesi gerekmektedir.

Data kaynaklarının farklı mesaj başlıklarına sahip olması bu süreç için önemlidir. Burada log data kaynakları ve sahip oldukları kategorilerin yönetimi büyük önem taşımaktadır. Bazı log mesajları çok sık görülmez ancak bu log mesajı aslında sistemin kesintiye uğrama ihtimaline karşı uyarıcı nitelik taşıyabilir. Bu sebeple log mesajları kategorileri detaylı olarak analiz edilmeli ve alınan bu mesajlar kategorilerine göre görselleştirme yapılarak uyarıcı olarak kullanılmalıdır. JSON, XML, CSV gibi formatlarda log mesajlarının incelenebilir olması da bir başka önemli özelliktir. Elastic search uygulaması bu özelliklere sahip bir yapıda olduğu için araştırma için tercih edilmiştir.

Araştırma temel amacı çok sayıda müşterinin talep ve şikayetlerinin takip edildiği bir yazılım uygulamasında hiçbir kesinti olmadan sorunsuz çalışma sağlanabilmesi ve ek isteklere bağlı değişikliklerin devreye alımları sonrası sistemin ayakta kalması için yapılması gereken süreçler detaylı olarak incelenmesidir. Yine bu sistem

üzerinde yer alan günlük dosya yapısının etkili kullanımı ile literatürde kestirimci bakım olarak belirlenen yaklaşımın sağlanması ve bu kayıtları inceleme yaparak uygulama hata alıp kitlenmeden çok önce önleyici müdahaleler yapmak konusunda araştırma yapılmıştır. Araştırmanın ikinci bölümde log yönetimi ve hata önleyici faaliyetleri içeren geniş kapsamlı bir literatür taraması aktarmıştır. Üçüncü kısımda çok sayıda müşteriye hizmet veren yeni nesil bir müşteri ilişkileri yönetim uygulamasının kesintisiz çalışması için yapılan log yönetimi faaliyetleri aktarılmıştır. Dördüncü kısımda elde edilen log bilgilerine bağlı olarak hazırlanan grafik çalışmaları paylaşılmıştır. Beşinci bölümde kestirimci bakım çalışmaları ve kesintisiz çalışma için gerekli yapılan çalışmalar gösterilmiştir. Sonuç bölümünde yapılan çalışmanın katkıları ve avantajları ile detaylı araştırma yapılması gereken noktalar özetlenmiştir.

II. LİTERATÜR TARAMASI

Üretim Sistemleri için kestirimci bakım ekipmanlardan veri alınması ve hata yaşanmadan önce önleyici bakım yapılması ile hatanın engellenmesini içerir [1]. Log İngilizce bir kelime olup, Türkçe karşılığı kayıt, kütük anlamına gelmektedir. Günlük (Log) Dosya bilgileri temel olarak donanım üzerinde çalışan yazılım için yapılan her işlemin tutulmasını sağlayan kayıt dosyaları olarak adlandırılır [2]. İngilizce olarak Dashboard ifadesi kullanılan Türkçe karşılığı gösterge paneli olan yapı aslında bir uygulamanın içeriği hakkındaki tüm bilgileri hızlıca gösteren görsel ara yüze verilen isimdir [3]. Araştırmaya konu olan müşteri ilişkileri yönetimi yazılım uygulaması çok sayıda müşterinin talep ve şikayet takibini dijital ortamda takip etmek ve ilgili birimlere en hızlı şekilde yönlendirmektedir. Araştırma özelinde incelenen bu yazılım sahip olduğu günlük dosya bilgisi yapısı ile yapılan her işlemi tüm detayları ile kayıt altına almaktadır. Alınan bu dosya kayıtları sistemde kurgulanan gösterge paneli yardımıyla anlık olarak izlenmekte ve hataya yol açabilecek kayıtlar önceden tespit edilerek uygulamanın hiç kesinti yaşamadan çalışması amaçlanmaktadır.

Literatürde yer alan yazılım uygulamalarını inceleyen pek çok akademik çalışma detaylı olarak incelenmiştir. Müşteri ilişkileri yönetimi konusunda; Zeng ve diğerleri [3], Mukerjee [4], Agrawal ve Mittal [5], Roggeveen ve Beitelspacher [6], AlQershi ve diğerleri [7], Abekah-Nkrumah ve diğerleri [8], Chatterjee ve diğerleri [9], Eng ve diğerleri [10], Partouche ve diğerleri [11], Yan ve diğerleri [12] yaptıkları çalışmalarda müşteri ilişkileri yönetim süreçlerinin (CRM) önemli noktalarını incelemiştir. Farklı müşteri ilişkileri yönetim uygulamaları ve başarı kriterileri detaylı olarak araştırılmıştır.

Uygulamanın doğru parametreler ile takip edilmesi ve performans analizi konusunda; Barney [13], Bititci ve diğerleri [14], Azapagic ve Perdan [15], Braz ve diğerleri [16], Bocken ve diğerleri [17], Bengtsson ve

Salonen [18], Bokrantz ve diğerleri [19], Ante ve diğerleri [20] anahtar performans kriterlerini belirlemek adına bir yönetim performans sistemi kurgulamış ve bunu çok katmanlı bir KPI ağacı haline getirmişlerdir. Bu çalışmalarda akıllı üretim sistemleri performans kriterleri ve dijitalleşme süreçlerini incelemiştir.

Günlük dosya kayıt bilgileri, log yapısı özelinde yapılan akademik çalışmalar detaylı olarak incelenmiştir. Uygulama log yapısının etkili olması konusunda; Campbell [21], Ehrenfeld [22], Campbell ve diğerleri [23], Fangucci ve diğerleri [24], Brundage ve diğerleri [25], Dalenogare ve diğerleri [26] belirlenmiş anahtar performans sistemleri kullanarak farklı uygulama ve sistemlerde incelemeler yapmıştır. Vaarandi [27], Vaarandi ve diğerleri [28], Vaarandi ve diğerleri [29], Vaarandi ve Zhuge [30], He ve diğerleri [31], Kans ve diğerleri [32], Kennerley ve diğerleri [33], Hamooni ve diğerleri [34], Kang ve diğerleri [36], Ketokivi [35], log yönetimi ve log performansı konularında incelemeler yapmıştır ve log yönetiminin başarı kriterlerini aktarmışlardır.

Kestirimci bakım yaklaşımı ve bunun literatürdeki çalışmaları detaylı olarak incelenmiştir. Yazılım uygulamalarına bu yaklaşımı uygulamak için çalışmalara bakılmıştır. Schneiderman [36], Pintelon ve Van Puyvelde [37], Veleva ve Ellenbecker [38], Rouse ve Putterill [39], Tangen [40], Wireman [41], Winroth ve diğerleri [42], Stefanovic ve diğerleri [43], Tirabeni ve diğerleri [44], Wijesinghe ve Mallawarachchi [45], H. kestirimci bakım, uygulamaların bakım performansı ve başarılı bakım faaliyetleri konusunda incelemeler yapmıştır. Buradaki bakım faaliyetleri süreç olarak izlenmiş olup süreçlerin optimum performans ile çalışması için literatürde yer alan kavramlar detaylı olarak incelenmiş ve aktarılmıştır.

Lewis ve Steinberg [46], Misra ve Bhavsar [47], Sharma ve diğerleri [48], Gebauer ve diğerleri [49], Nadakatti ve diğerleri [50], Zaim ve diğerleri [51], Rocha ve Rodrigues [52], Antomarioni ve diğerleri [53], Kumar [54] yaptıkları çalışmalarda kestirimci bakım yaklaşımını detaylı olarak incelemiştir. Yapılan araştırmalarda kestirimci bakım faaliyetlerinin yazılım uygulamaları için kesinti olmadan veya hata yaşanmadan önce gerekli önlemlerin alınması amaçlandığı gösterilmektedir.

Literatür araştırması içinde müşteri ilişkileri yönetimi, yazılım uygulaması performans kriterleri, log yönetimi, yazılım bakım süreçleri ve kestirimci bakım çalışmaları incelenmiştir. Yapılan literatür çalışması ile araştırmaya konu olan çalışmanın literatüre uygun özelliklerde başarılı bir ürün olarak çalışması amaçlanmıştır. Literatür taramasında günlük dosya yapısı, müşteri ilişkileri yönetimi ve kestirimci bakım çalışması içeren bir çalışma bulunmadığı için araştırma

kapsadığı özellikler bakımından özgünlük ve yenilikçilik sağlamayı hedeflemektedir.

III. UYGULAMA

3.1. Günlük (Log) Dosyaları Kayıt Yapısı ve Özellikleri

Bilgisayarlarımız ilk açtığımız anda kullanım süresi ve kapanana kadar birçok işleminiz kayıt altına alınmaktadır [2]. Başta işletim sistemi olmak üzere, bilgisayarınızda kullandığımız pek çok uygulama işlemleri ile ilgili kayıt tutmaktadır. Bu kayıtlar sayesinde bilgisayarımızdaki uygulamaların hataları, izinsiz erişimleri, donanımları stabil çalışması, oturum aktiviteleri gibi konularda bilgi sahibi oluruz.

Günlük dosya kayıtları İngilizce adıyla Log kayıtları olarak adlandırılan bu kayıtlar bilgisayarların yaşadığı her türlü sorunun tespiti ve olası siber saldırıların tespiti başlıklarında önem teşkil etmektedir. ISO 27001 gibi güvenlik standartları için de loglama çalışmaları bir şart olarak görülmektedir. Log çeşitli yerlerden gelen kayıtların bir arada tutulması içindir. Bu işlem esnasında log bilgilerinin gereksiz ve fazla olması sistem altyapısının performans kaybına yol açabilir. Önemli olan etkili ve doğru log kayıtlarının sistem için oluşturulabilmesidir. Log ile tespit edilmesi gereken akışlar ve kullanıcıların yaptığı hatalı veya yasaklı işlemlerin doğru tespiti için log altyapısının doğru kurgulanmış olması ve bu altyapının mesajlarının doğru gelmesi büyük önem taşımaktadır [29]

Log altyapısı temel olarak bazı ana özelliklere sahip olmalıdır. Farklı türdeki olayların bir isim altında çıkması, raporlanması, tutulması konusudur. Log bilgilerinin detay içerikleri sınıflandırma dediğimiz yapıya uygun olmalıdır. Örnek olarak tüm log dosyası içerisinde mobil ağ cihazlarından gelen log bilgileri ayrılabilir olmalıdır. Bir diğer önemli özellik de korelasyon olarak adlandırılan log kaydı ile ilgili kuralları. Bu özelliğe örnek olarak da kullanıcı ekrana yanlış giriş yaptığında bu yanlış giriş ile ilgili detaylar ilgili kural tanımında olmalı ve log tablosu buna göre güncellenmelidir [31].

Log bilgileri üç temel türde sınıflanmaktadır. Transaction Log temel olarak veritabanı ile ilgili işlemlerin detaylarını tutar. Event Log ise Windows sistemlerindeki log bilgilerini içerir. Hesap kitlenmesi, uygulama hatası gibi bilgileri taşır. Syslog ise günlük protokol anlamı taşımaktadır, uygulama yönlendiricisi, güvenlik duvarı gibi pek çok uygulamanın bilgisini tutar. Bu log tipi içerisinde hangi log bilgisi olduğu ve önem derecesi yer almaktadır [32].

3.2. Yazılım Uygulamaları Kestirimci Bakım Uygulamaları

Yazılım uygulamaları için kestirimci bakım süreçleri aslında hem ürün kullanımındaki aksaklıkların önceden önlenmesi hem de müşteriye kesintisiz bir deneyim

sağlamak için büyük önem taşımaktadır. Uygulama kesintiye uğramadan, hata vermeden sorunların önceden tahmin edilmesi ve uygulamanın sorunsuz olarak çalışmaya devam etmesi özellikle kritik uygulamalar için gün geçtikçe bir zorunluluk haline gelmiştir [29].

Yapılan bu önleyici faaliyetler bazı faydalar sağlar.

- Ekipmanın bakımının yapıldığı sürenin en aza indirilmesi
- Bakım nedeniyle kaybedilen üretim saatlerinin en aza indirilmesi
- Müşterilere kesintisiz bir hizmet sağlandığı için memnuniyet artışı

Ancak bu maliyet tasarruflarının bir bedeli vardır. Bazı durum izleme teknikleri pahalıdır ve veri analizinin etkili olması için uzman ve deneyimli personel gerektirir. Önleyici bakıma kıyasla, kestirimci bakım, bakım gerektiren bir ekipmanın yalnızca yakın arızadan hemen önce kapatılmasını sağlar. Bu, ekipmanın bakımına harcanan toplam süreyi ve maliyeti azaltır. Önleyici bakıma kıyasla, kestirimci bakım için gereken durum izleme ekipmanının maliyeti genellikle yüksektir. Durum izleme verilerini doğru bir şekilde yorumlamak için gereken beceri seviyesi ve deneyim de yüksektir. Bunlar bir araya geldiğinde, durum izlemenin yüksek bir ön maliyete sahip olduğu anlamına gelebilir. Bazı şirketler, bir durum izleme programının ön maliyetlerini en aza indirmek için durum izleme yüklenicileriyle çalışır. Kestirimci bakım, bir varlık üzerinde çalışmak için en iyi zamanı belirlemeye çalışır, böylece bakım sıklığı mümkün olduğu kadar düşüktür ve güvenilirlik, gereksiz maliyetler olmadan mümkün olduğunca yüksek olur.

Öngörücü bakımın bazı dezavantajları olsa da (yüksek başlangıç maliyetleri, özel becerilere duyulan ihtiyaç, bazı ekipmanların sınırlamaları), bakımın yalnızca gerektiğinde yapılmasına izin vererek, tesislerin maliyetleri düşürmesine, zamandan tasarruf etmesine ve kaynakları en üst düzeye çıkarmasına yardımcı olur. Kestirimci bakımın belirli varlıklar için en iyisi olup olmadığına karar vermeden önce ekipman üreticileri ve durum izleme uzmanları ile istişare yapılmalıdır. Log uygulamalarının doğru kurgulanması, kurallar ve mesaj içeriklerinin etkinliği, log verilerine bağlı olarak hazırlanan dashboard çalışmaları uygulamanın yaşadığı sorunları etkili bir biçimde gösterebilir.

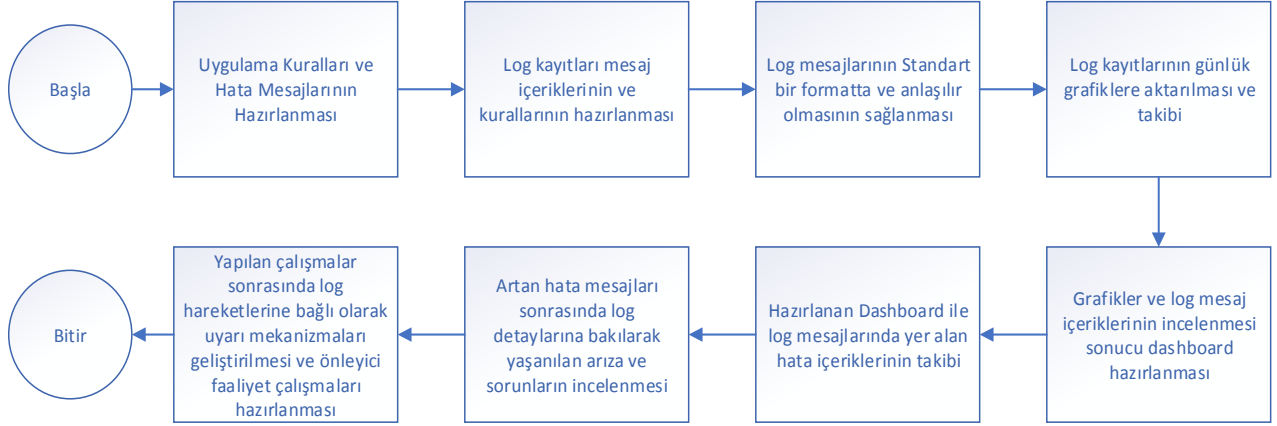
3.3. Log Yönetimi Çalışması ve Dashboard Uygulaması

Araştırmaya konu olan kestirimci bakım faaliyetleri için elasticsearch diye bilinen günlük (log) dosya kayıt sistemi uygulaması ve Kibana olarak bilinen gösterge paneli uygulaması kullanılmıştır. Yapılan çalışma adımları Şekil 1 de akış halinde gösterilmiştir.

Araştırmaya konu olan çalışma ilk olarak uygulamanın tüm kritik adımlarının ve iş kurallarının tespit ve analizi

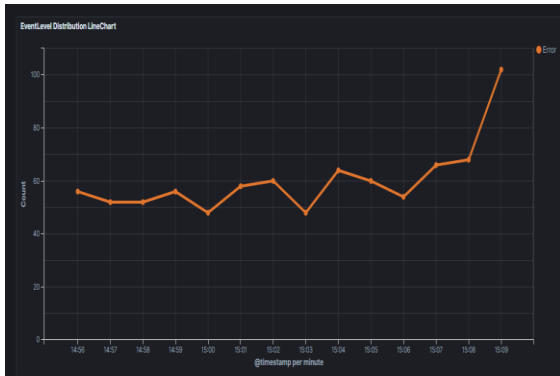
ile başlamıştır. Uygulamanın içerdiği tüm işlem adımları ve tüm kullanıcı seçimleri detaylı mesaj içerikleri ile elastic search üzerinde kayıt altına alınmıştır. Yapılan çalışmalarda kullanıcı bazlı hatalar ve ekranda verilmesi gereken hata mesajları detaylı olarak hazırlanmıştır. Beklenmedik hatalar ve kesintilerin mesajları da sistemdeki kesinti olabilecek noktaların log bilgileri baz alınarak adreslenmiştir.

Uygulama ekrandaki adımları ve işlem süreçleri detaylı olarak incelendikten sonra ham günlük dosya (log) datası oluşmaya başlamıştır. Günlük (Log) Dosya bilgileri yapılan indeklemeye ve pattern- gruplama çalışmaları sonrası birkaç parametreye indirilmiştir. Bu parametreler fatal-error-info-warn-trace olarak İngilizce isimlerle sınıflanmıştır. Elde edilen log bilgilerine göre grafikler hazırlanmıştır.



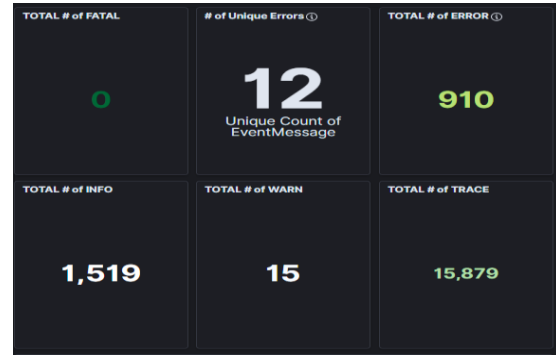
Şekil 1. Çalışma Boyunca İzlenen Adımlar

Uygulama hata Günlük Dosya (Log) kayıtları Şekil 2 de görüldüğü gibi günlük ve saatlik olarak takip edilmeye başlanmıştır. Burada saatlik log seviyesi 40'dan fazla olduğunda sistemde istenmeyen bir durum oluştuğu ve bunun kesintiye yol açabileceğine dair izlenimler ve önleyici kurullar geliştirilmiştir.



Şekil 2. Günlük-Saatlik Hata Günlük Dosya (Log) Takibi Grafiği

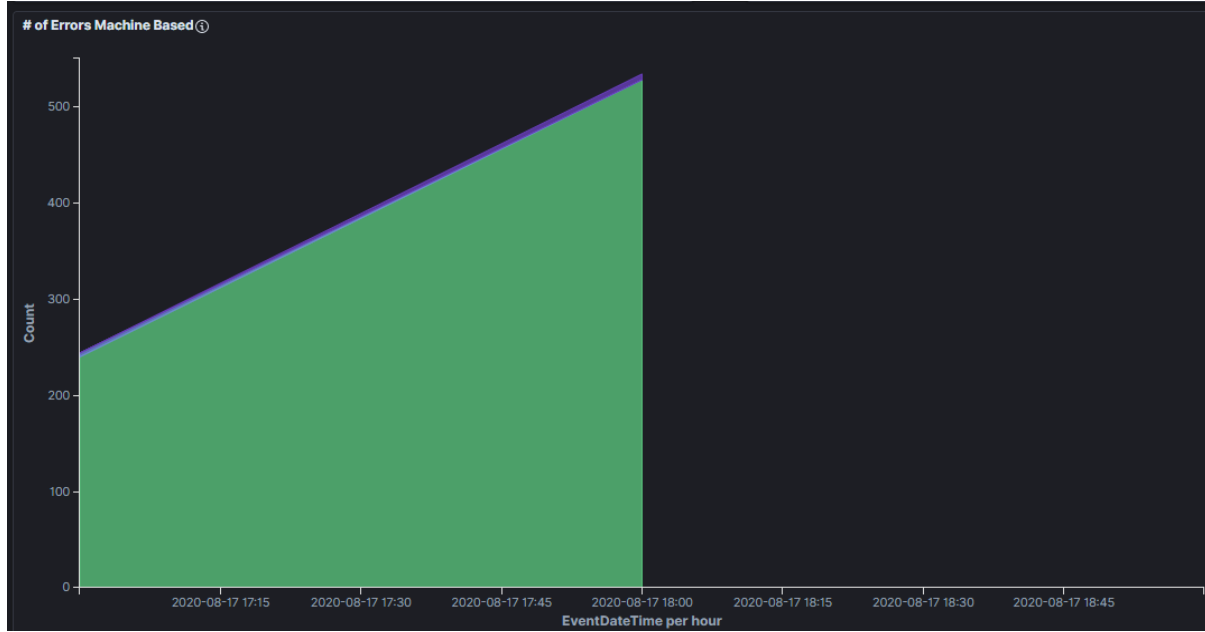
Gösterge Paneli için de kullanılması planlanan diğer metrik görseller de aslında log bilgilerinin takibi ve detaylı analizi sonrası kestirimci bakım faaliyetleri hazırlaması için etkili olmuştur. Log bilgilerinin kurallarını ve mesaj içerikleri oluştururken yaşanan kesinti ve arızaların daha kolay anlaşılabilir olması için sınıflandırmaya gidilmiştir. Şekil 3 de gözükten ekranda gösterge paneli yapısı içerisinde farklı tip log mesaj adetlerinin günlük veya saatlik dağılımları detaylı olarak takip edilmektedir. Burada yer alan her bir hata mesajı tipi belirlenen limitlerin altında seyir ettiğinde başarılı sonuçlar vermektedir.



Şekil 3. Günlük Dosya (Log) Tiplerinin Saatlik Takip Board Görüntüsü

Günlük Dosya (Log) hata mesajları içerisinde yer alan hata açıklamaları, hata alınan fonksiyon detayları ve zaman bilgisi ile sorunun çözümünde kullanılan server-makine bilgileri hızlı çözüm bulunması açısından büyük önem teşkil etmektedir. Şekil 4. sunucuların hata takibi ile ilgili grafiklerini içeren gösterge panelini içermektedir.

Günlük Dosya (Log) hata sayısı beklenmedik bir şekilde arttığında ancak sistemde yaşanan sorun henüz iş kesici bir noktaya gelmediğinde kestirimci bakım yaklaşımı ile gelen hata mesajları kümelendir. Bu kümeleme sonucunda benzer noktalarda benzer teknik hataların olduğu tespit edildiğinde çözümleme yapılan ve yeniden devreye alımı olan düzeltilmiş kodlama çalışmaları hata log adetlerinin 1000-2000 seviyelerinden çift haneli sayılara düşürdüğü görülmüştür.



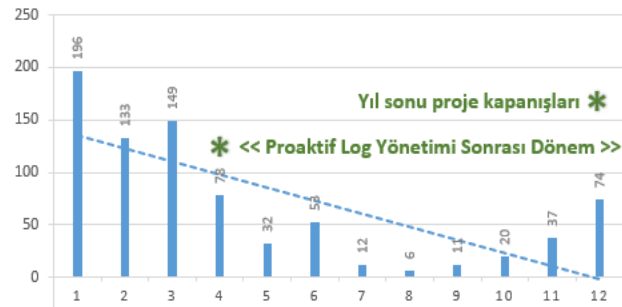
Şekil 4. Günlük Dosya (Log) Hata Adetlerinin Sunucu Makineleri Bazlı Saatlik Takibi Grafiği

Yapılan müdahale çalışmaları ve kestirimci bakım geliştirmeleri sonrasında öncelikli olarak yapılması gereken geliştirme ve devreye alım esnasında, beklenmedik bir başka sorun olmasına karşı kullanıcı ve müşterileri uyarılmaktadır. Bu uyarı sonrasında hem test ortamında hem de canlı ortamda ürün fonksiyonlarının başarılı bir şekilde devam ettiği detaylı olarak test ve kontrol edilmelidir. Şayet problem çözümü hatayı gidermediyse veya daha kötü bir duruma çevirdi ise hata çözümü geri alınıp daha detaylı bir inceleme başlatılması fayda sağlamaktadır. Tüm bunların üzerinde yapılan her düzenleme ve kod geliştirmesi mutlaka yazılı dokümanlar ile arşivlenmeli ve saklanmalıdır.

Uygulamaların kronik hata olarak nitelendirilen aslında veri tabanı veya kod üzerindeki yanlış tasarıma dayalı hataları çoğu zaman basit data güncelleme işlemleri ile kapatılmaktadır. Bu süreç mutlaka log grafikleri üzerinden takip edilip detaylı bir analiz sonrasında çözümlenmelidir. Kronik hata olarak görülen ve çözümü basit olduğu için geliştirme yönünde efor verilmeyen her bir hata ön görülemeyen bir başka hata mesajına neden olduğu yapılan çalışmada yoğun olarak görülmüştür.

Yazılım uygulamalarının çok büyük bir kısmı başka uygulamalar ve servisler ile entegrasyon içerisindedir. Bu uygulamalarının versiyon güncellemeleri, data akışları veya sistem kesintileri uygulamalarda teknik arıza ve kesintilere yol açmaktadır. Bu tip hatalar log hata mesajı içerisinde iyi bir şekilde belirtildiğinde kesinti nedeni hızlıca bulunup uygulamanın hasar görmesi engellenebilir. Hazırlanan grafik ve dashboard'lar kesinti ve entegrasyon kaynaklı hataların çözümünde çok etkili olduğu görülmüştür. Entegrasyon noktalarındaki kesintilerin iyileştirilmesi ve engellenmesi için kestirimci bakım uygulamalarının

tüm ürünlerin kendi özelinde uygulanması bir zorunluluktur. Teknik Mimari tasarım uygulamaların birbirine entegrasyonlarındaki sorunlar için sistem bütüncül bakış açısıyla değerlendirilmeli ve mutlaka yedekleme sistemleri ile acil durum kurguları oluşturulmalıdır.



Şekil 5. 2020 yılında proaktif log uygulaması sonrası azalan hata adetleri

Yapılan araştırma yaklaşık bir yıllık bir inceleme sonrasında yılın ilk aylarında alınan hata adetlerinin kestirimci bakım çalışmaları etkisi ile Şekil 5. de yer alan grafikte görüldüğü üzere hızla azaldığı tespit edilmiştir. Bu çalışma ile üç ay gibi kısa bir süre içerisinde binlerce kullanıcı olan bir yazılım uygulamasının hiç kesinti yaşamadan ve en az hata ile çalışır durumda olması sağlanmıştır. Bu grafikte görüldüğü üzere sistemin entegre olduğu diğer uygulamalardaki yeni devreye alımlar ve değişikliklerin yapılan çalışmalar sonrasında eskisinden çok daha az hataya yol açtığı görülmüştür. Grafikte görüldüğü üzere kısa bir sürede hata adetleri tek haneli sayılara düşmüştür. Mevcut hata adetlerindeki bu hızlı azalmanın sürdürülebilir olması uygulamanın sahip olduğu entegrasyonların aynı şekilde bakım görmesi ile sağlanabilir olacaktır.

IV. GELECEK ÖNGÖRÜLERİ VE SONUÇ BÖLÜMÜ

Yazılım süreçleri proje yönetim metodlarında kökeni üretim sistemlerinin kalite standartlarına ve yeni nesil yönetim uygulamalarına dayanan pek çok model kullanılmaktadır. Log yönetim sistemi etkin ve verimli kullanılması ve kestirimci bakım faaliyetlerinin artırılması, kesintisiz çalışan uygulamalara ulaşmak için önemli bir adımdır.

Araştırmaya konu olan yazılım uygulamasının bakım çalışmaları ve geliştirme faaliyetleri 6 kişiden oluşan bir Scrum ekibi ile yürütülmekte olup çalışma 2020 yılı içerisinde bu ekibinin düzenlediği gösterge paneli ve log yapısı takibi ile planlanan hata çözümlenmesi sonucunda başarıya ulaşmıştır. Bu ekibin çevik metodlar kullanarak süreci hızlı ve etkili takibi araştırmaya konu olan çalışmanın çok kısa sürede gerçekleşmesine etki etmiştir. Elde edilen sonuçlar ve grafik yönlendirmeleri sektörde ve akademide çalışan diğer araştırmacıların da faydalanabileceği ve etkili bir yönlendirme sağlamıştır. Literatürde yer alan değerlendirme ve anahtar kriter belirleme ile üretim sektöründe yer alan kestirimci bakım yaklaşımları detaylı olarak incelendikten sonra buradaki felsefe ve yaklaşım yazılım uygulamalarına aktarılmıştır. Makinelerden oluşan bir üretim hattı üzerinde yapılan tüm optimizasyon, kanban ve önleyici bakım faaliyetleri yaklaşımlarının aslında yazılım döngüleri ve süreçleri üzerine uyarlandığında fayda sağladığı görülmektedir.

Yapılan uygulama ve hazırlanan grafik ve dashboardlar literatür için özgün çalışmalar olup, ülkemizde çok az uygulanmakta olan yazılım uygulamalarında kestirimci bakım yaklaşımına da bir örnektir. Araştırmaya konu olan yazılım uygulamasına gelen bu yaklaşım ve değişim süreci, müşteri memnuniyeti artışına ve maliyet azalışına fayda sağlamıştır.

REFERANSLAR

- [1] Ötleş, S. (2019). "Endüstri için kestirimci bakım". *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 3 (1), 56-66.
Retrieved from <https://dergipark.org.tr/en/pub/ij3dptdi/issue/44951/519896>
- [2] Özseven, T., Düğenci, M. (2011). LOG Analiz: Erişim Kayıt Dosyaları Analiz Yazılımı ve GOP Üniversitesi Uygulaması. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 4 (2), .
Retrieved from <https://dergipark.org.tr/en/pub/gazibtd/issue/6622/87915>
- [3] Zeng, Y.E., Wen, H.J. and Yen, D.C. (2003), "Customer relationship management (CRM) in business- to- business (B2B) e-commerce", *Information Management & Computer Security*, Vol. 11 No. 1, pp. 39-44.
<https://doi.org/10.1108/09685220310463722>
- [4] Mukerjee, K. (2013), "Strategizing for CRM to leverage its benefits", *Business Strategy Series*, Vol. 14 No. 4, pp. 118-122.
<https://doi.org/10.1108/BSS-11-2011-0028>
- [5] Agrawal, S.R. and Mittal, D. (2019), "Constructive usage of WhatsApp in education sector for strengthening relations", *International Journal of Educational Management*, Vol. 33 No. 5, pp. 954-964.
<https://doi.org/10.1108/IJEM-07-2018-0205>
- [6] Roggeveen, A.L. and Beitelspacher, L. (2019), "Understanding and implementing CRM initiatives in international markets", *International Marketing Review*, Vol. 37 No. 4, pp. 735-746.
<https://doi.org/10.1108/IMR-04-2019-0121>
- [7] AlQershi, N.A., Mokhtar, S.S.M. and Abas, Z.B. (2020), "CRM dimensions and performance of SMEs in Yemen: the moderating role of human capital", *Journal of Intellectual Capital*, Vol. ahead-of-print No. ahead-of-print. <https://doi.org/10.1108/JIC-05-2020-0175>
- [8] Abekah-Nkrumah, G., Yaa Antwi, M., Braimah, S.M. and Ofori, C.G. (2020), "Customer relationship management and patient satisfaction and loyalty in selected hospitals in Ghana", *International Journal of Pharmaceutical and Healthcare Marketing*, Vol. ahead-of-print No. ahead-of-print. <https://doi.org/10.1108/IJPHM-09-2019-0064>
- [9] Chatterjee, S., Nguyen, B., Ghosh, S.K., Bhattacharjee, K.K. and Chaudhuri, S. (2020), "Adoption of artificial intelligence integrated CRM system: an empirical study of Indian organizations", *The Bottom Line*, Vol. 33 No. 4, pp. 359-375.
<https://doi.org/10.1108/BL-08-2020-0057>
- [10] Eng, T.-Y., Ozdemir, S., Gupta, S. and Kanungo, R.P. (2020), "International social entrepreneurship and social value creation in cause-related marketing through personal relationships and accountability", *International Marketing Review*, Vol. 37 No. 5, pp. 945-976.
<https://doi.org/10.1108/IMR-12-2018-0360>
- [11] Partouche, J., Vessal, S., Khelladi, I., Castellano, S. and Sakka, G. (2020), "Effects of cause-related marketing campaigns on consumer purchase behavior among French millennials: A regulatory focus approach", *International Marketing Review*, Vol. 37 No. 5, pp. 923-943.
<https://doi.org/10.1108/IMR-12-2018-0348>
- [12] Yan, J., Zheng, Y., Bao, J., Lu, C., Jiang, Y., Yang, Z. and Feng, C. (2020), "How to improve new product performance through

- customer relationship management and product development management: evidence from China", *Journal of Business & Industrial Marketing*, Vol. 36 No. 1, pp. 31-47. <https://doi.org/10.1108/JBIM-05-2019-0190>
- [13] Barney, J. (1991), "Firm resources and sustained competitive advantage", *Journal of management*, Vol. 17 No. 1, pp. 99-120.
- [14] Bititci, U.S., Carrie, A.S. and McDevitt, L. (1997), "Integrated performance measurement systems: a development guide", *International Journal of Operations and Production Management*, Vol. 17 No. 5, pp. 522-534.
- [15] Azapagic, A. and Perdan, S. (2000), "Indicators of sustainable development for industry: a general framework", *Process Safety and Environmental Protection*, Vol. 78 No. 4, pp. 243-261.
- [16] Braz, R.G.F., Scavarda, L.F. and Martins, R.A. (2011), "Reviewing and improving performance measurement systems: an action research", *International Journal of Production Economics*, Vol. 133 No. 2, pp. 751-760.
- [17] Bocken, N., Morgan, D. and Evans, S. (2013), "Understanding environmental performance variation in manufacturing companies", *International Journal of Productivity and Performance Management*, Vol. 62 No. 8, pp. 856-870.
- [18] Bengtsson, M. and Salonen, A. (2016), "Requirements and needs – a foundation for reducing maintenance-related waste", in Koskinen K. et al. (Eds) *Proceedings of the 10th World Congress on Engineering Asset Management (WCEAM 2015)*, Springer, Cham, pp. 105-112.
- [19] Bokrantz, J., Skoogh, A., Berlin, C. and Stahre, J. (2017), "Maintenance in digitalised manufacturing: Delphi-based scenarios for 2030", *International Journal of Production Economics*, Vol. 191, pp. 154-169.
- [20] Ante, G., Facchini, F., Mossa, G. and Digiesi, S. (2018), "Developing a key performance indicators tree for lean and smart production systems", *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 51 No. 11, pp. 13-18.
- [21] Campbell, J.D. (1995), *Uptime: Strategies for Excellence in Maintenance Management*, Productivity Press, New York, NY.
- [22] Ehrenfeld, J.R. (2009), "Understanding of complexity expands the reach of industrial ecology", *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 13 No. 2, pp. 165-167.
- [23] Campbell, J.L., Quincy, C., Osserman, J. and Pedersen, O.K. (2013), "Coding in-depth semi structured interviews: problems of unitization and intercoder reliability and agreement", *Sociological Methods and Research*, Vol. 42 No. 3, pp. 294-320.
- [24] Fangucci, A., Galante, G.M., Inghilleri, R. and La Fata, C.M. (2017), "Structured methodology for selection of maintenance key performance indicators: application to an oil refinery plant", *International Journal of Operations and Quantitative Management*, Vol. 23 No. 2, pp. 89-113.
- [25] Brundage, M.P., Morris, K.C., Sexton, T., Moccozet, S. and Hoffman, M. (2018). "Developing maintenance key performance indicators from maintenance work order data", Paper Presented at the ASME 2018 *13th International Manufacturing Science and Engineering Conference*, MSEC.
- [26] Dalenogare, L.S., Benitez, G.B., Ayala, N.F. and Frank, A.G. (2018), "The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance", *International Journal of Production Economics*, Vol. 204, pp. 383-394.
- [27] Vaarandi R, Blumbergs B., Kont M. (2018), An unsupervised framework for detecting anomalous messages from syslog log files, *IEEE Xplore* 1–6.
- [28] Vaarandi R. (2003), A data clustering algorithm for mining patterns from event logs, *IEEE Xplore* 119–126.
- [29] Vaarandi R., M. Kont, Pihelgas M., (2016) Event log analysis with the LogCluster tool, *IEEE Xplore* 982–987.
- [30] Vaarandi R., Zhuge C. (2017), Efficient Event Log Mining with LogClusterC, *IEEE Xplore* 261–266
- [31] Kang, N., Zhao, C., Li, J. and Horst, J.A. (2016), "A Hierarchical structure of key performance indicators for operation management and continuous improvement in production systems", *International Journal of Production Research*, Vol. 54 No. 21, pp. 6333-6350.
- [32] Kans, M., Galar, D. and Thaduri, A. (2016), "Maintenance 4.0 in railway transportation industry", in Koskinen K. et al. (Eds), *Proceedings of the 10th World Congress on Engineering Asset Management (WCEAM 2015)*, Springer, Cham, pp. 317-331.
- [33] Kennerley, M. and Neely, A. (2003), "Measuring performance in a changing business environment", *International Journal of Operations and Production Management*, Vol. 23 No. 2, pp. 213-229.
- [34] Hamooni, B. Debnath, J. Xu, H. Zhang, G. Jiang, A. Mueen, LogMine: fast pattern recognition for log analytics, *Assoc. Comput. Mach.* (2016) 1573–1582.
- [35] Ketokivi, M. (2016), "Point-counterpoint: resource heterogeneity, performance, and competitive advantage", *Journal of Operations Management*, Vol. 41 No. 1, pp. 75-76.
- Krippendorff, K. (2004), *Content Analysis: An*

- Introduction to its Methodology, Sage Publications, Thousand Oaks.
- [36] Schneiderman, A. (1999), "Why balanced scorecards fail", *Journal of Strategic Performance Measurement*, Vol. 2 No. 11, pp. 6-11.
- [37] Pintelon, L. and Van Puyvelde, F. (1997), "Maintenance performance reporting systems: some experiences", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 3 No. 1, pp. 4-15.
- [38] Veleva, V. and Ellenbecker, M. (2001), "Indicators of sustainable production: framework and methodology", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 9 No. 6, pp. 519-549.
- [39] Rouse, P. and Putterill, L. (2003), "An integral framework for performance measurement", *Management Decision*, Vol. 41 No. 8, pp. 791-805.
- [40] Tangen, S. (2004), "Performance measurement: from philosophy to practice", *International Journal of Productivity and Performance Management*, Vol. 53 No. 8, pp. 726-737.
- [41] Wireman, T. (2005), *Developing Performance Indicators for Managing Maintenance*, Industrial Press, New York, NY. Xu, L.D., Xu, E.L. and Li, L. (2018), "Industry 4.0: state of the art and future trends", *International Journal of Production Research*, Vol. 56 No. 8, pp. 2941-2962.
- [42] Winroth, M., Almström, P. and Andersson, C. (2016), "Sustainable production indicators at factory level", *Journal of Manufacturing Technology Management*, Vol. 27 No. 6, pp. 842-873.
- [43] Stefanovic, M., Nestic, S., Djordjevic, A., Djurovic, D., Macuzic, I., Tadic, D. and Gacic, M. (2017), "An assessment of maintenance performance indicators using the fuzzy sets approach and genetic algorithms", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B, Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 231 No. 1, pp. 15-27, available at: <https://doi.org/10.1177/0954405415572641>.
- [44] Tirabeni, L., De Bernardi, P., Forliano, C. and Franco, M. (2019), "How can organisations and business models lead to a more sustainable society? A framework from a systematic review of the industry 4.0", *Sustainability*, Vol. 11 No. 22, p. 6363.
- [45] Wijesinghe, D. and Mallawarachchi, H. (2019), "A systematic approach for maintenance performance measurement: apparel industry in Sri Lanka", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 25 No. 1, pp. 41-53.
- [46] Lewis, M.W. and Steinberg, L. (2001), "Maintenance of mobile mine equipment in the information age", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 7 No. 4, pp. 264-274. <https://doi.org/10.1108/13552510110407050>
- [47] Misra, S.C. and Bhavsar, V.C. (2005), "Object-oriented software development antecedents that influence product bug density: Lessons for quality managers", *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 22 No. 2, pp. 162-182. <https://doi.org/10.1108/02656710510577224>
- [48] Sharma, R.K., Kumar, D. and Kumar, P. (2006), "Manufacturing excellence through TPM implementation: a practical analysis", *Industrial Management & Data Systems*, Vol. 106 No. 2, pp. 256-280. <https://doi.org/10.1108/02635570610649899>
- [49] Gebauer, H., Pütz, F., Fischer, T., Wang, C. and Lin, J. (2008), "Exploring maintenance strategies in Chinese product manufacturing companies", *Management Research News*, Vol. 31 No. 12, pp. 941-950. <https://doi.org/10.1108/01409170810920648>
- [50] Nadakatti, M., Ramachandra, A. and Santosh Kumar, A.N. (2008), "Artificial intelligence-based condition monitoring for plant maintenance", *Assembly Automation*, Vol. 28 No. 2, pp. 143-150. <https://doi.org/10.1108/01445150810863725>
- [51] Zaim, S., Turkyilmaz, A., Acar, M.F., Al-Turki, U. and Demirel, O.F. (2012), "Maintenance strategy selection using AHP and ANP algorithms: a case study", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 18 No. 1, pp. 16-29. <https://doi.org/10.1108/13552511211226166>
- [52] Rocha, P. and Rodrigues, R.C. (2017), "Bibliometric review of improvements in building maintenance", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 23 No. 4, pp. 437-456. <https://doi.org/10.1108/JQME-07-2016-0030>
- [53] Antomarioni, S., Bevilacqua, M., Potena, D. and Diamantini, C. (2019), "Defining a data-driven maintenance policy: an application to an oil refinery plant", *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 36 No. 1, pp. 77-97. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-01-2018-0012>
- [54] Kumar, P. (2020), "Internal flexibility in health-care organizations: a value-laden perspective on sustainability", *International Journal of Organizational Analysis*, Vol. ahead-of-print No. ahead-of-print. <https://doi.org/10.1108/IJOA-05-2019-1766>

Seçilmiş Bir Termik Santralde ESF Uygulamaları ve Verim Artırıcı Yöntemlerin Araştırılması

ESF Applications and Investigation of Efficiency Increasing Methods in a Selected Thermal Power Plant

Baran Kurt¹ , Hüseyin Özdemir^{1*} , Halil N. Oruç² , Göksel Demir³ 

¹Bahçeşehir Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34353, İstanbul, Türkiye

²Gebze Teknik Üniversitesi, Yer ve Deniz Bilimleri Enstitüsü, Gebze, 41400, Kocaeli, Türkiye

³Hamidiye Sağlık Bilimleri Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, İş Sağlığı ve Güvenliği Bölümü, 34668, İstanbul, Türkiye

Öz

Günümüzde hava kirliliği, insanlığın en büyük sağlık tehdidi haline gelmiştir. Endüstri kaynaklı ve özellikle fosil yakıtla çalışan enerji santralleri atmosfere önemli miktarda emisyon salınımı yapmaktadır. Birey başına düşen enerji tüketim miktarının artması da ortaya çıkan hava kirliliğinin artmasına sebep olmaktadır. Yakıt olarak kömür kullanan enerji santrallerinin atmosfere yaydığı kirlilikte en büyük paya sahip kirleticilerden biri partikül maddelerdir. Termik santrallerde işlem sırasında oluşan partikül kirleticiler, emisyon kontrol teknolojilerinden biri olan elektrostatik filtreler (ESF) vasıtasıyla atmosfere yayılımı en aza indirilmektedir. Bu çalışmada, ESF verimliliğini arttırmak için işletme parametrelerinde değişiklikler yapılarak filtrelerin partikül tutma verimleri incelenmiştir. Farklı kül değerlerine ve elementel analiz sonuçlarına sahip 3 kömür çeşidinin ESF verimliliğine etkisi gözlemlenmiştir. ESF performansını etkileyebilecek ESF gaz giriş sıcaklığı değerleri kullanılarak senaryolar oluşturulmuş ve bunların etkisine bakılmıştır. ESF'ye giriş yapan atık gaz konsantrasyonuna direkt olarak etki eden farklı hava ön ısıtıcı kaçak oranları için toz emisyon değerleri hesaplanmıştır. Bununla birlikte, ESF sistemi içerisindeki süreçlerde oluşabilecek problemleri gözlemlemek ve elektrik tasarrufu sağlamak amacı ile elektriksel alanların bazı bölümleri devre dışı bırakılmıştır. Bu çalışmanın sonucunda, farklı senaryolarda ortaya çıkan partikül emisyon değerleri analiz edilmiş ve senaryolardaki değişkenlerin ESF verimine etkisi değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hava Kirliliği, Elektrostatik Filtre, Partikül Madde, Termik Santral.

Abstract

Today, air pollution has become the biggest health threat of humanity. Industrial sources, especially fossil fuel-fired power plants, emit a significant amount of emissions into the atmosphere. The increase in the amount of energy consumption per individual causes the resulting air pollution to increase. Particulate pollutants are one of the pollutants that have the largest share in the pollution emitted by the power plants that are using coal as fuel. Particulate pollutants generated during the production in thermal power plants are minimized by the electrostatic filters (ESF), which are one of the emission control technologies. In this study, the particle collection efficiency of filters was investigated by making changes in operational parameters to improve ESF efficiency. The effect on ESF efficiency was observed by using three different coals having different ash values and elemental analysis. Scenarios were created by using volatile gas temperature values that could affect ESF performance and their impact was examined. Dust emission values were calculated for different air preheater leakage rates, which directly affect volatile gas concentration. However, in order to observe the problems that may occur in the processes within the ESF system and to save electricity, some parts of the electrical fields have been turned off. As a result of this study, particle emission values in different scenarios were analyzed and the effect of the variables in the scenarios on ESF efficiency was evaluated.

Keywords: Air Pollution, Electrostatic Filter, Particulate Matter, Thermal Power Plant.

I. GİRİŞ

Dünyada nüfusun hızla arttığı son yüz yılda, çevre kirliliği büyüyen toplumsal sorunlardan biri haline gelmiştir. Birey başına düşen enerji tüketim miktarının artması hem hava kirliliğine hem de iklim değişikliğine sebep olmaktadır. Sanayide ise özellikle fosil yakıtların kullanıldığı endüstriyel tesislerin sağlaması gereken kirletici sınır değerleri aşağı çekilmektedir. Bu tesisler arasında en önemli kirletici yüküne sahip olanlardan biri, fosil yakıt kullanan enerji santralleridir. Hava kirliliğinin sağlık üzerindeki etkileri üzerine yapılan birçok çalışma sonucunda, akciğer kanseri, romatizma, nefes darlığı, bronşit, kalp hastalıkları ve kan zehirlenmesi gibi birçok negatif etki gözlemlenmiştir [1]. 2018 yılında yayınlanmış olan “Key World Energy Agency” sonuçlarına göre, birincil enerji kaynağı olarak kömür %29, doğalgaz %21, nükleer %5, petrol %31 oranında pay alırken hidroelektrik %2, biyoyakıt ve atıklar %10, rüzgâr, güneş, jeotermal gibi yenilenebilir enerji kaynakları %1’ini oluşturmaktadır [2]. 2005 yılında dünyadaki enerji tesisleri kaynaklarının %41’ini oluşturan kömürün oranı 2030 yılında %46

seviyesine çıkması tahmin edilmektedir. Bunun en önemli nedenlerinden biri, birçok ülkenin kömür kaynağı bakımından zengin olması ve petrol ile doğalgaz gibi alternatif kaynakların yüksek fiyata sahip olmasıdır [3].

Partikül maddenin (PM) toplanması için kullanılan kontrol teknolojilerinden biri olan elektrostatik filtreler (ESF) farklı sıcaklık, basınç ve toz kütlesi gibi parametreler için etkili bir yöntemdir. ESF'ler, farklı boyutlardaki partikülleri yüksek oranda tutma kapasitesine sahip kontrol sistemlerinden biridir. Prosesten çıkan emisyonun akış yönü içerisindeki toz elektriksel alan üretilerek toplanır. Filtreye ulaşan partikül kirleticiler, elektrik ile yüklenerek gaz iyonlarının akış içerisinde olduğu koronadan geçer. Korona tarafından yüklenen serbest elektronlar, negatif yüklü elektrik alanına doğru hızlanarak yönelir. Deşarj elektrotundan uzaklaştıkça hızlanmaya devam eder ve böylece gaz moleküllerine çarpmalarına sebep olur. Gaz molekülleri bu çarpma ile birlikte elektronlarını kaybeder ve pozitif yüklü iyonlara dönüşür. Deşarj elektrotu çevresinde sürekli tekrarlanan bu durum bir döngü şeklinde daha fazla serbest elektron ve pozitif yüklü iyon oluşmasına neden olur. Deşarj elektrotları çevresindeki kuvvetli elektriksel alandan ayrılan elektronlar yavaşlar. Ara elektrot alanı olarak bilinen bu kısımda, deşarj elektrotları aracılığıyla itilen elektronların yanında gaz molekülleri de bulunur. Elektronlar ile baştaki alanda olan çarpışmanın benzeri yerine, onları yakalayarak negatif yüklenmesine ve sonrasında negatif yüklü iyonlar oluşmasına neden olur. Oluşan negatif yüklü iyonlarda kuvvetli elektriksel alandan ayrılmaya yönelir. Partikül kirleticilerin toplanmasından önce negatif yük ile yüklenmeleri gerekir, bu nedenle negatif iyonlar partiküllerin toplanmasında önemli bir role sahiptir. Toplama elektrotu üstünde belirli kalınlığa gelen toz birikiminin çeşitli uygulamalarla plakalardan giderimi sağlanır [4].

Varonos [5] tarafından yapılan araştırmada elektrostatik filtre verimliliğini hesaplamak için tam boyuttaki santral modeli ele alınmış ve hesaplamalar Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS) türbülans modeli kullanılarak yapılmıştır. Bu çalışmada, gaz girişinin toplama verimliliği üzerindeki etkisinin en aza indirgenmesi amaçlanmıştır. Adamiak [6] yaptığı çalışmada, ESF içindeki elektriksel alan Poisson denklemleri ile her tür geometri için yüksek doğrulukta çözülmüştür. Kullanılan bu modellerde; Wangn et al. [7], Khare et al. [8] ve Yamamoto et al. [9] çalışmalarına paralel şekilde diferansiyel denklemleri çözmekte ve elektriksel alanlarla ilgili benzer kabuller yapılmıştır. Nikas et al. [10] tarafından yapılan çalışmada toplama mekanizması ve elektrostatik filtre içindeki süreçler üzerinde durulmuştur. Elektrostatik güç etkisi ve gaz fazları incelenerek toplama plakaları arasındaki homojen akışın toplama verimliliğinin artmasına sebep olduğu görülmüştür. Shah et al. [11]

elektrostatik filtre deneyini çalışan bir santraldan alınan verilerle karşılaştırmış ve üç boyutlu ESF modellemesi yapmıştır. Jedrusik et al. [12] yapmış olduğu çalışmada bunlara benzerdir, ancak burada küçük boyutlu filtreler ile endüstriyel alanda yer alan ESF'ler arasındaki farklardan dolayı zayıf noktaları bulunmaktadır.

Bu çalışmada, ithal kömür ile çalışan iki adet yakma kazanı ile elektrik üretilen 615 MW güç kapasitesine sahip 2 üniteden meydana gelen bir termik santral seçilmiştir. Bu santralde, farklı kömür özellikleri, giriş sıcaklığı ve hava ön ısıtıcı sızıntı oranlarının partikül emisyonu üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bulgular kısmında yapılan senaryo çıktıları verilerle değerlendirilmiştir. Ayrıca, partikül emisyon değerleri ulusal ve uluslararası yönetmeliklerde belirlenen sınır değerlere uygunluğu incelenmiştir.

II. MATERYAL ve METOT

2.1. Operasyonel Sabitler

Bu çalışma kapsamında incelenmiş olan kömür santrali, toplamda 615 MW üretim kapasitesine sahip olan 2 simetrik üniteden oluşmaktadır. Bu makale kapsamında, tüketilen yakıt miktarını doğrudan, oluşan toz seviyelerini de dolaylı olarak etkileyen faktörlerin en önemlisi olan santral verimliliği hesaplanmıştır. Benzer özelliklere sahip bir başka santral için verimlilik hesabı türbinden elde edilen mekanik güçten besleme suyu pompalarının güçlerinin çıkarılması ve elde edilen değerinin santrale giren yakıt girişinin ortama kazandırdığı enerjiye bölünmesi ile bulunmuştur [13]. Bu makalede kullanılan farklı tür kömürlerin özellikleri (Tablo 3), Çınar ve Çakır [13] çalışmasındaki santral de kullanılan kömür özelliklerine (Tablo 1) benzediğinden dolayı hesaplanan santral verimlilik değeri %40 olarak tüm senaryolar da sabit olarak kabul edilmiştir.

Tablo 1. Seçilen Referans kömür elementel analiz sonuçları (Çınar ve Çakır, 2015).

Elementel Analiz	Birim	Referans Kömür
C		66,06
H		3,66
O		4,16
N		1,5
S	%	0,9
Toplam Nem		10
Kül		13,72
Alt Isıl Değer	MJ/kg	25,79

Bağıl nem oranı için 2015 yılı incelenerek, ortalama değer olarak %75 kullanılmıştır. Sıcaklık için 1950 ile 2015 yılları arasında aylık ortalama hesaplanarak, santral içi ortam sıcaklığı 13,6 °C olarak kabul edilmiştir. Oluşturulan senaryo analizleri için sabit

olarak kullanılan teknik veriler Tablo 2' de gösterilmiştir.

Tablo 2. Santralin her senaryo için sabit tutulan teknik verileri

Santral verimliliği	%40
Elektriksel güç	615MW
Yanmamış karbon oranı	%0,5
Havanın bağıl (izafi) nemi	%75
Ortam sıcaklığı	13,6 °C

2.2. Operasyonel Değişkenler

Oluşturulan senaryolar da ilk olarak, kömür santrallerinde kullanılan ithal kömürler için 3 farklı alternatif seçilerek, kül analiz sonuçları incelenmiştir. İthal kömür santrallerinde yakıt tedariki problemi sebep olabileceği sorunlar göz önüne alındığında ve ithal kömür fiyatlarının artış göstermesi durumunda alternatif yakıtların santral verimliliğinde oluşturabileceği etkiler incelenmiştir. (Tablo 3).

Tablo 3. Kullanılan 3 farklı kömürün elementel analiz bilgileri (%) ve yanma alt ısıl değerleri (MJ/kg)

Elementel Analiz	Birim	Kömür-1	Kömür-2	Kömür-3
Karbon (C)		64,07	66,32	71,97
Hidrojen (H)		4,5	3,58	4,5
Kükürt (S)		0,64	0,49	0,9
Azot (N)	%	1,1	1,56	1,52
Oksijen (O)		8,1	5,53	5,47
Tungsten (W)		11	8,2	8,93
Alt Isıl Değeri		24,987	24,911	28,625

Tercih edilen her kömür çeşidine göre değişiklik gösteren kül elementel sonuçları özellikle toz özgül direnci üzerinde yüksek oranda etkiye sahiptir. Diğer operasyonel koşullardan biri olan ESF'ye giriş yapan atık gaz sıcaklık değerinin de toz özgül direnci, alkali metal konsantrasyonu ve ESF toplama verimliliği üzerinde yüksek oranda etkisi vardır [14]. Seçilen alternatif kömürler için X-Işını Floresans Spektrometresi (XRF) cihazı ile yapılan uçucu kül analiz sonuçları yüzdeler olarak Tablo 4'de gösterilmiştir.

Operasyonel değişiklik olarak incelenen diğer bir senaryo hava ön ısıtıcı kaçak değeri hem ESF performansı hem de santral performans verimliliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu çalışmada, %10 hava kaçağı oranı iyimser, %15 hava kaçağı oranı baz senaryo ve santrallerde nadir olarak karşılaşılan %25 hava ön ısıtıcı kaçak oranı kötümser senaryo için kullanılmıştır.

Ek olarak, ESF mekanizmasında meydana gelebilecek herhangi bir arıza durumunda elektriksel alanın devre dışı kalması göz önüne alınarak ek senaryolar eklenmiş ve ulusal ve uluslararası yönetmeliklerdeki sınır değerler göz önüne alınarak sonuçlar değerlendirilmiştir.

Tablo 4. Termik santralde yakılan farklı kömür tiplerine ait kül analizi sonuçları (%)

Kül Analizi	Kömür-1	Kömür-2	Kömür-3
Li ₂ O	0	0	0
Na ₂ O	0,56	0,13	1,3
K ₂ O	2,07	0,5	2,9
MgO	2,01	1,86	2,1
CaO	2,17	8,64	3,7
Fe ₂ O ₃	8,56	3,57	9,8
Al ₂ O ₃	21,22	30,97	27,9
SiO ₂	59,9	48,77	47,2
TiO ₂	1,01	1,62	1,2
P ₂ O ₅	0,2	1,76	1,4
SO ₃	2,07	2,64	2,3
CaSO ₄	0	0	0
CaO	0	0	0

2.3. Metodoloji ve Hesaplamalar

Seçilen santral için sabit tutulan teknik bilgiler ve kömür özellikleri ışığında yakıt girdi miktarı [1];

$$m = \frac{(P/LHV)}{1 - \frac{UC}{100}} * 100/n \quad (1)$$

ile hesaplanmaktadır. Burada m; Yakıt kullanım miktarını (kg/saniye), P; Santralin gücünü (MW), LHV; kullanılan yakıtın alt ısıl değerini (MJ/kg), UC; Yanmamış karbon oranını (0-100 arasında değişmektedir.) ve n; santralin verimliliğini ifade etmektedir. ESF verimliliğini etkileyen maddeler hesaplanarak baca gazı toz konsantrasyonu; hacimsel akış miktarı, gaz analizi, toz içeriği, ham gaz içeriği ve gerekli baca gazı toz içeriği, özgül toz direnci, ESF boyutlandırılması kullanılarak hesaplanabilir.

Toz direnci, ESF'lerin etkin bir şekilde çalışması ve boyutlandırılması için en önemli etkidir. Yüksek bir dirence sahip bir toz, toplama elektrotları çevresinde yüksek bir elektriksel alan oluşturur. Bu nedenden dolayı, ortamdaki negatif yükler pozitif yükler tarafından nötralize edilerek ters kutuplarda aşırı yüklenmeye sebep olur ve ESF performansını olumsuz etkiler. Bu nötralize olmuş toz parçacıkları elektrostatik toplama alanı içerisinde tutulamazlar.

ESF'ye giriş yapan atık gaz direnci, tercih edilen kömür ve külün yapısından etkilendiği gibi santraldeki kazan işleminden sonra ortamın özelliklerinde de etkilenebilir. Bu durum, gazın sıcaklık ve nem değerini de ön plana çıkarmaktadır. Bu durumu da gözlemlemek

amacı ile farklı gaz sıcaklıklarının da ESF performansı üzerinde etkileri incelenmiştir. Önceki çalışmalar da ESF'ye giriş yapan atık gaz direnci hesaplamak için hacimsel, yüzeyel ve absorbe asit direnci için korelasyonlar önerilmiştir.

Temiz gaz konsantrasyonunu bulabilme amacıyla takip edilen mevcut ESF uygulamaları ile karşılaştırma metodunu kapsamında referans filtrenin gaz sıcaklığı, nem, gaz akış hacmi, giriş toz konsantrasyonu, geometrisi, ayırma verimliliği, özgül toz direnci verileri elde edilmektedir. Bu bilgiler ışığında, özgül toplama alanı, plakaya hareket hızı (wD), ortalama gaz hızı ve zaman bilgileri elde edilmektedir (Adım-0). Mevcut ESF için bilinen hacimsel gaz akışı ve toplama alanı verilerinin yanında ham gaz ve baca gazı toz konsantrasyonu verileri kullanılarak plakaya hareket hız değeri bulunmaktadır [15]. Bu hesaplamalar, plaka alanının "A", atık gaz debisinin de "Q" olarak yer aldığı aşağıda verilen [2], [3] ve [4] numaralı denklemler ile yapılmaktadır (Adım-1).

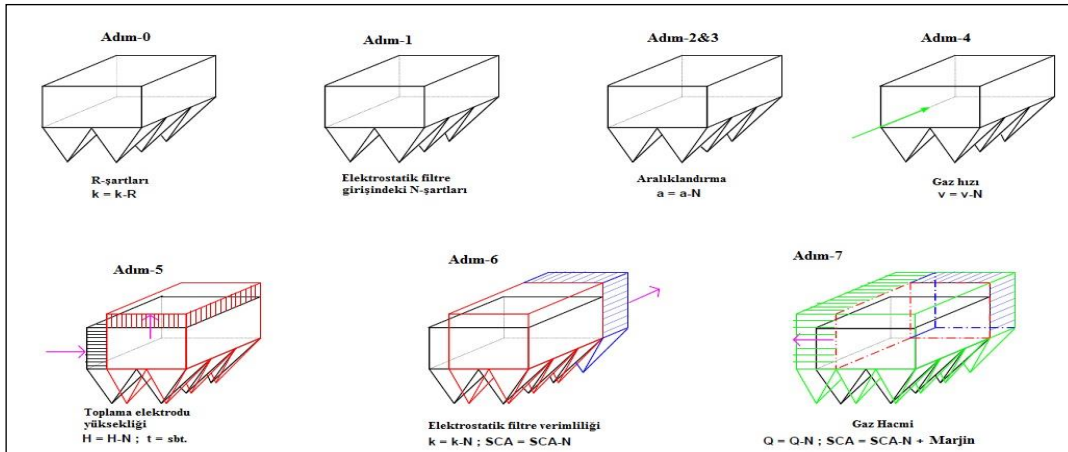
$$c_{rein} = c_{roh} \cdot e^{-w_{th} \frac{A}{Q}} \quad (2)$$

$$\eta(d_p) = 1 - e^{-w_{th} \frac{A}{Q}} \quad (3)$$

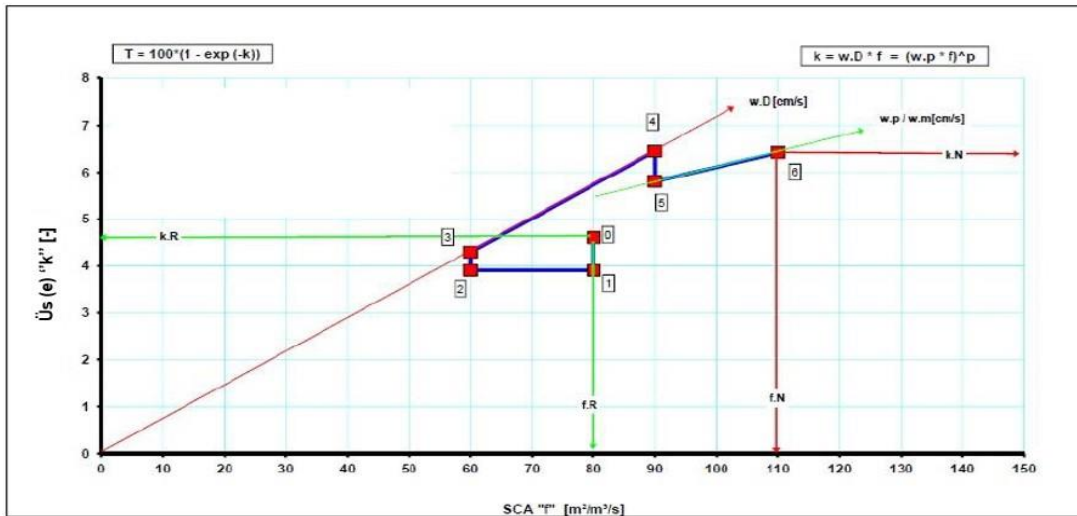
$$c_{rein} = c_{roh} \cdot e^{-(w_{th} \frac{A}{Q})^k} \quad (4)$$

Plakaya hareket hız parametresi incelenen santralde kullanılan ESF'ler içinde aynı olduğundan dolayı 1 olarak kabul edilmiştir (Şekil 1; Adım 2&3). 4, 5 ve 6. Adım incelenen ESF geometrisi ve toz akım alanları için kontrol amacı ile kullanılmıştır. Son adımda, mevcut ESF ile dizaynı planlanan ESF kıyaslaması yapılması için akış adaptasyonu yapılmaktadır.

ESF boyutlandırılmalarında kullanılan k üssü özgül toplama alanının (SCA) bir fonksiyonudur. Deutsch plakaya hareket hız (wD) veya adapte edilen plakaya hareket hızı (w.p) ile ifade edilir. Ayırma verimliliği olan T, bu k değerine bağlı olarak değişmektedir ve Şekil 2'de gösterildiği gibi yaklaşık olarak yüksek temiz gaz toz konsantrasyonu beklentisi halinde wD çizgisini, düşük temiz gaz toz konsantrasyonu gözlemlenmesi durumunda ise w.p çizgisini takip etme eğilimindedir.



Şekil 1. ESF boyutlandırması (Deutsch, 1922).



Şekil 2. ESF boyutlandırması diyagram gösterimi [15].

Referans olarak seçilen ESF'nin özelliklerine göre hesaplanan k katsayısı, ölçümü istenilen santral için şekil 2 üzerinde gösterilen yukarıdaki adımlar; Referans ESF (Adım-0), Yeni ESF giriş koşullarına göre adaptasyon (Adım-1), Yeni ESF aralıklarına göre adaptasyon (Adım-2&3), Yeni ESF hızına göre adaptasyon (Adım-4), Yeni ESF yüksekliğine göre adaptasyon (Adım-5), Yeni ESF için k değeri bulunması (Adım-6) gibi adımlar takip edilerek ölçümü istenilen santrale göre adapte edilmektedir. Bu adaptasyon sırasında yukarıda bahsedildiği gibi temiz gaz konsantrasyonu beklentisine göre takip edilecek eğri de seçilmektedir. Adapte edilen k katsayısı göre ayırma verimliliği olan T değeri hesaplanarak, temiz gaz konsantrasyonu elde edilmektedir. Bu yöntem doğrultusunda farklı operasyonel değişkenlerin verileri ile elde edilen sonuçlar Bulgular kısmında gösterilmiştir.

III.BULGULAR

Materyal ve metot bölümünde bahsedildiği gibi, temiz hava toz konsantrasyonları hesaplamak için, operasyonel değişkenlerin ESF verimliliği üzerindeki etkisi farklı senaryolar oluşturularak incelenmiştir. Değişiklik yapılan parametreler Tablo 5' de gösterilmiştir.

Tablo 5. Tesiste uygulanan senaryo analizleri operasyonel farklılıkları

Operasyonel Değişkenler	Operasyonel Değişken Değerleri				
ESF'ye giriş yapan atık gaz sıcaklığı (°C)	120	125	130	135	140
Hava ön ısıtıcı kaçağı oranı (%)	10	15	25	-	-
Elektriksel alan	1 bölüm & 1 alan kapalı	1 ve 2. Bölüm & 1 alan kapalı	1.bölüm 1. Alan Kapalı & 1.Bölüm 1. Alan Kapalı	-	-

Ulusal ve uluslararası yönetmeliklere göre kapasitesi 615 MW olan termik santrallerin sağlaması gereken

temiz hava toz emisyon değerleri;

- “2010/75/EU of the European Parliament and of the Council” on Industrial Emissions (Integrated Pollution Prevention and Control) göre baca gazı toz emisyon limit değeri 10 mg/Nm³,
- Best Available Technologies (BAT) Reference Document for the Large Combustion Plants (LCP) göre baca gazı toz emisyon limit değeri 20 mg/Nm³,
- Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü (SKHKK) Yönetmeliği (Resmî Gazete No: 29211) göre baca gazı toz emisyon limit değeri 50 mg/Nm³.

Senaryolar, bir değişken üzerinde değişiklik yapıldığında, diğer değişkenleri sabit tutarak oluşturulmuştur. 3 kömür çeşidinin 120, 125, 130, 135, 140 °C ESF'ye giriş yapan atık gaz sıcaklığı durumunda göreceli olarak düşük, orta ve yüksek olarak seçilen farklı ısıtıcı kaçak oranlarına göre performansı (Toz seviyeleri) Tablo 6' da gösterilmiştir. Yukarıdaki yönetmelikler baz alınarak, 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council yönetmeliği için “a” harfi ile işaretli toz emisyon değerleri, BAT Reference Document for the LCP kriterlerine göre “b” harfi ile işaretli değerler, SKHKK Yönetmeliği için “c” harfi ile işaretli değerler kriter uygunluğunu kaybetmiştir (Tablo 6, 7, 8).

3 kömür çeşidinin 120, 125, 130, 135, 140 °C ESF'ye giriş yapan atık gaz sıcaklığı durumunda 3 farklı hava ön ısıtıcı kaçağı oranı ve sırasıyla bir ve iki elektriksel alan eksikliğine göre performansı Tablo 7 ve Tablo 8'de gösterilmiştir.

İstatistiksel olarak kömür çeşitlerine göre toz seviyelerinin sıcaklık ile korelasyonuna bakıldığında, üç farklı hava ön ısıtıcı kaçağı yüzdesinde de Pearson korelasyon değeri 0.95 ile 0.99 arasında değişmektedir ($R^2 = 0.95 \sim 0.99$).

Son olarak, 3 kömür çeşidinin 120, 125, 130, 135 ve 140 °C ESF'ye giriş yapan atık gaz sıcaklığı durumunda 3 farklı hava ön ısıtıcı kaçağı oranı ve iki bölümde birer elektriksel alan eksikliğine göre performansı ve yönetmeliklere göre sınır değerlerini geçen veriler işaretlenerek Tablo 9'da gösterilmiştir.

Tablo 6. Farklı kömür çeşitlerinde ve ön ısıtıcı kaçağı değerlerinde hesaplanan partikül madde emisyon değerleri (mg/Nm³)

Gaz Sıcaklığı (°C)	Hava Ön Isıtıcı Kaçağı (%)	Kömür ¹	Kömür ²	Kömür ³
120	10	2,97	5,22	1,67
	15	4,78	8,25	2,70
	25	10,72 ^a	17,93 ^a	6,10
125	10	4,80	7,36	2,51
	15	7,51	11,39 ^a	3,97
	25	16,03 ^a	23,87 ^b	8,62
130	10	7,75	10,34 ^a	3,65
	15	11,81 ^a	15,67 ^a	5,66
	25	24,02 ^b	31,66 ^b	11,87 ^a
135	10	12,41 ^a	14,49 ^a	5,07
	15	18,42 ^a	21,50 ^b	7,73
	25	35,81 ^b	41,90 ^b	15,74 ^a
140	10	17,61 ^a	20,28 ^b	6,71
	15	25,60 ^b	29,46 ^b	10,08 ^a
	25	48,02 ^b	55,40 ^c	20,00 ^b

Tablo 7. Farklı sıcaklıklarda, 1 elektriksel alan eksikliği durumunda ve farklı ön hava ısıtıcı değerlerinde hesaplanan toz emisyon değerleri (mg/Nm³)

Gaz Sıcaklığı (°C)	Hava Ön Isıtıcı Kaçağı (%)	Kömür ¹	Kömür ²	Kömür ³
120	10	4,75	8,18	2,68
	15	7,36	12,45 ^a	4,16
	25	15,46 ^a	25,45 ^b	8,80
125	10	7,41	11,25 ^a	3,90
	15	11,19 ^a	16,80 ^a	5,95
	25	22,49 ^b	33,22 ^b	12,14 ^a
130	10	11,56 ^a	15,41 ^a	5,52
	15	17,03 ^a	22,59 ^b	8,26
	25	32,80 ^b	43,25 ^b	16,35 ^a
135	10	17,89 ^a	21,08 ^b	7,48
	15	25,76 ^b	30,32 ^b	11,04 ^a
	25	47,65 ^b	56,20	21,29 ^b
140	10	24,78 ^b	28,81 ^b	9,70
	15	35,02 ^b	40,67 ^b	14,13 ^a
	25	62,73 ^c	72,99 ^c	26,64 ^b

Tablo 8. Farklı sıcaklık, hava ön ısıtıcı kaçağı değerlerinde ve bir bölümde 2 elektriksel alan eksikliği durumunda toz emisyon seviyeleri (mg/Nm³)

Gaz Sıcaklığı (°C)	Hava Ön Isıtıcı Kaçağı (%)	Kömür ¹	Kömür ²	Kömür ³
120	10	6,54	11,14 ^a	3,69
	15	9,94	16,66 ^a	5,62
	25	20,21 ^b	32,97 ^b	11,50 ^a
125	10	10,03 ^a	15,13 ^a	5,30
	15	14,86 ^a	22,21 ^b	7,92
	25	28,95 ^b	42,58 ^b	15,66 ^a
130	10	15,37 ^a	20,48 ^b	7,38
	15	22,25 ^b	29,51 ^b	10,86 ^a
	25	41,58 ^b	54,83 ^c	20,84 ^b
135	10	23,37 ^b	27,66 ^b	9,89
	15	33,09 ^b	39,14 ^b	14,35 ^a
	25	59,48 ^c	70,50 ^c	26,84 ^b

	10	31,95 ^b	37,34 ^b	12,70 ^a
140	15	44,43 ^b	51,89 ^c	18,19 ^a
	25	77,43 ^c	90,58 ^c	33,28 ^b

Tablo 9. Farklı sıcaklıklar da ve farklı ön hava ısıtıcı kaçağı değerlerinde ve iki bölümde birer elektriksel alan eksikliği durumunda toz emisyon değerleri (mg/Nm³)

Gaz Sıcaklığı (°C)	Hava Ön Isıtıcı Kaçağı (%)	Kömür ¹	Kömür ²	Kömür ³
120	10	12,81 ^a	20,92 ^b	7,23
	15	18,02 ^a	29,09 ^b	10,20 ^a
	25	32,40 ^b	51,29 ^c	18,43 ^a
125	10	18,30 ^a	27,03 ^b	9,78
	15	25,29 ^b	37,10 ^b	13,62 ^a
	25	44,09 ^b	63,91 ^c	24,02 ^b
130	10	26,21 ^a	34,89 ^b	12,92 ^a
	15	35,63 ^b	47,25 ^b	17,79 ^b
	25	60,28 ^c	79,55 ^c	30,73 ^b
135	10	37,43 ^b	45,03 ^b	16,55 ^a
	15	50,09 ^c	60,19 ^c	22,56 ^b
	25	82,38 ^c	99,00 ^c	38,28 ^b
140	10	48,93 ^b	58,18 ^c	20,47 ^b
	15	64,63 ^c	76,74 ^c	27,66 ^b
	25	103,87 ^c	123,33 ^c	46,18 ^b

IV. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışma kapsamında, 615 MW kurulu güce sahip ve 2 adet pulverize kazanı bulunan bir termik santral seçilmiştir. Bu tesiste, toz emisyonunu kontrol etmek amacıyla kurulan ESF ünitelerinin verimliliğini artırmak ve alternatif yaklaşımlar üretmek amacıyla, ESF'ye giriş yapan atık gaz sıcaklığı ve hava ön ısıtıcı kaçağı parametreleri için farklı senaryolar oluşturulmuştur. ESF verimliliğine ve dolayısıyla toz konsantrasyonuna etki eden faktörler arasında olan toplama verimliliği ile ters korelasyona sahip toz direnci [16], kömür ve kül özellikleri, toz direnci ile benzer şekilde düşmesi ile toplama verimliliğinde artış gözlenen ESF'ye giriş yapan atık gaz sıcaklığı [17] parametrelerinin etkisini görebilmek için emisyonlar hesaplanmıştır.

Seçilen üç farklı kömür tipi içinde, ESF'ye giriş yapan atık gaz sıcaklığı ve hava ön ısıtıcı kaçağı parametreleri düşük ve orta değerlerde uluslararası yönetmeliklerin belirlediği emisyon sınır değerlerine uygunluk göstermiştir. Bununla birlikte, özellikle 1 ve 2 numaralı kömür çeşitlerinde 130 °C'e çıkan ESF'ye giriş yapan atık gaz sıcaklığı ile uygunluklarını kaybetmektedir. Tesis faaliyet halindeyken ortaya çıkabilecek problemlerden ve elektriksel alanın devre dışı kalabilme ihtimalinden dolayı, elektriksel alanların tamamen devrede olduğu durumların yanı sıra devre dışı kalması durumu da incelenmiş ve yönetmeliklerle uygunluğu değerlendirilmiştir. Baca gazı toz emisyon değeri sırasıyla bir bölüm içerisinde; bir ve iki elektriksel alan devre dışına alınarak hesaplanmıştır.

Beklendiği gibi bir elektriksel alan devre dışına alındığında, göreceli olarak düşük toz direncine ve yüksek alt ısı değerine sahip olan 3 numaralı kömür düşük ve orta operasyonel değerler altında yönetmeliğe uygunluk göstermiştir. Bununla birlikte, bir ünite de 2 elektriksel alan devre dışı bırakıldığında, orta derecedeki operasyonel değerler altında olmasına rağmen yönetmeliğe uygunluğunu kaybetmiştir [16]. En yüksek toz emisyon değerleri 2 bölümden de birer elektriksel alanın devre dışı kalması durumunda gözlenmiştir.

Santralde yönetmeliklerce belirlenen toz konsantrasyonunu kritik seviyelerin altında tutulması ve elektriksel alanlarında devre dışı kalması durumları değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, ESF'ye giriş yapan atık gaz sıcaklığının ve hava ön ısıtıcı kaçağı değerlerinin düşük seviyelerde tutulması gereği ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmanın sonuçları değerlendirildiğinde, yönetmeliklerce belirlenen emisyon değerlerine uygunluk gösteren santrallerin elektriksel alanları devre dışı bırakılarak oluşturulacak senaryolar ile tasarruf sağlamaları hedeflenebilir.

EK BİLGİ

Bu makale çalışması, Bahçeşehir Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde Dr. Hüseyin Özdemir'in tez danışmanlığında hazırlanmış olan, yüksek lisans öğrencisi Baran Kurt'un 'Termik Santrallerde ESF Uygulamaları ve Verim Artırıcı Yöntemler' adlı yüksek lisans tezinden uyarlanmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] C. İlkılıç ve R. Behçet, «Hava Kirliliğinin İnsan Sağlığı ve Çevre Üzerindeki Etkisi,» *Fırat Üniversitesi Doğu Araştırmaları Dergisi*, cilt 5(1), p. 66–72, 2006.
- [2] Energy Agency, «Key World Energy Statistics,» 2019. [Çevrimiçi]. Available: https://www.connaissancedesenergies.org/sites/default/files/pdf-actualites/Key_World_Energy_Statistics_2019.pdf.
- [3] N. Vardar ve Z. Yumurtacı, «Emissions estimation for lignite-fired power plants in Turkey,» no. 38(1), p. 243–252, 2010.
- [4] N. d. Nevers, *Air Pollution Control Engineering (Second)*, 2010.
- [5] A. A. Varonos, J. S. Anagnostopoulos ve G. C. Bergeles, «Prediction of the cleaning efficiency of an electrostatic precipitator,» *Journal of Electrostatics*, cilt 55(2), pp. 111-133, 2002.
- [6] K. Adamiak, «Numerical models in simulating wire-plate electrostatic precipitators: A review,» *Journal of Electrostatics*, cilt 71(4), p. 673–680, 2013.
- [7] H. Wang, W. D. Porter, H. Böttner, J. König, L. Chen ve S. Bai, «Transport Properties of Bulk Thermoelectrics: An International Round-Robin Study, Part II: Thermal Diffusivity, Specific Heat, and Thermal Conductivity,» *Journal of Electronic Materials*, cilt 42(6), pp. 1073-1084, 2013.
- [8] M. Khare ve M. Sinha, «Computer-aided simulation of efficiency of an electrostatic precipitator,» *Environment International*, cilt 22(4), pp. 451-462, 1996.
- [9] T. Yamamoto ve L. E. Sparks, «Numerical Simulation of Three-Dimensional Tuft Corona and Electrohydrodynamics,» *IEEE Transactions on Industry Applications*, p. 880–885, 1986.
- [10] K. S. Nikas, A. A. Varonos ve G. C. Bergeles, «Numerical simulation of the flow and the collection mechanisms inside a laboratory scale electrostatic precipitator,» *Journal of Electrostatics*, cilt 63(5), pp. 423-443, 2005.
- [11] R. K. Shah, J. W. Kim ve D. A. Weitz, «Janus Supraparticles by Induced Phase Separation of Nanoparticles in Droplets,» *Advanced Materials*, cilt 21(19), p. 1949–1953, 2009.
- [12] M. Jedrusik ve A. Swierczok, «The correlation between corona current distribution and collection of fine particles in a laboratory-scale electrostatic precipitator,» *Journal of Electrostatics*, cilt 71(3), pp. 199-203, 2013.
- [13] C. Çakır ve B. C. Çınar, «Eren Enerji Elektrik Üretim A.Ş. Termik Santralinin Enerji ve Ekserji Analizi,» 2015. [Çevrimiçi]. Available: https://www.academia.edu/13392206/EREN_ENERJİ_ELEKTRİK_ÜRETİM_A.Ş._TERMİK_SANTRALİNİN_ENERJİ_ve_EKSERJİ_ANALİZİ_Energy_and_Exergy_Analysis_of_Eren_Energy_Electricity_Production_Inc._Thermal_Power..
- [14] N. Noda ve H. Makino, «Influence of operating temperature on performance of electrostatic precipitator for pulverized coal combustion boiler,» *Advanced Powder Technology*, cilt 21(4), pp. 495-499, 2010.
- [15] W. Deutsch, «Bewegung und Ladung der Elektrizitätsträger im Zylinderkondensator. Annalen Der Physik,» cilt 373(12), p. 335–344, 1922.
- [16] H. Zhao, Y. He ve J. Shen, «Effects of Temperature on Electrostatic Precipitators of Fine Particles and SO₃. Aerosol and Air Quality Research,» no. 18, p. 2906–2911, 2018.
- [17] Y. Zhuang, K. Jin, T. Gyu Lee ve P. Biswas, «Experimental and theoretical studies of ultra-fine particle behavior in electrostatic precipitators,» *Journal of Electrostatics*, cilt 48(3–4), p. 245–260, 2000.

Pool-based Evolutionary Algorithm for the Bin Packing Problem

Kutu Paketleme Problemi için Havuz Tabanlı Evrimsel Algoritma

Tuğba Zeynep YILDIZ¹ , Betül BOZ¹ 

¹ Computer Engineering Department Marmara University, 34722, Istanbul, Turkey

Abstract

Bin packing problem is one of the most important optimization problems from the literature. In this work, we propose a novel pool-based evolutionary algorithm for solving the one-dimensional bin packing problem. The algorithm uses the pool-based crossover operator that aims to increase the search space of the problem and combine and remap method as a local search technique that aims to improve the quality of the solution by considering underutilized bins in the offspring. In our experimental study, the performance of the proposed method is compared with six algorithms from the literature using medium and hard instances in the benchmark problem sets. As a result, the proposed study performs better than the algorithms in the literature in 13% of medium instances and 80% of hard instances.

Keywords: Bin packing problem, evolutionary algorithms, crossover operator, problem specific operator design.

Öz

Kutu paketleme problemi literatürdeki en önemli optimizasyon problemlerinden biridir. Bu çalışmada, tek boyutlu kutu paketleme probleminin çözümü için havuz tabanlı evrimsel algoritma öneriyoruz. Algoritma, problemin arama alanını arttırmayı amaçlayan havuz tabanlı bir çaprazlama operatöründen ve yavru çözümdeki tamamen kullanılmayan kutuları dikkate alarak çözümün kalitesini iyileştirmeyi amaçlayan birleştirme ve tekrar atmayı sağlayan yerel bir arama tekniğinden yararlanmaktadır. Deneysel çalışmamızda önerdiğimiz yöntemin performansı, literatürde bulunan altı algoritma ile kıyaslama problem setlerinde bulunan orta ve zor örnekler kullanılarak karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak önerdiğimiz çalışma, orta örneklerin %13'ünde ve zor örneklerin %80'inde literatürdeki algoritmalarından daha iyi performans göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Kutu paketleme problemi, evrimsel algoritmalar, çaprazlama operatörü, probleme özgü operatör tasarımı.

I. INTRODUCTION

Bin packing problem is a well-known optimization problem which can be applied to many real-life problems including industrial and logistic applications, multiprocessor scheduling and cloud computing. Given a set of items with different weights and an unlimited number of bins with fixed bin capacity, the objective of the problem is to pack these items to minimum number of bins such that the total weight of the items assigned to a bin does not exceed the capacity of the bin. Bin packing problem has various versions such as one-dimensional packing, two-dimensional packing, three-dimensional packing, regular or irregular packing, packing by cost or packing by weight. In this study, we consider one dimensional packing by weight and our objective is to minimize the total number of bins used.

Bin-packing is an NP-Complete [1] problem and many heuristics and meta-heuristics have been proposed for the solution of the problem. The First Fit algorithm [2], the Best Fit algorithm [3], the Next Fit algorithm [2] and graph-based algorithm [4] are examples for the heuristic solutions of the problem. A variety of meta heuristics such as ant colony optimization [5, 6], cuckoo search algorithm [7, 8], firefly algorithm [9] and whale optimization algorithm [10], genetic algorithms [11, 12], simulated annealing [13] have also been used to solve the problem.

Firefly colony optimization algorithm (FCO) [5] is a greedy metaheuristic using positive feedback to avoid convergence to low quality solutions. Ant system algorithm (AS) [6] combines ant colony algorithm with a local search technique. Adaptive Cuckoo Search Algorithm (ACS) [7] combines cuckoo search algorithm with Ranked-Order-Value (ROV) technique as a decoding mechanism to obtain discrete solutions. Quantum Inspired Cuckoo Search Algorithm (QICS) [8] defines the solutions using quantum representation based on qubit representation and uses a novel hybrid quantum measure operation inspired by the first fit heuristic. Firefly algorithm (FA) [9] uses Lévy flights as a search strategy which enables the algorithm to converge quickly. Improved Lévy-based whale optimization algorithm (ILWOA) [10] uses Lévy flight for whale movements to improve the exploration capabilities of whale optimization algorithm. It also uses a logistic chaotic map to switch between exploration and exploitation. These algorithms are the reference studies used in the experiments.

Evolutionary algorithms are heuristic approaches that can be used to find solutions to NP-Complete problems. Basically evolutionary algorithms mimic the nature and are based on the idea of the survival of the fittest. In this study, we propose a pool-based evolutionary algorithm (PBEA) for the solution of bin packing problem using a problem-specific crossover operator and a local search technique. The main contributions of this study are: (1) the pool-based crossover operator that aims to increase the diversity of the solution; (2) the combine and remap local search technique that aims to increase the utilization of the bins; (3) intelligent packing by rearranging items in underutilized bins, therefore increase performance and decrease bin usage. Our experimental study indicates that it outperforms related studies from the literature for medium and hard class instances.

Our paper is organized as follows: Bin Packing problem is defined in the next section. In Section III, the details of the proposed algorithm are given using convenient examples. The performance of our algorithm and its comparison with six algorithms from the literature are shown in Section IV. Finally, we discuss our contributions and give future directions for the problem in Section V.

II. PROBLEM DEFINITION

Given n items having different weights, and bin capacities, the objective of the bin packing problem is to assign all items to the minimum number of bins in which the total weight of items assigned to a bin does not exceed the capacity of the bin. The problem can be formulated as follows:

$$\text{minimize } z(y) = \sum_{i=1}^n y_i \tag{1}$$

Subject to constraints:

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, j = 1..n \tag{2}$$

$$\sum_{i=1}^n w_i x_{ij} \leq C_j, j = 1..n \tag{3}$$

$$y_i \in \{0,1\}, i = 1..n \tag{4}$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, i = 1..n, j = 1..n \tag{5}$$

The variable y_j is used to indicate whether bins are used. If bin j is used, y_j is equal to 1, but if it is empty, y_j is set to 0. If item i is placed to bin j , x_{ij} is set to 1, otherwise 0. The objective of the problem as represented in Eq.1 is to minimize the total number of bins used. The first constraint guarantees that each items is placed to only one bin as shown in Eq.2. The

second constraint ensures that the total weight of the items assigned to a bin cannot exceed the bin capacity (Eq.3). In the proposed work, we assume that all bins have the same capacity C .

III. POOL-BASED EVOLUTIONARY ALGORITHM

In bin packing problem, an infinite number of bins having the same capacity and a number of items having different weights are given. In our study, the grouping method [14] is used to represent each individual as S_i where $S_i = \{B_1, B_2, \dots, B_k\}$. Each partition B_i includes the set of items assigned to the bin b_i ; and k the number of bins used.

Our evolutionary algorithm starts by generating the initial population which includes candidate solutions for the bin packing problem as presented in Algorithm 1 and continues for a predefined number of iterations. At each iteration, two individuals referred as *parent1* and *parent2* are selected randomly from the population. The pool-based crossover operator and the combine and remap local search technique are applied to these parents to obtain a new offspring. The crossover operator tries to increase the search space of the solution by mixing the items assigned to the bins of the parents. The local search technique tries to decrease the total number of bins used in the offspring, so it keeps the utilized bins and combines and remaps the underutilized bins. When the local search technique is completed, the fitness value of the offspring is set to the total number of bins occupied by the offspring. If the fitness value of the offspring is better than its parents, the parent having the worst fitness value is selected for replacement.

Algorithm 1: Main scheme of the proposed Pool-based evolutionary algorithm

<p>Input: Items i, number of iterations $iteration$, population size pop_size, bin capacity c</p> <p>Output: Updated population P</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. $P \leftarrow initialize_population(s, i, c)$ 2. For $i=0$ to $iteration$ do 3. Select two parents S_1 and S_2 from P randomly 4. $S_c \leftarrow crossover_operation(S_1, S_2)$ 5. $S_{improved} \leftarrow local_search(S_c)$ 6. $P \leftarrow update_pop()$ 7. End

3.1. Initial Population Generation

The initial population includes a predefined number of candidate solutions for the bin packing problem. At the beginning of initial population generation, all individuals are initialized to contain one bin with a given capacity. Before each individual is created, the items are shuffled and are placed to a list. Items are selected one-by-one from this list and are placed to the

first bin of the corresponding individual having enough capacity. If no such bin exists, then a new bin is created, and the item is placed to this bin. The available space of each bin is updated as new items are inserted to the bins. Once a predefined number of solutions are obtained, the initial population generation is completed.

3.2. Pool-based Crossover Operator

In this work, we use the Pool-Based Crossover (PBC) [15,16] that increases the search space while generating the bins of the offspring. It also includes a pool which contains the items that has not been assigned to any bin yet due to size constraints. The details of our crossover operator are given in Algorithm 2.

Algorithm 2: Pool-based crossover operator.

```

Input: First parent  $S_1 = \{B_1^1, B_2^1, \dots, B_k^1\}$ , second parent  $S_2 = \{B_1^2, B_2^2, \dots, B_k^2\}$ 

Output: An offspring  $S_0 = \{B_1, B_2, \dots, B_k\}$ 

1. Create an empty pool  $Pool := \emptyset$ 
2.  $i=0$ 
3. While there are unselected bins in  $S_1$  or  $S_2$  do
4.   Create  $i^{th}$  bin of  $S_0$   $B_i$ :  $B_i := \emptyset$ 
5.   Set  $available\_space(B_i) := Capacity$  of bins
6.   Select an unselected bin from  $S_1$ :  $B_x^1$ 
7.   Select an unselected bin from  $S_2$ :  $B_y^2$ 
8.   Set  $B_x^1$  and  $B_y^2$  as selected
9.   Remove items in  $B_x^1$  and  $B_y^2$  from  $S_1$  and  $S_2$ 
10.  Combine and shuffle items in  $B_x^1$  and  $B_y^2$  with the items in Pool
11.  While there are items in Pool do
12.    Select item  $I$  from Pool
13.    For  $j=0$  to  $i$  do
14.      If  $weight(I) \leq available\_space(B_j)$  then
15.        Remove item  $I$  from Pool
16.        Place item  $I$  to  $B_j$ 
17.        Update Available Space of  $B_j$ :  $available\_space(B_j) = available\_space(B_j) - weight(I)$ 
18.        break
19.      End
20.    End
21.    Update item  $I$ :  $I :=$  the next item in Pool
22.  End
23.  Increment  $i$ :  $i := i + 1$ 
24. End
25.  $j=i$ 
26. While there are items in Pool do
27.   Select item  $I$  from Pool
28.   ItemPlaced=false
29.   For  $j$  to  $i$  do
30.     If  $weight(I) \leq available\_space(B_j)$  then
31.       Remove item  $I$  from Pool
32.       Place item  $I$  to  $B_j$ 
33.       Update Available Space of  $B_j$ :  $available\_space(B_j) = available\_space(B_j) - weight(I)$ 
34.       ItemPlaced=true
35.     break
36.   End
37.   End
38.   If not ItemPlaced then
39.     Create  $i^{th}$  bin of  $S_0$   $B_i$ :  $B_i := \emptyset$ 
40.     Set  $available\_space(B_i) := Capacity$  of bins
41.     Remove item  $I$  from Pool
42.     Place item  $I$  to  $B_j$ 
43.     Update Available Space of  $B_j$ :  $available\_space(B_j) = available\_space(B_j) - weight(I)$ 
44.     Increment  $i$ :  $i := i + 1$ 
45.   End
46.   Update item  $I$ :  $I :=$  the next item in Pool
47. End
48. Return offspring  $S_0$ 

```


Assume that two randomly selected parents represented as $S_1 = \{B_1^1, B_2^1, \dots, B_k^1\}$ and $S_2 = \{B_1^2, B_2^2, \dots, B_k^2\}$ with k bins are the inputs. Since parents have k partitions, the crossover operation will continue for at most k steps. The total number of bins in S_1 and S_2 does not have to be equal, and the operator will continue until it selects all items from both parents. Initially, the offspring with only one bin having an initial free space equal to the bin capacity and an empty pool is created.

At each step, one bin from S_1 and one bin from S_2 are selected randomly. These bins and the items in these bins are assigned as *selected* and will not be used by the crossover operator again. All the items that are present in the selected bins are combined with the items in the pool and are shuffled to increase the diversity of the solutions. The items in the pool are then placed into the bins of the offspring one by one. For each item x , there is a back-search operation which visits the bins currently available in the offspring one by one. Starting from the first bin B_0 to B_{i-1} , if there is any bin B_j which has free space that is equal to or greater than the weight of the item x , then this item is deleted from the pool and is placed to B_j . If no such bin can be found, item x is placed (if there is enough space) to B_i that is generated in the offspring during the current step. Once an item is placed to one of the bins in the offspring, the free space of the corresponding bin is also updated. If item x cannot be placed to any of the bins, then it is kept in the pool to be placed to one of the bins created in the next steps.

Figure 1 provides an example of the crossover operator applied to the given parents. The weights of the items used in this example are shown in Table 1. The capacity of the bins is set to 14. Assume that B_5^1 and B_3^2 are selected randomly and the items I_5 and I_1 in these bins are combined in the pool. The items in the pool are shuffled and the first bin having free space of 14 is generated as B_0 . Since the weight of the first item I_5 in the pool is less than the free space of B_0 , I_5 is deleted from the pool and is placed to B_0 and free space of B_0 is updated to 3. The algorithm tries to put the second item I_1 having a weight of 7 to B_0 , but there is not enough space to store this item in B_0 , so it is kept in the pool.

Table 1. Weights of items used in pool-based crossover operator example in Figure 1.

Item	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Weight	5	7	3	5	12	11	10	11	9

In the second step, B_0^1 and B_4^2 are selected randomly and the items I_2 , I_7 and I_8 in these bins are combined with the items in the pool. The pool is shuffled again and B_1 having a capacity of 14 is generated. The first item I_1 is placed into the newly generated bin B_1 of the

offspring. The free space of B_1 is updated to 7. The weight of the second item I_2 in the pool is equal to 3, with the back-search operation, it is placed to B_0 which makes B_0 fully utilized. The algorithm tries to place items I_7 and I_8 into B_1 , but the weights of these items are greater than the free space available in B_1 , so they are kept in the pool. In the third step, B_3^1 and B_0^2 are selected randomly and the items I_4 and I_6 in these bins are combined with the items in the pool. After the pool is shuffled, I_4 is placed to the newly generated bin B_2 . In the last step, B_2^1 and B_1^2 are selected randomly, and all items are thrown into the pool. Again, the pool is shuffled and I_3 is placed into B_1 by using the back-search operation, whereas I_6 is placed to the newly generated bin B_3 .

At the end of this step, all partitions of the parents become empty, so the crossover operator considers only the items in the pool. Since a back-search operation has been performed on all items before, a new partition B_4 is generated to place these items. I_0 and I_8 is placed to B_4 and for the remaining item I_7 bin B_5 is created. The crossover operator continues until all items in the pool are placed into one of the bins.

3.3. Combine and Remap Local Search Technique

At the end of pool-based crossover operator, some bins in the offspring are fully utilized such as B_0 and B_4 as given in Figure 1 so there is no need to touch these bins. Our local search technique is called *Combine and Remap* as it tries to decrease the number of bins used in the offspring by exchanging information stored in underutilized bins as shown in Algorithm 3. This technique considers only the *underutilized bins*. This technique allows grouping of the items with lowest weight into one bin, so it increases the change of decreasing the total number of bins used in the solution. It also increases the utilization of some of the underutilized bins.

Algorithm 3: Combine and remap local search technique.

<p>Input: An offspring $S_0 = \{B_1, B_2, \dots, B_k\}$</p> <p>Output: The offspring $S_0 = \{B_1, B_2, \dots, B_k\}$</p> <ol style="list-style-type: none"> 8. Create an empty pool $Pool := \emptyset$ 9. Find underutilized bins of offspring S_0 10. While there are underutilized bins do 11. Merge 2 underutilized bins to create a new partition which is utilized and add remaining items to the pool: $partition, pool \leftarrow partition_reduction$ (underutilized bins) 12. End 13. Merge the pools to create new partitions 14. Return offspring S_0
--

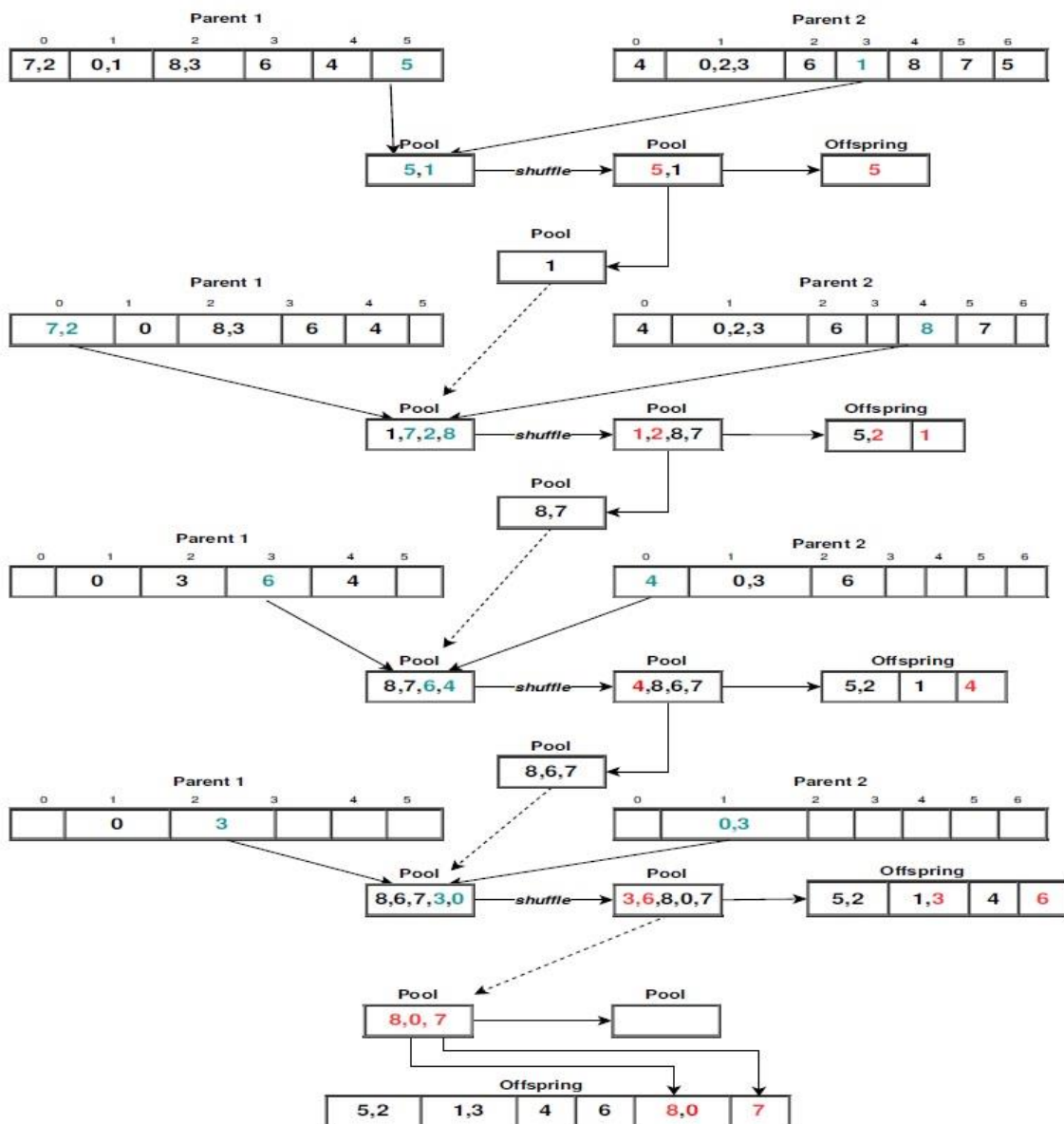


Figure 1. Pool-based crossover operator applied to the given parents to obtain an offspring.

Local search technique selects underutilized bin pairs in the offspring and combines the items in these bins to form new bins. When the items from two bins are combined, a more intelligent method than shuffling is used which places the items with the highest weight to the new bin. The items with the lowest weight are thrown to the pool to increase the chance of placing higher number of items into the same bin. The local search technique is finished when all underutilized bins are recombined and the items in the bins are rearranged. Local search technique does not always guarantee to decrease the number of bins in the offspring, but it guarantees to increase the utilization of the underutilized bins which increases the chance to find a better solution in the next iterations.

Figure 2 is an example local search scenario applied to the underutilized bins of an offspring. In this example,

actual data taken from HARD0 instance of hard data sets [17] is used. The weights of the items are divided by 1000 and rounded to increase readability and are given in Table 2. The capacity of each bin is 100. This simple example shows that the local search technique can decrease the total number of bins used in the offspring by 1. The bins which have utilization less than 90% are considered in this phase. The first underutilized bin pair deleted from the offspring is B₁₁ and B₁₅. The items that have the highest weight in these bins are I₅, I₄₇ and I₅₀ so they are used to generate the first partition P₁. The remaining items I₁₂₄, I₁₂₉ and I₁₈₆ having lower weights are thrown to the pool. Likewise, B₂₀ and B₂₁ are combined, P₂ is filled with items I₇, I₄₁ and I₉₆ having highest weight. The items with lower weights are thrown to the pool. P₃ and P₄ are generated using bin pairs B₂₅ and B₃₂, B₄₇ and B₅₁. All the underutilized bins have 3 items, so does the

newly generated partitions $P_1 - P_4$. Also, the utilization of the partitions is higher as compared to the selected bins. All remaining items that have not been placed to a partition are available in the pool and we know that the weights of these items are lower, so the pool increases the chance to generate partitions that hold more items.

Our algorithm initially selects the items with the highest weight from the pool. I_{111} , I_{121} and I_{124} are placed to P_5 and there is still 22 free space in P_5 . The next item with the highest weight is I_{129} but it has a weight of 25, so it cannot be placed to this partition. Our algorithm applies best fit in this case to see if there is an item in the pool that has a weight equal to the free space available in the partition. If so, it selects that

item, removes it from the pool and puts it to the partition. If there is no such item having an equal weight, then it selects the item which has a lower but closer weight. I_{186} 's weight is 21, so it is placed to P_5 . Partitions P_6 and P_7 are generated using the same procedure.

The newly generated partitions P_5 and P_6 are nearly fully utilized, and all newly generated partitions have 4 items, which decreases the total number of bins in the offspring by 1. At the end of local search phase, the newly generated partitions are replaced with the underutilized bins in the offspring.

Table 2. Weights of items used in combine and remap local search technique example given in Figure 2.

I_i	5	7	19	40	41	47	54	55	57	70	93	96	111	121	124	129	132	134	148	158	159	160	186	190	
W_i	35	34	33	32	31	31	30	30	30	29	28	27	26	26	26	25	25	25	24	23	23	23	23	21	21

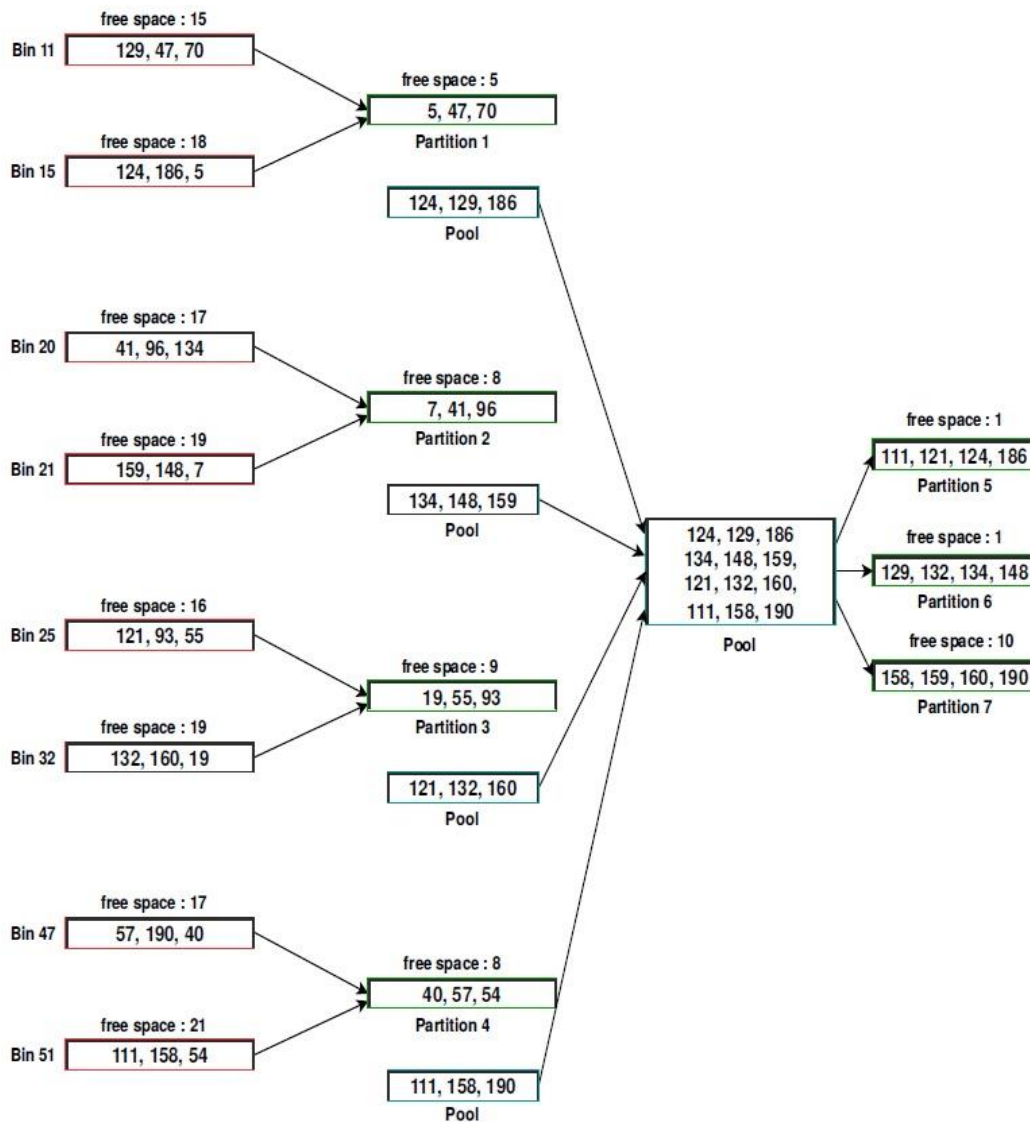


Figure 2. Applying combine and remap local search technique to the underutilized partitions of the offspring.

IV. EXPERIMENTAL EVALUATION

In this section, two set of tests are provided to measure the performance of our algorithm using medium and hard class instances selected from Scholl uniformly distributed instances [17]. First the performance of our algorithm is compared with quantum inspired cuckoo search algorithm (QICS) [8], adaptive cuckoo search algorithm (ACS) [7], firefly colony optimization algorithm (FCO) [5], firefly algorithm (FA) [9], ant system algorithm (AS) [6] and improved Lévy-based whale optimization algorithm (ILWOA) [10]. The performance of the algorithms in Table 4 and Table 6 are collected from [10], and the same instances used in this reference work are selected as medium and hard instances for the comparison of the algorithms. We also showed the performance of our algorithm using two variations of the pool-based crossover operator on hard class instances. For all the experiments, the population size and generation size are set to 100 and 500, respectively. The proposed algorithm is executed 30 times for each instance. Since the crossover operator and local search technique is always executed, both the crossover and mutation rate is 1.

The medium class instances contain 50 to 500 items whose weights are between 10-500. These items should be assigned to the minimum number of bins with a capacity of 1000. Table 3 lists the performance of our algorithm on medium class instances. The best value denotes the minimum number of bins found by the algorithm, whereas the average bin value and standard deviation are calculated using 30 runs. In 9 medium instances out of 16, our algorithm always uses the same bin number. PBEA obtains the same bin number in nearly half of the runs for 6 medium instances, whereas for 1 instance namely N4W2B1R3, we were able to obtain the best bin number 103 in 2 out of 30 runs.

The performance of the proposed work is compared with the algorithms from the literature for the same 16

medium class instances and the results are reported in Table 4. Best known column represents the best achievable bin number. The performance of the algorithms from the literature are collected from [10] and the best bin value obtained in 30 runs is given as the performance of PBEA. Our algorithm outperforms the listed algorithms in 2 instances (N4W2B1R0 and N4W2B1R3) and obtains the same performance with ACS and ILWOA in 14 instances. In 9 instances, our algorithm obtains the best-known bin value. Even if we have shown results of 16 medium class instances, indeed there are 240 instances in this class. We tested our algorithm for all 240 instances, and we are able to obtain the best-known bin value for 113 instances.

Table 3. Performance of PBEA on medium class dataset.

Instance	N	Capacity	BEST	AVG	STD
N1W1B1R2	50	1000	19	19	0
N1W1B1R9	50	1000	17	17	0
N1W1B2R0	50	1000	17	17.73	0.45
N1W1B2R1	50	1000	17	17	0
N1W1B2R3	50	1000	17	17	0
N2W1B1R0	100	1000	34	34.4	0.5
N2W1B1R1	100	1000	35	35.3	0.47
N2W1B1R3	100	1000	35	35.37	0.49
N2W1B1R4	100	1000	34	34.7	0.47
N2W3B3R7	100	1000	13	13	0
N2W4B1R0	100	1000	12	12	0
N4W2B1R0	500	1000	104	104.5	0.51
N4W2B1R3	500	1000	103	103.97	0.18
N4W3B3R7	500	1000	74	74	0
N4W4B1R0	500	1000	57	57	0
N4W4B1R1	500	1000	57	57	0

Table 4. Performance comparison of PBEA with related studies on medium class dataset.

Instance	N	Capacity	Best known	QICS	ACS	FCO	FA	AS	ILWOA	PBEA
N1W1B1R2	50	1000	19	20	19	19	20	20	19	19
N1W1B1R9	50	1000	17	18	17	17	17	17	17	17
N1W1B2R0	50	1000	17	18	17	18	18	18	17	17
N1W1B2R1	50	1000	17	17	17	17	17	18	17	17
N1W1B2R3	50	1000	16	17	17	17	17	17	17	17
N2W1B1R0	100	1000	34	36	34	35	35	37	34	34
N2W1B1R1	100	1000	34	37	35	36	36	36	35	35
N2W1B1R3	100	1000	34	37	35	36	36	36	35	35
N2W1B1R4	100	1000	34	37	34	35	35	35	34	34
N2W3B3R7	100	1000	13	13	13	13	13	13	13	13
N2W4B1R0	100	1000	12	12	12	12	12	12	12	12
N4W2B1R0	500	1000	101	109	105	106	106	107	105	104
N4W2B1R3	500	1000	100	108	104	105	105	106	104	103
N4W3B3R7	500	1000	74	74	74	74	74	74	74	74
N4W4B1R0	500	1000	56	58	57	57	57	58	57	57
N4W4B1R1	500	1000	56	58	57	58	58	58	57	57

There are 10 large class instances that contain 200 items. The weights of these items are between 20,000 and 35,0000 and the bin capacity is 100,000. Our algorithm is executed on each instance 30 times and the best bin value, the average bin value with its standard deviation is given in Table 5. The same bin value is obtained in all of the runs for 4 instances, whereas the best bin value is obtained only once for HARD4 instance. On the other hand, the best bin value is obtained in more than half of the runs in the remaining 5 instances.

Table 6 shows the performance comparison of PBEA with the algorithms from the literature using the hard class instances. The best result reported in Table 5 is used as the performance of PBEA. Our algorithm outperforms the listed algorithms for 8 instances and gives the same performance with ACS and ILWOA in 2 instances. Even if we are very close to the best-known bin value for hard instances, unfortunately PBEA was not able to produce the best-known result.

Finally, the performance of the operators proposed in our algorithm is evaluated. We have conducted tests on the hard class instances and reported the best bin value with the average bin value and standard deviation of the results obtained in 30 runs in Table 7. There are two versions of the pool-based crossover operator which vary in the selection of the items in the pool to be placed to the bins. First crossover operator sorts all items in the pool from highest to lowest weight, whereas second operator shuffles the items in the pool. The first crossover type uses a sorted list, so it first tries to place the highest weight items to the bins and then tries the

other items. Generally, it outperforms the second crossover type because placing heavier items to the bins first is a smarter decision since there will always be much space for lighter items as compared to heavier items. This sorting operation decreases the search space so when combined with local search, it shows worse performance as compared to shuffling. The pool-based crossover operator using shuffle may not be the best choice when considered alone, but with a combination of the local search technique, it gives the best results.

Table 5. Performance of PBEA on hard class dataset.

Instance	N	Capacity	BEST	AVG	STD
HARD0	200	100,000	57	57.37	0.49
HARD1	200	100,000	58	58.04	0.18
HARD2	200	100,000	58	58.37	0.49
HARD3	200	100,000	57	57	0
HARD4	200	100,000	58	58.97	0.18
HARD5	200	100,000	58	58	0
HARD6	200	100,000	58	58.23	0.43
HARD7	200	100,000	57	57	0
HARD8	200	100,000	58	58.2	0.41
HARD9	200	100,000	58	58	0

Table 6. Performance comparison of PBEA with related studies on hard class dataset.

Instance	N	Capacity	Best known	QICS	ACS	FCO	FA	AS	ILWOA	PBEA
HARD0	200	100,000	56	59	58	59	60	59	58	57
HARD1	200	100,000	57	60	59	59	60	60	59	58
HARD2	200	100,000	56	60	59	59	61	60	59	58
HARD3	200	100,000	55	59	58	59	60	59	58	57
HARD4	200	100,000	57	60	59	60	61	60	59	58
HARD5	200	100,000	56	59	58	59	60	59	58	58
HARD6	200	100,000	57	59	59	59	61	60	59	58
HARD7	200	100,000	55	59	58	58	59	59	57	57
HARD8	200	100,000	57	59	59	59	61	60	59	58
HARD9	200	100,000	56	59	59	59	60	59	59	58

Table 7. Performance of the operators of PBEA on hard class dataset.

Instance	Crossover Only						Crossover + Local Search					
	Sorted			Shuffle			Sorted			Shuffle		
	BEST	AVG	STD	BEST	AVG	STD	BEST	AVG	STD	BEST	AVG	STD
HARD0	59	59.1	0.31	59	59.04	0.18	58	58.07	0.25	57	57.37	0.49
HARD1	60	60	0	60	60	0	58	58.97	0.18	58	58.04	0.18
HARD2	60	60	0	60	60.04	0.18	59	59.23	0.43	58	58.37	0.49
HARD3	59	59	0	59	59	0	57	58.13	0.43	57	57	0
HARD4	60	60	0	60	60.5	0.51	59	59.8	0.41	58	58.97	0.18
HARD5	59	59.17	0.38	59	59.9	0.31	58	58.93	0.25	58	58	0
HARD6	59	59.94	0.25	60	60.1	0.31	59	59	0	58	58.23	0.43
HARD7	58	58.4	0.5	58	58.1	0.31	57	57.17	0.38	57	57	0
HARD8	60	60	0	60	60.14	0.35	59	59	0	58	58.2	0.41
HARD9	59	59.9	0.31	59	59.97	0.18	58	58.67	0.48	58	58	0

V. CONCLUSION AND FUTURE WORK

In this study, we have proposed a novel pool-based evolutionary algorithm that solves the one-dimensional bin packing problem. We have designed the pool-based crossover operator to increase the diversity and the combine and remap local search technique to increase the quality of the solution. The experimental study indicates that our algorithm outperforms six algorithms from the literature with respect to the total number of bins used.

The proposed algorithm can be used for the solution of real world problems such as industrial and logistic applications, multiprocessor scheduling and cloud computing that can be modeled using bin packing problem. Pool-based evolutionary algorithm can also be applied to two-dimensional or three-dimensional bin packing problem if the representation of the individuals is changed properly.

REFERENCES

- [1] Garey, M., & Johnson, D. (1990). *Computers and Intractability; A Guide to the Theory of NP-Completeness*. W.H. Freeman Co..
- [2] Johnson, DS., Demers, A., Ullman, JD., Garey, MR., & Graham, RL. (1974). Worst-case performance bounds for simple one-dimensional packing algorithms. *SIAM Journal on Computing*, 3(4), 299–325.
- [3] Rhee, WT., & Talagrand, M. (1993). On line bin packing with items of random size. *Mathematics of Operations Research*, 18(2), 438–445.
- [4] Sensarma, D., & Sarma, SS. (2014). A novel graph based algorithm for one dimensional bin packing problem. *Journal of Global Research in Computer Science*, 5(8), 1–4.
- [5] Layeb, A., & Benayad, Z. (2014). A novel firefly algorithm based ant colony optimization for solving combinatorial optimization problems. *International Journal of Computer Science and Applications*, 2(11), 19–37.
- [6] Dorigo, M., Maniezzo, V., & Colomi, A. (1996) Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Trans Syst Man Cybern Part B (Cybernetics)*, 26(1), 29–41.
- [7] Zendaoui, Z., & Layeb, A. (2016). Adaptive Cuckoo Search Algorithm for the Bin Packing Problem. *Modelling and Implementation of Complex Systems*, 2, 107–120.
- [8] Layeb, A., & Boussalia, S.R. (2012). A Novel Quantum Inspired Cuckoo Search Algorithm for Bin Packing Problem. *Information Technology and Computer Science*, 2(5), 58–67.
- [9] Yang, X.-S. (2009). Firefly Algorithm, L'evy Flights and Global Optimization. *Research and Development in Intelligent Systems*, 2(26), 209–218.
- [10] Abdel-Basset, M., Manogaran, G., Abdel-Fatah, L., & Mirjalili, S. (2018). An improved nature inspired meta-heuristic algorithm for 1-D bin packing problems. *Personal and Ubiquitous Computing*, 2(22), 1117-1132.
- [11] Falkenauer, E. (1996). A hybrid grouping genetic algorithm for bin packing. *Journal of Heuristics*, 2(2), 5–30.
- [12] Quiroz-Castellanos, M., Cruz-Reyes, L., Torres-Jimenez, J., Gómez, S. C., Fraire Huacuja, H., & Alvim, A. C. F. (2015). A grouping genetic algorithm with controlled gene transmission for the bin packing problem. *Computers and Operations Research*, 2(55), 52–64.
- [13] Kirkpatrick, S., Gelatt, D., & Vecchi, M. P. (1983). Optimization by Simulated Annealing. *Science* 2(220), 671–680.
- [14] Gen, M., & Cheng, R. (2000). *Genetic Algorithms and Engineering Optimization*. John Wiley Sons.
- [15] Sungu, G., & Boz, B. (2015). An evolutionary algorithm for weighted graph coloring problem. In: *Proceedings of the Companion In 2015 Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation (GECCO)*, (pp. 1233–1236). ACM.

-
- [16] Boz, B., & Sungu, G. (2020). Integrated crossover based evolutionary algorithm for coloring vertex weighted graphs. *IEEE Access*, 8, 126743 – 126759.
- [17] Scholl, A., Klein, R., & Jurgens, C. (1997). BISON: a fast hybrid procedure for exactly solving the one-dimensional bin packing problem. *Computers and Operations Research*, 2(24), 627–645.

Sıfır Değerlikli Demir Nanoparçacık (nZVI) ile Renk Giderimi

Color Removal with Zero Valent Iron Nanoparticles (nZVI)

Esra ERKEN¹ 

¹ Marmara Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Göztepe Kampüsü, İSTANBUL

Özet

Bu çalışmada, laboratuvar koşullarında sentezlenen sıfır değerlikli demir nanoparçacıkların metil oranj (MO) boya çözeltisi ve gerçek tekstil atıksuyu numunesi üzerindeki renk giderim verimleri incelenmiştir. Deneysel çalışmalar neticesinde optimum nZVI konsantrasyonu 100 ppm olarak belirlenmiş, bu konsantrasyondaki nZVI ile elde edilen renk giderim verimleri 100 ppm MO çözeltisi için %92, gerçek tekstil atıksuyu için ise %96 olarak tespit edilmiştir. Gerçek tekstil atık suyu ile yürütülen çalışmalarda herhangi bir pH ayarlamasına ihtiyaç duyulmadan bu kadar yüksek renk gideriminin sağlanabilmesi nZVI teknolojisinin düşük pH ihtiyacı gösteren Fenton/Foto-Fenton proseslerine kıyasla önemli bir avantaj sağladığını göstermektedir. Renk giderimi için konvansiyonel olarak uygulanan koagülasyon prosesleri ile kıyaslandığında da nZVI teknolojisi çamur oluşumu bakımından önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: nZVI, Borohidür, Tekstil atık suyu, Renk giderimi

Abstract

In this study, color removal efficiency of laboratory synthesized iron nanoparticles on methyl orange (MO) solution and real textile wastewater have been investigated. Results have shown 100 ppm nZVI to be the optimum dosage. At this concentration, color removal efficiency for 100 ppm MO solution was determined to be 92%, whereas with the same nZVI concentration, 96% color removal was achieved for real textile wastewater. No pH adjustment was required for the studies conducted with real textile wastewater. This finding suggests that nZVI technology would be a promising alternative to Fenton/Photo-Fenton processes that require low pH values. Also, nZVI technology is likely to be superior to the conventional coagulation process as much less sludge is produced.

Keywords: nZVI, Borohydride, Textile wastewater, Color removal

I. GİRİŞ

Tekstil endüstrisi gerek üretim kapasitesi gerek çevre kirliliği bakımından ülkemizdeki en önemli endüstriyel faaliyetlerden birisi olup kullanılan ham madde çeşitliliğine bağlı olarak atıksuları oldukça karmaşık bir yapıya sahiptir. Yüksek su tüketimine sahip olan bu sektörden kaynaklanan atıksular miktar ve bileşim yönünden çok değişkendir. Özellikle boyama proseslerinden kaynaklanan atıksuların kompleks yapıları, bileşimindeki değişkenlik ve yüksek renk içeriği nedeni ile konvansiyonel sistemler ile yeterli seviyede arıtılması oldukça zordur. Dünya çapında üretilen boya miktarı kesin olarak bilinmemekle beraber 10.000 farklı boya türü için yıllık üretimin 700.000 tonun üzerinde olduğu tahmin edilmektedir [1-5]. Benzer şekilde çevreye deşarj edilen boya miktarı da kesin olarak bilinmemektedir. Yine de kaba bir yaklaşımla boyama prosesinden %10-25'lik bir kayıp olduğu, %2-20 lik bir oranın ise doğrudan alıcı ortama karıştığı tahmin edilmektedir [6].

Boyalı atıksular çok düşük konsantrasyonlarda bile alıcı ortamlarda ciddi estetik ve ekolojik problemlere yol açmaktadırlar. Renk, hem estetik açıdan hem de boyar maddelerin ve bu maddelerden çeşitli reaksiyonlar sonucu oluşabilecek yan ürünlerin (örn. benzidin, naftalin ve diğer aromatik bileşikler) canlı hayatı üzerindeki toksik etkilerinden dolayı dikkatle izlenmesi gereken bir parametredir [7,8]. Ticari olarak kullanılan sentetik boyalar yapısal farklılıklara sahip olmakla beraber global ölçekte üretilen boyar maddelerin önemli bir kısmı azo grubu boyalardır [9]. Azo türevi boyalar içerdikleri azo bağlarından dolayı parçalanmaya karşı dirençlidir ve buldukları ortamda birikme potansiyeline sahiptir. Boyar maddeler yeterli seviyede arıtılmadıkları takdirde uzun süreler çevrede bozunmadan kalabilir. Örneğin, Reaktif 19 kodlu boyanın pH 7'de 25°C'de yarılanma ömrünün 46 sene olduğu belirtilmektedir [10]. Diğer yandan renk, suyun tesis içinde yeniden kullanımı açısından da önemli bir parametredir. Avrupa Birliği (AB), ABD, İngiltere, Hindistan, Çin, Singapur gibi ülkelerde alıcı ortama deşarj edilen atıksular için kirletici parametreler arasında değerlendirilmekte ve kontrol edilmekte olan renk parametresi, ülkemizde de 24.04.2011 tarihinde Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliğinde yapılan bir düzenleme ile deşarj standartları arasına eklenmiştir. Bu nedenle tekstil endüstrisi atıksularından etkin bir şekilde renk giderimi çok önemlidir.

Tekstil endüstrisinden kaynaklanan renkli atıksuların giderimi için farklı arıtma teknolojileri uygulanmaktadır. Bu prosesler esas olarak fiziko-kimyasal prosesler, biyolojik arıtma (aerobik ve anaerobik), membran prosesler, elektrokimyasal prosesler ve ileri oksidasyon prosesleri olarak sınıflandırılmaktadır. Koagülasyon-flokülasyon, adsorpsiyon gibi yöntemlerde aslında kirleticinin sıvı fazdan kata faza geçmesi söz konusudur [11]. Biyolojik arıtma sistemleri fiziko-kimyasal yöntemlere göre daha az çamur oluşturması, daha düşük maliyetli olması gibi avantajlara sahiptir. Ancak, proses verimini artırmak amacıyla ürünlerin çeşitli kimyasal maddelere, deterjanlara, ışığa ve ısıya dayanıklı olarak üretilmesi, kullanılan kimyasalların ve boyar maddelerin de biyolojik olarak parçalanmasını zorlaştırmaktadır. Dolayısıyla, tekstil endüstrisinde kullanılan boya ve kimyasalların önemli bir kısmı biyolojik açıdan zor ayrışabilir yapıda olduğundan biyolojik arıtmayla sürdürülebilir etkin bir giderim sağlanamamaktadır [12,13]. Ülkemizdeki ve dünyadaki genel eğilim fiziko-kimyasal arıtma yöntemlerinin biyolojik sistemler ile entegre edilmesi şeklindedir. Ancak, bilhassa biyolojik olarak zor ayrışabilir karakterdeki renkli atıksularda fiziko kimyasal ve biyolojik arıtım gibi klasik arıtma sistemleri ile yeterli renk giderimi sağlanamamaktadır [6]. Ayrıca, tekstil endüstrisinde sıklıkla kullanılan bazı boya türlerinin anaerobik şartlar altında kanserojen yan ürünler oluşturduğu bilinmektedir. Bu sebeple özellikle bu tip boya maddeleri içeren atıksuların uygun arıtma yöntemleri ile toksik olmayan kararlı son ürünlere dönüştürülebilmesi gereklidir. İleri oksidasyon prosesleri serbest hidroksil radikalinin oluşumu ve kuvvetli bir oksidan olan bu radikalın boya maddeleri oksitleyerek zararsız hale getirmesi esasına dayanmaktadır. Konvansiyonel arıtma sistemlerine göre üstünlükleri bulunan ileri oksidasyon proseslerinin en önemli avantajı hemen hemen tüm atıksu tipleri için etkili ve hızlı renk giderim verimi sağlayabilmesidir. Bununla beraber Fenton ve Foto-fenton gibi proseslerde düşük pH gereksinimi ve fazla çamur oluşumu gibi dezavantajları mevcuttur. Bu prosesin uygulama açısından önemli kısıtlarından biri hidroksil radikalinin stabil olmaması nedeniyle arıtma prosesinin gerçekleştiği yerde kimyasal/ fotokimyasal yöntemlerle üretilerek sürekliliğinin sağlanması gerekliliğidir [14]. Ayrıca, uygulama maliyetlerinin oldukça yüksek oluşu ileri oksidasyon proseslerinin endüstriyel ölçekli kullanımını sınırlamaktadır. Dolayısıyla tekstil endüstrisi atıksularından renk giderimi için etkili, ekonomik ve sürdürülebilir bir arıtma teknolojisine ihtiyaç vardır.

Nanoteknolojinin su ve atıksu arıtımında karşılaşılan sorunların çözümünde önemli bir rol oynayacağı düşünülmektedir. Maddelerin nano ölçekte iken çok farklı ve üstün özellikler göstermesi prensibine dayanan bu teknoloji sayesinde yeni arıtma alternatiflerinin ortaya konması veya mevcut arıtma proseslerinin çok daha verimli ve ekonomik hale

getirilmesi söz konusudur. Nanoteknolojinin çevre uygulamaları kapsamında çeşitli nanoparçacıklar kullanılmakla beraber sıfır değerlikli demir nanoparçacık (nZVI) bu alanda kullanılan ilk nesil malzemeler arasında yer almaktadır. Hakkında oldukça fazla bilgi birikimi bulunan nZVI, kolay sentezlenebilen ve toksik etkileri açısından değerlendirildiğinde oldukça güvenilir olarak nitelendirilen bir nanoparçacıktır.

Bu çalışmanın amacı model kirleticiler olarak seçilen metil oranj boyasının nZVI nanoparçacıkları ile giderim etkinliğini araştırmaktır. Bu kapsamda farklı işletim koşulları (nZVI konsantrasyonu, boya konsantrasyonu, sıcaklık, stabilizasyon süresi) incelenmiş ve en yüksek giderimin elde edildiği şartlar tespit edilmiştir. Belirlenen optimum şartlar kullanılarak gerçek bir tekstil atıksuyundan renk giderimi incelenmiştir.

II. MATERYAL ve YÖNTEM

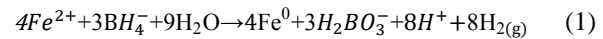
2.1. Materyal

Sodyum borohidür (NaBH_4 , %98), demir sülfat ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $\geq\%98$), metil oranj (MO, $\text{C}_{14}\text{H}_{14}\text{N}_3\text{SO}_3\text{Na}$, C.I.13025), etanol (%99.5), hidroklorik asit (HCl) ve sodyum hidroksit (NaOH) Merck firmasından, yüksek saflıkta azot gazı (N_2 , %99.9) Ankara Gaz firmasından temin edilmiştir. Tüm stok ve ara çözeltiler Millipore Milli-Q sisteminden (18 M Ω cm) elde edilen deiyonize su ile hazırlanmıştır.

2.2. Sıfır değerlikli demir nanoparçacıklarının (nZVI) sentezlenmesi

Demir nanoparçacıklar Wang ve Zang (1997) tarafından belirtilen kimyasal indirgeme yöntemine bazı modifikasyonlar uygulanarak hazırlanmıştır. Günlük olarak hazırlanmış $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ çözeltisinin kuvvetli bir indirgeyici olan NaBH_4 ile belirlenen stokiometrik oranlarda [15] karıştırılması ile (2+) değerlikli demirin sıfır değerliğe indirgenmesi sağlanmıştır (Eşitlik 1).

Tüm çözeltiler kullanılmadan önce 30 dakika boyunca N_2 gazı ile yıkanmıştır.



Reaksiyon gerçekleştikten sonra çözelti 20 dakika süreyle azot altında karıştırılmış, oluşan hidrojen gazının tamamen uzaklaşması sağlanmıştır. Günlük olarak hazırlanan nZVI parçacıkları belirlenen konsantrasyonlarda seyreltilerek kullanılmıştır.

2.3. Sentezlenen nZVI parçacıklarının karakterizasyonu

Nanoparçacıkların boyut/boyut dağılımı ile zeta potansiyeli değerleri boyut analizörü ve zeta potansiyeli ölçüm cihazı (Malvern ZS90, İngiltere) ile tespit edilmiştir. Elde edilen malzemenin kristal yapısı X-ray difraktometre (XRD, Rigaku, Almanya) cihazı ile Cu K- α radyasyon kaynağı kullanılarak

incelenmiştir. Nanoparçacıkların morfolojik yapısı geçirimli elektron mikroskobu (TEM, Hitachi HT7800) ile belirlenmiştir.

2.4. nZVI parçacıkların izoelektrik noktasının belirlenmesi

Sentezlenen nanoparçacıkların izoelektrik noktasının belirlenmesi için pH 4-11 aralığında zeta potansiyeli ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Süspansiyon halinde hazırlanan nZVI örneklerinin pH değerleri 0,1 M HCl veya 0,1 M NaOH ile ayarlanmıştır. Çoklu ışın saçınımını engellemek için ölçümler seyreltik numuneler ile yapılmıştır.

2.5. Boyar madde giderim çalışmaları

Stok MO çözeltisi uygun miktarda boyanın 1 L deiyonize su içinde çözünmesi ile hazırlanmıştır. MO boyar maddesinin nZVI ile reaksiyonu farklı MO başlangıç konsantrasyonu, nZVI konsantrasyonu, reaksiyon sıcaklığı gibi değişken koşullar altında incelenmiştir. Hedeflenen pH değerleri 0.1 N HCl veya 0.1 N NaOH ile ayarlanmış ve dijital pH metre (WTW, Almanya) ile ölçülmüştür. Deneyler, 500 mL hacimli erlen içerisinde kesikli olarak gerçekleştirilmiştir. Erlen içerisine önce deiyonize su konmuş, üzerine stok boya çözeltisinden belirlenen konsantrasyonlarda boyar madde ilave edilmiştir. nZVI parçacıkların eklenmesi ile beraber reaksiyon başladığından hedeflenen nZVI konsantrasyonunu sağlayacak şekilde stok nanoparçacık çözeltisinden belirlenen hacimler en son adımda eklenmiştir. Çözelti mekanik karıştırıcı ile 220 rpm'de oda sıcaklığında 60 dakika süre ile karıştırılmıştır. Her 15 dakikada bir reaktörden numune alınarak 0.45 µm filtre ile süzölmüştür. Gerçek tekstil atık suyu ile yapılan çalışmalarda da benzer şekilde reaktörden alınan numuneler 0.45 µm filtre ile süzölmüştür.

2.6. Analitik yöntemler

Metil oranjın UV/Visible bölgedeki spektrumu 200-750 nm aralığında UV/Vis spektrofotometre (Shimadzu 2450, Japonya) ile 1.0 cm ışık yollu quartz küvet kullanarak tespit edilmiştir. Metil oranj çözeltilerinin konsantrasyonları $\lambda = 463$ nm de ölçülen absorpsiyon değerlerinin standart çözeltiler ile elde edilen kalibrasyon eğrisinde yerine konması ile belirlenmiştir. Gerek duyulması halinde numuneler seyreltilerek ölçümler yapılmıştır. MO giderim verimi başlangıç boya konsantrasyonu ile t anındaki konsantrasyon farkından yararlanarak hesaplanmıştır (Eşitlik 2):

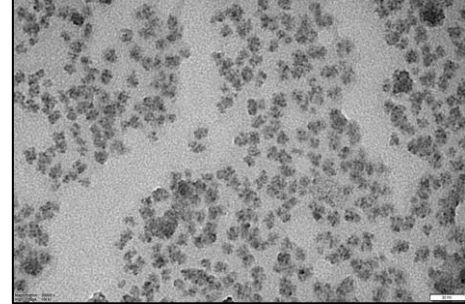
$$\% \text{Giderim} = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} \times 100 \quad (2)$$

C_0 : Başlangıç anındaki MO konsantrasyonunu, C_t : t anındaki MO konsantrasyonunu göstermektedir. Aynı koşullar altında kontrol numunesi (nZVI içermeyen MO çözeltisi) hazırlanmış ve ölçüm yapılmıştır. Reaksiyon boyunca ORP ve pH değerleri izlenerek giderim mekanizması ile ilişkilendirilmiştir.

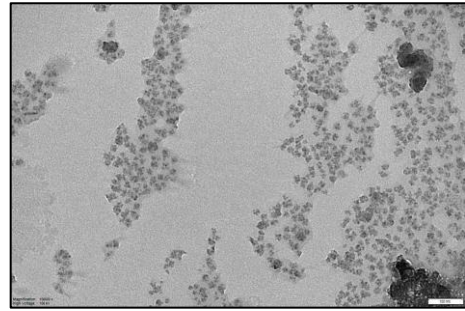
III. BULGULAR ve TARTIŞMA

3.1. Sentezlenen nZVI parçacıkların karakterizasyonu

Şekil 1'de sentezlenen nanoparçacıkların TEM görüntüleri verilmiştir. Elde edilen parçacıklar küresel şekilde olup, boyutlarının 20-50 nm aralığında olduğu gözlenmektedir. Şekil 1 (a) da nanoparçacıkların homojen bir biçimde dağıldığı gözlenirken, Şekil 1 (b) de demir nanoparçacıkların manyetik özellikleri dolayısıyla yer yer agregasyona uğramış bölgeler izlenmektedir.

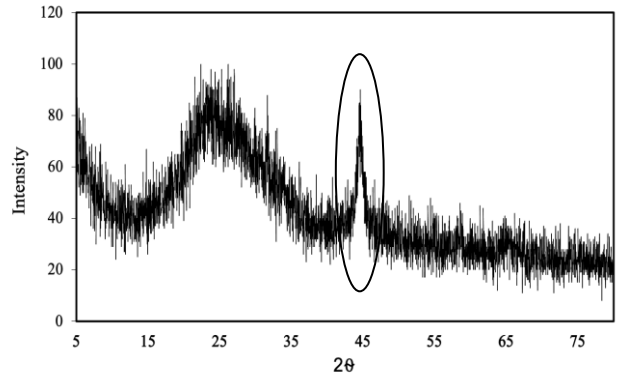


(a)



(b)

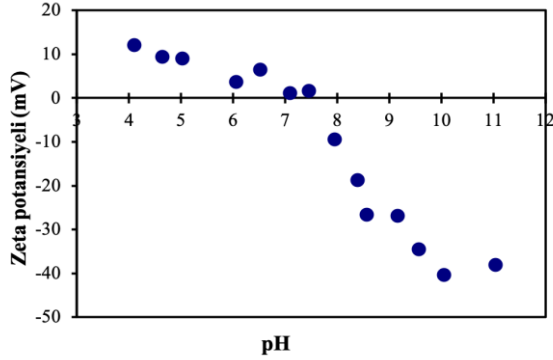
Şekil 1. nZVI parçacıkların TEM görüntüleri a) Homojen dağılmış nanoparçacıklar b) agregasyon gözlenen bölgeler



Şekil 2. nZVI parçacıklarının XRD paterni

nZVI parçacıkların XRD paterni Şekil 2'de gösterilmektedir. 44.9° de gözlenen pik sıfır değerlikli demirin varlığını kanıtlamaktadır. Pik şeklinin çok keskin olmayıp görece yaygın bir şekilde olması sentezlenen nanoparçacıkların düzensiz bir kristal yapıya sahip olduğuna işaret etmektedir.

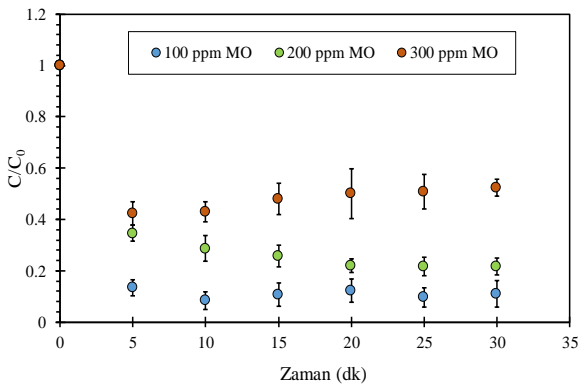
Şekil 3'de görüldüğü gibi pH 7-8 aralığı zeta potansiyelinin sıfıra yakın olduğu aralık olarak gözlenmiştir; dolayısıyla nZVI nanoparçacıkları için izoelektrik nokta yaklaşık olarak 7.5 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 3. nZVI parçacıklarının izoelektrik noktasının belirlenmesi

3.2. Başlangıç MO konsantrasyonunun etkisi

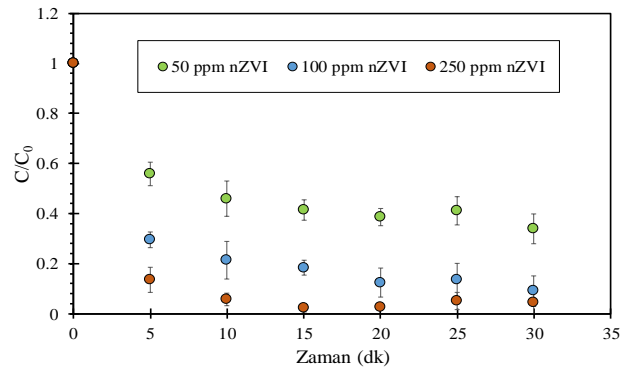
Sabit nZVI konsantrasyonunda (100 ppm) farklı metil oranj konsantrasyonlarının (100 ppm-200 ppm-300 ppm) renk giderimi üzerine etkisini incelemek amacı ile kesikli deneyler yürütülmüştür. Şekil 4'de görüldüğü üzere başlangıç Metil Oranj konsantrasyonu arttıkça renk giderim verimi azalmıştır. Reaksiyonun ilk 5 dakikada çok hızlı gerçekleştiği, ilerleyen dakikalarda ise önemli bir değişimin oluşmadığı gözlenmiştir. Reaksiyonun erken evrelerinde boya moleküllerinin adsorpsiyon etkisiyle kolaylıkla Fe⁰ yüzeyine taşındığı düşünülmektedir. Bununla beraber, demir nanoparçacık sentez reaksiyonu sonucunda oluşan H₂ kabarcıklarının su moleküllerinin ve nanoparçacıkların konveksiyonunu sağladığı, bu sayede parçacık yüzeyinde birikim oluşmadığı ve reaktivitenin uzun süre korunabildiği gözlenmiştir. İlerleyen devrelerde ise, çözelti pH sının yükseldiği, H₂ kabarcıkları oluşumunun sönümlendiği, konveksiyonun azaldığı ve Fe⁰ yüzeyindeki aktif bölgelerin korozyon ürünleri ile kaplandığı dolayısıyla reaksiyon hızında değişiklik olmadığı gözlenmiştir.



Şekil 4. Başlangıç MO konsantrasyonunun etkisi (100 ppm nZVI, pH:6)

3.3. Optimum nZVI konsantrasyonunun belirlenmesi

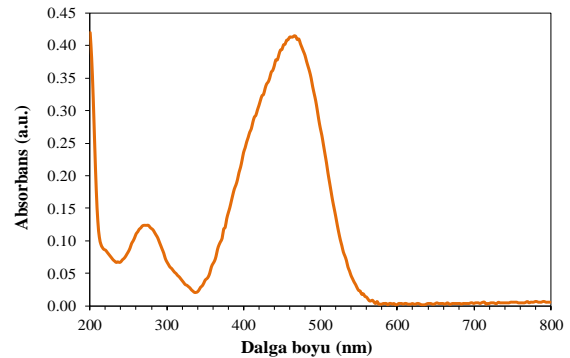
Sabit MO konsantrasyonunda (100 ppm) farklı nZVI konsantrasyonlarının (50 ppm-100 ppm-250 ppm) renk giderimi üzerine etkisini incelemek amacı ile kesikli deneyler yürütülmüştür (Şekil 5). Reaksiyon Fe-H₂O ara yüzeyinde ilerlediğinden nZVI konsantrasyonu arttıkça adsorpsiyonun gerçekleştiği aktif yüzey alanının ve buna bağlı olarak renk giderim veriminin arttığı gözlenmiştir. Şekil 5'den görüleceği üzere 10 dakikalık süre sonunda 50, 100, 250 mg/L nZVI ile sırasıyla %57, %71, %92 renk giderimi sağlanmıştır. 30 dakikalık reaksiyon sonunda 100 mg/L nZVI ile 250 mg/L nZVI konsantrasyonunun renk giderim verimleri hemen hemen aynı değere ulaşmıştır. Daha yüksek konsantrasyonda nZVI kullanmanın renk giderimi üzerinde belirgin bir iyileşme sağlamadığı görüldüğünden optimum demir konsantrasyonu 100 mg/L olarak belirlenmiştir.



Şekil 5. Optimum nZVI konsantrasyonunun belirlenmesi (MO: 100 ppm, pH:6)

3.4. Renk giderim mekanizmasının incelenmesi

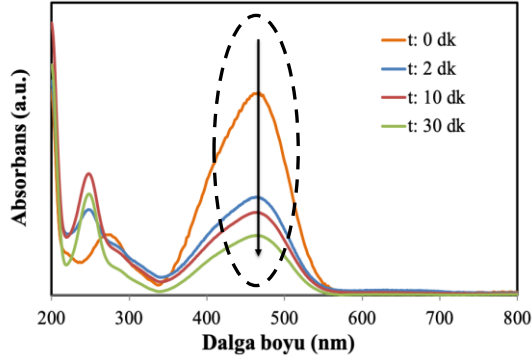
MO boyanın UV-Vis spektrumu Şekil 6'da incelendiğinde, aromatik halka yapısındaki $\pi \rightarrow \pi^*$ geçişi nedeniyle 264 nm'de, elektron sağlayıcı dimetil amino grubunun etkisindeki konjuge yapıları nedeniyle ise 464 nm de pik gözlenmektedir.



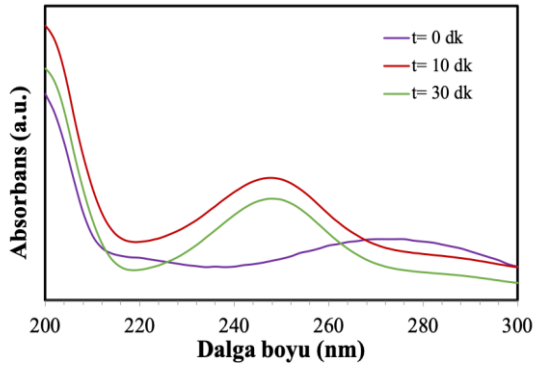
Şekil 6. Metil Oranj boyanın UV/Visible spektrumu

30 dakikalık reaksiyon süresi boyunca spektrumdaki değişim belirli zaman aralıklarında alınan numunelerle takip edilmiştir (Şekil 7). nZVI çözeltisinin eklenmesinden itibaren ilk 2 dakika sonunda 464 nm de

gözlenen pikin şiddetinin zayıfladığı, ve reaksiyon sonuna kadar azalmanın devam ettiği gözlenmiştir. Bu durum, boya molekülündeki azo bağlarının kırıldığına işaret etmektedir. Buna karşın, 248 nm de yeni bir pikin oluşumu dikkat çekmiştir (Şekil 8). Bu yeni pikin sülfanilik asit oluşumundan kaynaklandığı, dolayısıyla sülfanilik asidin bir ara ürün olarak ortaya çıktığı ön görülmektedir [16,17].



Şekil 7. Reaksiyon süresince absorban değişimi



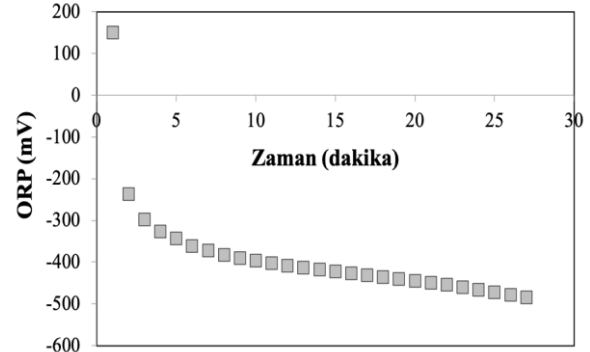
Şekil 8. Reaksiyon süresince sülfanilik asit oluşumu

nZVI nanoparçacıkların yüzey reaktiviteleri çok yüksek olduğundan çözeltideki boya molekülleri ile doğrudan reaksiyona girerek hızlı bir biçimde boyar madde giderimi sağlayabilirler. Sıfır değerlikli demir nanoparçacıkları ile su molekülü arasındaki reaksiyon sonucu oluşan H atomu azo bağının (-N=N-) kırılmasına, dolayısıyla kromofor grubunun parçalanmasına ve azo boyar maddenin konjuge sisteminin hasar görmesine neden olur. Bununla beraber, demirin korozyonu sonucu oluşan Fe^{2+} , Fe^{3+} , $Fe(OH)_y^{2-y}$ ve $Fe(OH)_x^{3-x}$ gibi bileşikler termodinamik olarak kararsız ve aktiftir [18]. Reaksiyon sırasında, demirin korozyonu ve H^+ 'nın tüketilmesi sonucunda pH'nın yükselerek 8-9 değerlerine ulaşması mümkündür. Oluşan pasif demir oksit tabakalarının metal oranj boya molekülünün sülfonik grubunu adsorplayarak renk giderimi sağladığı ön görülmektedir.

3.5. ORP profilinin değişimi

Metil oranj boya çözeltisi (100 mg/L) ile nZVI parçacıkların (100 mg/L) reaksiyonu süresince oksidasyon-redüksiyon potansiyeli (ORP) sürekli

olarak izlenmiştir (Şekil 9). ORP değerleri, pH 7 değerinde standart hidrojen elektrodu referans alınarak mV cinsinden belirtilmiştir.



Şekil 9. Reaksiyon süresince gözlenen ORP profili

Şekil 9 de belirtilen ORP profili reaksiyonun indirgen koşullar altında gerçekleştiğini göstermektedir. Reaksiyonun başlangıcında +150 mV olan ORP değeri hızlı bir şekilde -236 mV değerine düşmüştür (ilk 2 dakika içinde) ve kalan süre boyunca daha yavaş bir eğilimle -484 mV değerine ulaşmıştır. nZVI reaksiyon sisteminde ORP değerlerindeki düşüşün indirgenecik madde ve ortamdaki oksijen konsantrasyonlarının azalmasına yanı sıra Fe^{2+}/Fe^{3+} türlerinin ve H_2 oluşumunun sebebiyle meydana geldiği ön görülmektedir [19].

3.6. Gerçek tekstil atıksuyu ile yapılan çalışmalar

Marmara Bölgesi Bursa ili sınırları içinde yer alan bir tekstil fabrikasından alınan gerçek atıksu ile renk giderimi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Atıksu numuneleri 24 saatlik kompozit numuneler olarak toplanmıştır. Atıksu karakterizasyonu Tablo 1'de verilmektedir.

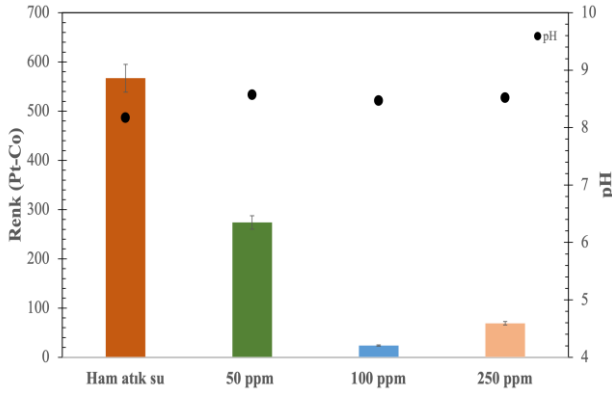
Tablo 1. Gerçek tekstil atıksuyu karakterizasyonu

Parametre	Değer	Birim
Renk	567	Pt-Co
İletkenlik	2.55	mS/cm
pH	8.17	
Askıda Katı Madde	200	mg/L

Tekstil atıksuyunun kompleks yapısı ve üretim proseslerindeki değişkenlikler göz önüne alınarak 3 farklı nZVI konsantrasyonu (50-100-250 ppm) ile gerçekleştirilen çalışmalarda 30 dakikalık reaksiyon süresi sonunda sırasıyla %52, %96 ve %88 oranında renk giderimi elde edilmiştir (Şekil 10). Sentetik boya çalışmalarına benzer şekilde en yüksek renk giderimi 100 ppm nZVI ile elde edilmiştir, bu açıdan kullanılan sentetik MO boyasının bu endüstri özelinde gerçek atıksuyu simüle etme bakımında başarılı olduğu görülmektedir. 250 ppm nZVI konsantrasyonu ile gerçekleştirilen renk giderim çalışmalarında supernatant fazında daha yüksek renk gözlenmesi, yüksek demir konsantrasyonu nedeni ile çözeltide ilave bir renk yükünün oluşabileceğine işaret etmektedir.

Hem bu açıdan, hem fizibilite açısından değerlendirildiğinde 100 ppm nZVI optimum konsantrasyon olarak tespit edilmiştir.

Reaksiyon süresince pH sürekli olarak izlenmiş, her üç nZVI konsantrasyonu için de pH değerinin ham atıksuyun pH'ı 8.56 değerinden önemli bir sapma göstermediği belirlenmiştir. Reaksiyonun verimli bir şekilde gerçekleşmesi için pH ayarlanmasına ihtiyaç duyulmaması demirin kullanıldığı Fenton/Foto-Fenton gibi proseslere kıyasla önemli bir üstünlük sağlamaktadır. Yine renk giderimi amacıyla demir tuzlarının kullanıldığı koagülasyon prosesine kıyasla nano boyutta bir malzemenin kullanılması çamur oluşumunu da önemli ölçüde azaltmaktadır.



Şekil 10. Gerçek tekstil atıksuyu ile gerçekleştirilen çalışmalarda renk giderimi ve pH değişimi

IV. SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRMELER

Bu çalışmada, sıfır değerlikli demir nanoparçacıklar borohidür indirgeyici maddesi eşliğinde kimyasal indirgeme yöntemi ile sentezlenmiş ve karakterize edilmiştir. 20-50 nm aralığında elde edilen parçacıklar geçirimli elektron mikroskobu (TEM) ile incelenmiş ve morfolojik olarak küresel olduğu belirlenmiştir. Sentezlenen nanoparçacıklar kullanılarak azo grubu boyar maddelerinden Metil Oranj ile hazırlanmış sentetik çözülden renk giderimi incelenmiştir. Farklı nZVI ve MO konsantrasyonlarında gerçekleştirilen kesikli denemelerde optimum nZVI konsantrasyonu 100 ppm olarak belirlenmiştir. 100 ppm nZVI ile yürütülen deneylerde pH 6 değerinde MO için en yüksek giderim oranı %92 olarak tespit edilmiştir. Gerçek tekstil atıksuyu ile yapılan çalışmalarda herhangi bir pH ayarlaması yapılmaksızın 100 ppm nZVI ile %96 oranında renk giderimi sağlanmıştır. Sıfır değerlikli demir nanoparçacıkları ile su molekülü arasındaki reaksiyon sonucu oluşan H atomunun azo bağının (-N=N-) kırılmasına neden olduğu ve bu sayede renk gideriminin sağlandığı belirlenmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Marmara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi FEN-C-YLP-110915-0440 projesinin finansal desteği ile gerçekleştirilmiştir.

Deneyisel çalışmaların gerçekleştirilmesindeki katkılarından dolayı Elif Tekev'e teşekkürlerimi sunarım.

KAYNAKLAR

- [1] Baban, A., Yediler, A. and Ciliz, N.K. (2010). Integrated water management and CP implementation for wool and textile blend processes. *Clean-Soil Air Water*, 38, 84-90.
- [2] Soloman, P.A., Basha, C.A., Velan, M., Ramamurthi, V., Koteeswaran, K. and Balasubramanian, N. (2009). Electrochemical Degradation of Remazol Black B Dye Effluent. *Clean-Soil Air Water*, 37, 889-900.
- [3] Sponza, D., Işık, M. and Atalay, H. (2000). İndigo boyar maddelerinin anaerobik arıtılabilirliklerinin incelenmesi. *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen Mühendislik Dergisi* 2.
- [4] Kaykioğlu, G. and Debik, E. (2006). Anaerobik arıtım prosesleri ile tekstil atıksularından renk giderimi. *Journal of Engineering and Natural Sciences Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 4, 59-68.
- [5] Gomez, V., Larrechi, M.S. and Callao, M.P. (2007). Kinetic and adsorption study of acid dye removal using activated carbon. *Chemosphere*, 69, 1151-1158.
- [6] Forgacs, E., Cserhati, T. and Oros, G. (2004). Removal of synthetic dyes from wastewaters: a review. *Environment International*, 30, 953-971.
- [7] Suteu, D., Zaharia, C., Bilba, D., Muresan, A., Muresan, R. and Popescu, A. (2009). Decolorization wastewaters from the textile industry – physical methods, chemical methods. *Industria Textila*, 60, 254-263.
- [8] Zaharia, C., Suteu, D., Muresan, A., Muresan, R. and Popescu, A. (2009). Textile wastewater treatment by homogenous oxidation with hydrogen peroxide. *Environmental Engineering and Management Journal*, 8, 1359-1369.
- [9] Seesuriyachan, P., Takenaka, S., Kuntiya, A., Klayraung, S., Murakmi, S. and Aoki, K. (2007). Metabolism of azo dyes by *Lactobacillus casei* TISTR 1500 and effects of various factors on decolorization. *Water Research*, 41, 985-992.
- [10] Hao, O.J., Kim, H. and Chang, P.C. (2000). Decolorization of wastewater. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 30, 449-505.
- [11] Dutta, K., Mukhopadhyay, S., Bhattacharjee, S. and Chaudhuri, B. (2001). Chemical oxidation of methylene blue using a Fenton-like reaction. *J. Hazard. Mater.*, 84, 57-71.
- [12] Allègre, C., Moulin, P., Maisseu, M. and Charbit, F. (2006). Treatment and reuse of reactive dyeing effluents. *Journal of Membrane Science*, 269, 15-34.
- [13] Uzal, N. (2007). Recovery and reuse of indigo dyeing wastewater using membrane technology. *ODTÜ, Ankara*.

-
- [14] Hilal, N.M. (2011). Treatment of Reactive Dyeing Wastewater by Different Advanced Oxidation Processes. *Der Chemica Sinica*, 2, 262-273.
- [15] Erdim, E., Badireddy, A.R. and Wiesner, M.R. (2015). Characterizing reactive oxygen generation and bacterial inactivation by a zerovalent iron-fullerene nano-composite device at neutral pH under UV-A illumination. *Journal of Hazardous Materials*, 283, 80-85.
- [16] Fan, J., Guo, Y., Wang, J. and Fan, M. (2009). Rapid decolorization of azo dye methyl orange in aqueous solution by nanoscale zerovalent iron particles. *Journal of Hazardous Materials*, 166, 904-910.
- [17] Chen, J.W., Xiu, Z.M., Lowry, G.V. and Alvarez, P.J.J. (2011). Effect of natural organic matter on toxicity and reactivity of nano-scale zero-valent iron. *Water Research*, 45, 1995-2001.
- [18] Sohn, K., Kang, S.W., Ahn S., Woo, M. and Yang, S.K. (2006). Fe(0) nanoparticles for nitrate reduction: stability, reactivity, and transformation, *Environ. Sci. Technol.*, 40, 5514–5519.
- [19] Shi, Z., Nurmi, J.T. and Tratnyek, P.G. (2011). Effects of Nano Zero-valent iron on Oxidation-Reduction Potential. *Environ. Sci. Technol.*, 45, 1586-1592.

Lojistik Performans İndeks: Türkiye-Avrupa Birliği Karşılaştırması

Logistics Performance Index: Comparison of Turkey and European Union

Mehmet Fatih ACAR¹ 

¹İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Uluslararası Ticaret ve İşletmecilik Bölümü, İzmir, Türkiye

Öz

Küreselleşme ile birlikte, lojistik faaliyetlerin önemi hem ülkeler hem de şirketler için artmıştır. Özellikle hükümetler, son yıllarda bu konuda kendilerini geliştirmeye çalışmaktadırlar. Bu sebepten dolayı, Dünya Bankası ülkelerin lojistik faaliyetleri ile ilgili olarak 2007 yılından beri Lojistik Performans İndeksi (LPI)'ni yayınlamaktadır. LPI'nin "gümrük", "altyapı", "uluslararası sevkiyat", "lojistik hizmetlerinin kalitesi", "izleme / takip" ve "zamanındalık" olmak üzere altı farklı alt boyutu vardır. Çalışmanın amacı, Türkiye ile Avrupa Birliği (AB) üye ülkeleri arasında lojistik etkinlik kıyaslaması yapmaktır. Bu araştırmada, 2007 yılından beri yayınlanan altı farklı LPI'ye göre, Türkiye ile AB ülkeleri için Veri Zarflama Analizi (VZA) ve Malmquist yöntemi ile etkinlik analizi yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda, AB üye ülkeleri ile kıyaslandığında, Türkiye'nin etkinlik değerinin yıllar içinde dalgalı bir seyir izlediği sonucuna varılmıştır. Türkiye, LPI'nin tüm alt boyutlarını iyileştirme adına gerekli teknik ve hukuki düzenlemeleri yapmalıdır.

Anahtar Kelimeler: Tedarik Zinciri, Lojistik, Lojistik Performans İndeksi, Türkiye, Veri Zarflama Analizi (VZA)

Abstract

With globalization, the importance of logistics and logistics activities has increased for both countries and companies. Governments in particular have been trying to improve themselves in this regard in recent years. For this reason, the World Bank has been publishing the Logistics Performance Index (LPI) since 2007 regarding the logistics activities of the countries. LPI has six different sub-dimensions: "customs", "infrastructure", "ease of shipment arrangement", "quality of logistics services", "monitoring and tracking" and "timeliness". The purpose of the study is to make the comparison between logistic efficiencies between Turkey and the European Union (EU) member countries. In this research, according to six different indexes published since 2007, Data Envelopment Analysis (DEA) and Malmquist efficiency analysis method has been applied for by the EU countries and Turkey. As a result of the study, compared to the EU member states, over the years it has concluded that the value of Turkey's activity fluctuated. Turkey should make the necessary technical and legal arrangements to optimize the size of all sub-LPI dimensions.

Keywords: Supply Chain, Logistics, Logistics Performance Index, Turkey, Data Envelopment Analysis (DEA)

I. GİRİŞ

Küresel ticaret son yıllarda oldukça gelişme göstermiştir. Ülkelerin birbirleriyle olan ticari ilişkileri eskiye göre oldukça ilerlemiş, bu durum lojistik kavramının önemini artırmıştır [1,2]. Hızla gelişen süreçte ürün ve hizmetlerin lojistiği konusu, şirketlerin ve devletlerin ciddi olarak yatırım yapmasına neden olmuştur. Ülkeler arasındaki entegrasyon, tedarik zincirlerinin de birbirleri ile bağlantısını ortaya çıkarmış ve artan rekabet ile birlikte organizasyonlar, lojistik alanındaki yetkinliklerini geliştirmeye çalışmışlardır [3].

Modern lojistik, küreselleşme süreçlerinden büyük ölçüde etkilenmiştir. İlk zamanlarda lojistik sadece taşımacılık ile ilişkilendirilirken, artık depo yönetimi, gümrüklerdeki işleyiş, karma taşımacılık, üretim yönetimi, tersine lojistik gibi kavramları da kapsamaya başlamıştır. Günümüzde birçok ülke lojistik operasyonlarına önem vermeye ve bu alandaki performanslarını değerlendirmeye başlamıştır.

Bir ülkedeki lojistik operasyonları hem mikro düzeyde, hem de makro ölçekte değerlendirmek mümkündür. Mikro düzeyde, ülke firmalarının faaliyetleri göz önünde bulundurulurken, makro ölçekte ise o ülkedeki genel lojistik faaliyetler değerlendirilir. Literatürde konu ile ilgili farklı bakış açıları oluşmuş ve lojistik performansın nasıl ölçülebileceği konusunda çeşitli fikirler öne sürülmüştür [4,5]. Özellikle makro düzeyde politikacıların ve bürokratların lojistik performanslarını değerlendirmek için karşılaştırmalı verilere ihtiyaç duyması sebebiyle Dünya Bankası tarafından 2007 yılında Lojistik Performans İndeksi (LPI) oluşturulmuştur. LPI, ülkelerin ticari faaliyetlerinde önemli yer tutan lojistik operasyonları ile ilgili karşılaştıkları olası zorlukları ve fırsatları belirlemek için kullanabilecekleri ciddi bir veri kaynağı olmuştur. İndeks sayesinde, ülkeler kendilerini istedikleri veya ticaret

yaptıkları herhangi bir ülke ile kolayca karşılaştırma yapabilmektedirler. LPI 2010, 2012, 2014, 2016 ve 2018 yıllarında güncellenmiştir [6]. Tüm indeksler dünyadaki yaklaşık 150 ülke için bir sıralama içermektedir. Her ülkenin puanlarını belirlemek için, lojistik alanındaki profesyonellerden, ülkeleri altı farklı değişkene göre puanlamaları istenir. Bu alt boyutlar; “gümrükler”, “altyapı”, “uluslararası sevkiyat”, “lojistik hizmetlerin kalitesi”, “izleme / takip” ve “zamanında teslimat”tır. Uygulanan ankette 1 en düşük performansı, 5 ise mükemmel performansı göstermektedir.

Bu çalışmada, Türkiye ile Avrupa Birliği’ne (AB) üye ülkeler arasında Veri Zarflama Analizi (VZA) ve Malmquist İndeks (Mİ) yöntemleri ile ülkelerin lojistik etkinliklerinin karşılaştırması yapılmıştır. Bu değerlendirmeler, indeksin ilk yayınlandığı tarih olan 2007 yılı ile ve son yayınlanma tarihi olan 2018 yılı periyodunu kapsamaktadır. Çalışmada temel olarak cevapları aranan sorular şunlardır; i) Türkiye’nin lojistik etkinliği süreç içinde nasıl değişmiştir? ii) Türkiye ile AB ülkeleri kıyaslamasında, Türkiye yükselen bir lojistik etkinlik performansına sahip midir? iii) Türkiye, lojistik etkinliğini artırmak adına hangi alanlara öncelik vermelidir?

Makalenin devamı şu şekilde düzenlenmiştir; 2. bölümde ise konuyla ilgili literatüre değinilmiştir. 3. bölümde Veri Zarflama Analizi ile Malmquist İndeks yöntemlerinden bahsedilmiştir. 4. bölümde analiz sonuçları gösterilmiş, 5. bölümde ise sonuçlar tartışılmıştır. Son kısım olan 6. bölüm ise sonuçtur.

II. LİTERATÜR TARAMASI

LPI, Dünya Bankası tarafından 2007, 2010, 2012, 2014, 2016 ve 2018 tarihlerinde altı defa yayınlanmıştır. İndeks ülkelerin lojistik performansları ile ilgili detaylı ve kapsayıcı yorumlar çıkarılabilecek bilgiler içermektedir. Altı farklı alt boyutu olan indeksin, her bir değişkeni ayrı önem arz etmektedir. Yukarıda da bahsedildiği üzere, bu alt boyutlar; “gümrükler”, “altyapı”, “uluslararası sevkiyat”, “lojistik hizmetlerin kalitesi”, “izleme / takip” ve “zamanında teslimat”tır. “Gümrükler”, sınırlar ve gümrüklerdeki işlemlerin kalite seviyesini ifade eder. “Altyapı”, yol ve köprü gibi lojistik altyapının verimliliğini, “uluslararası sevkiyat”, ise rekabetçi fiyatlar ile sevkiyat hizmetlerine ulaşma yeteneğini gösterir. “Lojistik hizmetlerin kalitesi”, gümrük müşavirliği gibi lojistik faaliyetlerin kullanım kolaylığı anlamına gelir. “Takip / izleme” ise gönderileri kontrol etme yeteneğini ifade eder. Son olarak, “zamanında teslimat”, gönderiler için beklenen teslimat sürelerinin tutarlı olup olmadığını gösterir. İstatistiksel yöntemler kullanılarak, yukarıda belirtilen her boyut için tek bir veri sağlanır [6].

Lojistik operasyonların verimliliklerinin analizi, literatürde önemli bir araştırma alanını oluşturmaktadır.

Birçok araştırmacı, karayolu, havayolu ve demiryolu gibi farklı ulaşım türlerinde verimlilik ölçümü üzerinde çalışmıştır [7, 8, 9, 10, 11, 12]. Çok sayıda makale, lojistik verimlilikleri mikro düzeyde değerlendirirken, az sayıda çalışma lojistik operasyonların performansını makro düzeyde değerlendirmiştir [13]. Mikro düzeydeki analiz, firma özelinde etkinliğe odaklanırken, makro ölçekteki analiz, ülkelerin lojistik performansını değerlendirmektedir.

LPI, ülkelerin lojistik faaliyetlerine ilişkin geniş bir perspektif yelpazesi sunar [6]. Önceden bahsedildiği üzere LPI, Dünya Bankası tarafından 2007 yılından beri yayınlanmaktadır ve farklı çalışmalarda kullanılmaktadır [1, 13]. Örneğin, Marti ve ark. (2017), ülkelerin lojistik verimliliklerini ölçmek ve gelir ile coğrafi bölgelerin etkinlik üzerindeki etkisini test etmek için VZA ve Varyans Analizi’ni (ANOVA) kullanmışlardır. VZA analizinde “gümrük”, “altyapı” ve “lojistik kalite” gibi üç LPI alt boyutu girdi olarak değerlendirilirken, diğer boyutlar olan, “uluslararası sevkiyat”, “takip / izleme” ve “zamanında teslimat” çıktı olarak ele alınmıştır. Çalışmada, lojistik performans ile gelir ve coğrafi alan arasında önemli bir ilişki bulunmuş, analizler yüksek gelirli ülkelerin en iyi performans gösteren grupta olduğunu göstermiştir [1]. Ayrıca Ekici ve ark. (2019), Küresel Rekabet İndeksi’nin (KRİ) rekabet gücü sütunlarının LPI üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Analiz sonuçlarına göre teknolojik hazırlık, yüksek öğrenim / eğitim, yenilikçilik ve altyapının ülkelerin lojistik performansını iyileştirmek için önemli faktörler olduğu bulunmuştur [14].

Bazı araştırmalar; LPI ile farklı matematiksel teknikleri kullanılarak, lojistik performansı ulusal ve küresel düzeyde analiz etmişlerdir. Quariguasi vd. (2009), karlılık ve çevresel etkiler arasındaki ilişkiyi göz önünde bulundurarak Almanya’daki lojistik ağları ve verimliliklerini incelemiştir [15]. Ekici vd. (2016), Yapay Sinir Ağları’nı (YSA) kullanarak lojistik performans ile Küresel Rekabet İndeksi (KRİ) arasındaki ilişkiyi araştırmıştır. Bu çalışmada, Türkiye için, ülkenin lojistik performansını artırmada en önemli etkenin sabit geniş bant internet altyapısı olduğu bulunmuştur. Bunun nedeni, sabit geniş bant internet altyapısının, lojistiğin artan önemiyle ciddi biçimde ilişkili olmasıdır. Aynı zamanda bu araştırma; ülkelerin kaynaklarını, lojistik rekabet güçlerini artırmak için nasıl kullanılabileceğini göstermiştir [16]. Kabak vd. (2020) Kısmi En Küçük Kareler (PLS) yöntemini kullanarak, bir ülkenin lojistik performansı ile rekabet gücü arasındaki ilişkiyi araştırmıştır. Çalışma, “iş gelişmişliği”, “finansal piyasa geliştirme”, “altyapı” ve “iyi pazar verimliliği” ve “yüksek öğretim” in önemine işaret etmiştir [17]. Stojanović ve Ivetić (2020) ise uluslararası ticaretteki teslimat yöntemlerinin LPI puanlarını nasıl etkilediğini göstermiştir [18].

Bütün bunlara ek olarak, az sayıda da olsa Türkiye ve LPİ üzerine yapılan çalışmalar mevcuttur. Birçok araştırmacı Türkiye'nin LPİ puanlarını inceleyerek, yapılması gereken hususları tartışmışlardır [19,20]. Uca vd. (2015) çalışmasında Gayri Safi Yurt İçi Hasıla (GSYİH) ile LPİ arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Araştırmada LPİ'nin alt boyutları olan "gümrüklerin ve gümrükleme süreçlerinin verimliliği" ve "ticaret ve taşımacılıkla ilgili altyapı kalitesi" ile GSMH arasında istatistiksel olarak anlamlı ilişki bulunmuştur [21]. Bazı çalışmalarda, LPİ baz alınarak Türkiye farklı ülkeler ile karşılaştırılmıştır. Orhan (2019), Türkiye ile AB ülkeleri arasında LPİ sonuçlarına göre bir karşılaştırma yapmış ve bunun için Entropi ağırlıklı Edas yöntemini kullanmıştır [22]. Güngör ve diğerleri (2019) LPİ ve lojistik faaliyetlerin Akdeniz ülke ekonomileri ile ilişkisini incelemişler ve ülkelerin "altyapı" ve "gümrük" boyutlarına önem vermeleri halinde daha yüksek seviyede Gayri Safi Yurtiçi Hasıla'ya (GSYİH) sahip olabileceklerini vurgulamışlardır [23]. Pekmezci ve Mutlu (2018) yaptıkları bibliyometrik analizde, LPİ alanında Türkiye ile ilgili yapılmış araştırmaları incelemişler ve detaylı olarak konu ile ilgili geniş bir literatür taraması sunmuşlardır [24]. Sonuç olarak, literatürde, LPİ ve Türkiye ile ilgili yapılan araştırmalar çok fazla değildir. Son yıllarda, çeşitli istatistik yöntemleri kullanılarak LPİ bazlı Türkiye ile diğer ülkeler arasında karşılaştırma yapan akademik makalelerin sayısı artmaktadır. Bu araştırma ile, Türkiye için, lojistik etkinlik analizi alanında olan farklı ülkeler ile karşılaştırmalı bir değerlendirme ihtiyacının giderileceği düşünülmektedir.

III.YÖNTEM

VZA, matematiksel programlamaya dayalı etkinlik ölçüm algoritmasıdır. Farklı türdeki ve birimdeki değişkenlerin girdi ve çıktı olarak düşünülebildiği bir sisteme sahiptir. Bu sebep ile birçok araştırmada VZA yöntemi kullanılmaktadır. VZA'da etkinlikleri ölçülmeye çalışılan öğeler karar verme birimi (KVB) olarak adlandırılır. VZA, göz önünde bulundurduğu KVB'lerin girdilerine ve çıktılarına göre en etkin öğeyi bulur. En etkin KVB'nin puanı 1'dir. Karşılaştırmalı olarak diğer KVB'ler için de 0-1 aralığında bir etkinlik puanı hesaplar. VZA, etkin ve daha az etkin birimleri belirlemek için bir sınır (frontier) belirleyerek, KVB'ler arasında karşılaştırma yapılmasını sağlar. Bütün bunlara ek olarak, VZA her bir KVB için olması gereken girdi ve çıktı düzeyi hakkında da bilgi verir.

Literatürde genelde kullanılan iki VZA çeşidi, CCR (Charnes ve diğerleri, 1978) ve BCC (Banker ve diğerleri, 1984) modelleridir [25,26]. CCR modeli ölçeğe göre sabit getiriyi göz önünde bulundururken, BCC modeli ölçeğe göre değişken getiriyi varsayar. VZA, aynı zamanda girdi ve çıktı odaklı olarak ikiye ayrılmaktadır. Eğer bir KVB'yi etkin duruma getirmek için girdiler üzerinde bir değişiklik yapmak daha uygunsa girdi odaklı, eğer çıktılar üzerinde değişiklik yapmak daha olası ise çıktı odaklı model kullanılır.

Bu çalışmada, genel verimlilik dikkate alındığı ve ölçeğe göre sabit getiri varsayıldığı için CCR modeli kullanılmıştır. BCC modeli ise saf teknik verimliliği önemsemekte ve ölçeğe göre değişken getiriler varsaymaktadır. Bununla birlikte, lojistik performansın mevcut girdilerle nasıl artırılacağını belirlemek daha anlamlı olduğu için çalışmada çıktı odaklı VZA modeli sonuçlarına bakılmıştır.

Temel VZA-CCR modelini matematiksel olarak göstermek için, her bir karar verme biriminin (KVB'ler) belirli bir teknoloji seviyesinde n çıktının üretimi için m girdi kullandığını varsayalım. X_{ij}, j'inci KVB'nin (j = 1, 2, ..., k) m adet girdisinin i'inci (i = 1, 2, ..., m) girdisini gösterirken, Y_{sj} ise, j'inci KVB (t = 1, 2, ..., k) tarafından üretilen n adet çıktının s'inci (s = 1, 2, ..., n) çıktısını temsil eder. U_r (r = 1, 2, ..., n) ve W_i (i = 1, 2, ..., m) değişkenleri sırasıyla her çıktının ve girdinin ağırlıklarıdır. KVB(O)'ın verimliliği şu şekilde yazılabilir Herhangi bir karar biriminin verimliliği ağırlıklandırılmış çıktı toplamlarının, ağırlıklandırılmış girdi miktarına oranıdır. Verimliliğin matematiksel model olarak gösterimi aşağıda verilmiştir.

$$Max = \frac{\sum_{r=1}^n u_r Y_{r0}}{\sum_{i=1}^m w_i X_{i0}} = 1 \quad (1)$$

$$\frac{\sum_{r=1}^n u_r Y_{rj}}{\sum_{i=1}^m w_i X_{ij}} \leq 1 \quad j = 1, 2 \dots k \quad (2)$$

$$u_r \text{ ve } w_i \geq 0 \quad (r = 1, 2, \dots, n) \text{ ve } (i = 1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

CCR modeli ise aşağıda gösterilmiştir. Bu algoritmada en etkin KVB'nin puanı 1 olarak düşünülmüştür. [25,27].

$$Max = \sum_{r=1}^n \mu_r Y_{r0} \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^m w_i X_{i0} = 1 \quad \text{Kısıtlar ;} \quad (5)$$

$$\sum_{r=1}^n \mu_r Y_{rj} - \sum_{i=1}^m w_i X_{ij} \leq 0 \quad (6)$$

$$\mu_r \text{ ve } w_i \geq 0 \quad (r = 1, 2, \dots, n) \text{ ve } (i = 1, 2, \dots, m) \quad (7)$$

Malmquist İndeksi (Mİ) ise bir KVB'nin iki farklı zaman periyodu arasındaki verimlilik değişimini gösterir. Mİ'yi hesaplamak için "Yakalama" ve "Sınır Değiştirme" değişkenleri kullanılır. İki farklı değişkenin formülleri aşağıda verilmiştir. Mİ ile iki farklı zaman dilimindeki KVB'leri aynı etkinlik sınırı ile değerlendirme imkanı doğmaktadır. Mİ'nin 1'den büyük olması, zaman içinde etkinliğin arttığını, 1'e eşit olması zaman içinde etkinliğin değişmediğini, 1'den küçük olması ise zaman içinde etkinliğin azaldığını gösterir. [28].

$$Yakalama Etkisi = \frac{KVB(O)'in t2 zamanındaki verimliliği}{KVB(O)'in t1 zamanındaki verimliliği} \quad (8)$$

$$A1 = \frac{KVB(O)'in t1 zamanındaki girdiler ile t1 verimlilik sınırına göre verimliliği}{KVB(O)'in t1 zamanındaki girdiler ile t2 verimlilik sınırına göre verimliliği} \quad (9)$$

$$A2 = \frac{KVB(O)'in t2 zamanındaki girdiler ile t1 verimlilik sınırına göre verimliliği}{KVB(O)'in t2 zamanındaki girdiler ile t2 verimlilik sınırına göre verimliliği} \quad (10)$$

$$Sınır Değiştirme Etkisi = \sqrt{A1 * A2} \quad (11)$$

$$Mİ = Yakalama Etkisi * Sınır Değiştirme Etkisi \quad (12)$$

IV.BULGULAR

Araştırmada CCR-çıkıtı tabanlı VZA sonuçları DEA-Solver 13 yazılımı ile bulunmuştur. Literatürde yer aldığı ve bazı etkinlik araştırmalarında tavsiye edildiği üzere [1,15], LPI'nin altı farklı boyutundan "gümrükler", "altyapı" ve "lojistik hizmetlerin kalitesi" girdi olarak, "uluslararası sevkiyat", "izleme / takip" ve "zamanında teslimat" ise çıktı olarak düşünülmüştür. Çünkü girdi olarak düşünülen kriterler genellikle bir ülkenin lojistik performansına etki eden faktörlerdir. Bununla birlikte, çıktı olarak varsayılan LPI alt değişkenleri ise ülkelerin lojistik performans göstergeleri olarak değerlendirilmeye daha yatkındır. LPI verileri 2007 ile 2018 yılları arasında yayınlandığı için ayrıca Malmquist İndeks (Mİ) değerleri de hesaplanmıştır. Veri olarak AB'ye üye ülkeler ile Türkiye'nin LPI değerleri göz önünde bulundurulmuştur. Literatürde yer aldığı ve tavsiye edildiği üzere [1]; girdiler için tekdüze azalan bir dönüşüm (beş eksi orijinal değerler) uygulanmıştır. Çünkü VZA; ağırlıklı çıktılarının ağırlıklı girdiye oranı üzerinden etkinlik puanlarını hesaplamaktadır. Girdiler için normal değerler alınırsa, yüksek girdi puanları nedeniyle verimli ülkeler verimsiz olarak görülebilir.

Tablo 1'de 2007-2018 yılları arasındaki en etkin beş ülke listelenmiştir. İlk beş sıralama her sene için değişmekle birlikte bazı ülkelerin performansı göze çarpmaktadır. Almanya, Hollanda, İsveç ve Belçika çoğunlukla en etkin beş ülke arasında yer almış ve özellikle Almanya birçok defa en etkin ülke olarak kendini göstermiştir. Tablo 2'de ise etkinlik olarak en düşük beş ülke sıralanmıştır. Tablo 1'de olduğu gibi sıralamalar her sene değişmiştir. Bununla birlikte, Romanya, Letonya ve Yunanistan gibi bazı ülkeler sık sık son beş ülke arasında yer almıştır. Özellikle Yunanistan 2010 ve 2012 yıllarında AB'ye üye ülkeler arasında etkinlik değeri en düşük ülke olmuştur.

Tablo 3'te Türkiye özelinde detaylı bilgiler verilmiştir. Her bir yıl için etkinlik değerlerine bakıldığında Türkiye'nin performansı dalgalı bir seyir izlemiştir. Etkinlik değerlerine bakarak genel olarak bir düşüş veya yükselişten bahsetmek mümkün değildir. Bu konu hakkında Mİ değerleri fikir verebilir. Tablo 3'teki Mİ1 değeri ardışık yıllar için olan ilişkiyi, Mİ2 değeri ise 2007'den 2018'e direkt ilişkiyi ifade eder. Tablo 3'te görüleceği üzere Mİ2 değeri 0,89'dur. Bu durum 2007 yılından 2018'e gelindiğinde Türkiye'nin etkinliğinin düştüğünü göstermektedir. Kısacası yıllar içinde Türkiye lojistik etkinlik anlamında olumlu bir gelişme gösterememiştir. Etkinlik puanına göre sıralamaya bakıldığı zaman, bu bulgu desteklenmektedir. Sıralamada Türkiye 2007'de 19. sırada iken 2018'de 26. sıradadır. Mİ1 puanları ise Türkiye'nin bir önceki zaman periyoduna göre etkinliğinin değişimini verir. Tablo 3'te Mİ1 değerinin 2010 yılında 0,97 olması, Türkiye'nin lojistik etkinliğinin 2010 yılında 2007'ye göre daha düşük olduğunu gösterir. Türkiye için Mİ1 değerlerine bakıldığı zaman, sadece 2012 ve 2014 yıllarında 1'den büyük olmuştur. Bu sonuç, Türkiye'nin 2010-2012 ve 2012-2014 yılları arasında görece lojistik etkinliğinin yükseldiğini ifade eder. Fakat, diğer tüm Mİ1 değerleri 1'in altındadır. Kısacası 2012 ve 2014 yılı hariç, Türkiye bir önceki yıla göre daha az etkin olmuştur.

Tablo 4'te, 2007-2018 yılları arasında LPI'nin tüm alt boyutları için VZA sonuçlarına göre Türkiye için iyileştirme oranları verilmiştir. Tablodaki ilk üç değişken girdiler, son üç değişken ise çıktılardır. "Gümrük" ve "lojistik hizmetlerin kalitesi" girdileri bazı yıllarda iyileştirmeye ihtiyaç duymasa bile, 2007-2018 yılları arası ortalamasına bakıldığında her girdinin azaltılması gerekmektedir. Bununla birlikte, her bir çıktının da 2007-2018 yılları arasında ortalama olarak artırılması gerekmektedir.

Tablo 1. Yıllara göre lojistik etkinlik değeri en yüksek beş ülke

2007		2010		2012		2014		2016		2018	
Ülkeler	Etk. Değ.	Ülkeler	Etk. Değ.	Ülkeler	Etk. Değ.	Ülkeler	Etk. Değ.	Ülkeler	Etk. Değ.	Ülkeler	Etk. Değ.
Hollanda	1,00	Almanya	1,00	Danimarka	1,00	Belçika	1,00	Almanya	1,00	Almanya	1,00
Almanya	0,94	Lüksemburg	1,00	Finlandiya	1,00	Almanya	1,00	Hollanda	1,00	İsveç	0,97
Danimarka	0,92	İsveç	1,00	Almanya	1,00	Hollanda	1,00	İsveç	0,99	Danimarka	0,84
İsveç	0,88	Hollanda	0,99	Hollanda	0,97	Birl. Krl.	0,90	Avusturya	0,90	Belçika	0,82
Avusturya	0,88	Belçika	0,93	Belçika	0,93	İsveç	0,86	Lüksemburg	0,87	Hollanda	0,81

Tablo 2. Yıllara göre lojistik etkinlik değeri en düşük beş ülke

2007		2010		2012		2014		2016		2018	
Ülkeler	Etk. Değ.	Ülkeler	Etk. Değ.	Ülkeler	Etk. Değ.	Ülkeler	Etk. Değ.	Ülkeler	Etk. Değ.	Ülkeler	Etk. Değ.
Romanya	0,33	Hırvatistan	0,33	Letonya	0,40	Bulgaristan	0,40	Yunanistan	0,35	Slovakya	0,32
Letonya	0,33	Bulgaristan	0,33	Macaristan	0,39	Malta	0,38	Romanya	0,34	Türkiye	0,32
Bulgaristan	0,32	Romanya	0,33	Litvanya	0,33	Letonya	0,38	Slovenya	0,33	Romanya	0,31
Slovakya	0,32	Slovenya	0,32	Estonya	0,32	Hırvatistan	0,34	Malta	0,32	Letonya	0,29
Hırvatistan	0,30	Yunanistan	0,31	Yunanistan	0,31	Kıbrıs	0,34	Bulgaristan	0,28	Malta	0,27

Tablo 3. Türkiye'nin yıllara göre VZA sonuçları

	2007	2010	2012	2014	2016	2018
Etkinlik Değeri	0,40	0,42	0,54	0,58	0,42	0,33
Sıralama	19	20	15	14	20	26
YE		1,00	1,36	1,06	0,72	0,78
SDE		0,97	0,95	1,00	1,17	0,96
Mİ1		0,97	1,29	1,06	0,85	0,75
Mİ2						0,89

Tablo 4. LPİ Alt Boyutları ve Yıllara Göre Türkiye için İyileştirme Oranları

Yıl	Gümrük	Altyapı	Loj. Hizm. Kalitesi	Ulus. Sevkiyat	Takip/İzleme	Zamanındalık
	Yüzdelerik İyileştirme (%)	Yüzdelerik İyileştirme (%)	Yüzdelerik İyileştirme (%)	Yüzdelerik İyileştirme (%)	Yüzdelerik İyileştirme (%)	Yüzdelerik İyileştirme (%)
2007	0,00	-31,71	-13,17	373,12	362,80	368,47
2010	0,00	-17,28	0,00	343,02	380,94	332,37
2012	-2,10	0,00	0,00	218,06	225,61	212,76
2014	-20,93	-28,53	0,00	195,03	183,88	196,12
2016	0,00	-22,82	-11,43	332,29	358,47	344,24
2018	0,00	-11,97	-11,10	489,65	502,32	476,77
Ortalama	-3,84	-18,72	-5,95	325,20	335,67	321,79

V.TARTIŞMA

Bu çalışmada LPİ verileri baz alınarak etkinlik analizi yapılmıştır, “gümrükler”, “altyapı” ve “lojistik hizmetlerin kalitesi” girdi olarak, “uluslararası sevkiyat”, “izleme / takip” ve “zamanında teslimat” ise çıktı olarak göz önünde bulundurulmuştur. VZA sonucu elde edilen iyileştirme oranları ve Mİ2 değeri incelendiği zaman, Türkiye’nin tüm girdi ve çıktılarda değişikliğe ihtiyacı olduğu gözükmektedir. Girdi değerleri, gerçek LPİ puanlarının tersi olduğu için bütün girdilerde bir artış yapılması gerektiği yorumu yapılabilir. Bununla birlikte, Türkiye özelinde tüm çıktı değişkenlerine göre belirli bir iyileştirmenin de yapılması gerekmektedir.

İyileştirme oranlarına göre; Türkiye için girdilerde çok fazla bir değişikliğe ihtiyaç yoktur. Özellikle “gümrük” ve “lojistik hizmetlerin kalitesi” konularında bazı senelerde iyileştirme oranları %0 olmuştur. 2007-2018 yıllarına genel olarak bakıldığı zaman, ortalama olarak da bu değişkenlerin iyileştirme oranları oldukça düşüktür. Dolayısıyla, Türkiye’nin “gümrük” ve “lojistik hizmetlerin kalitesi” alt boyutları için çok fazla yatırım veya düzenleme yapmasına gerek yoktur.

“Altyapı” boyutu ise 2012 yılı hariç, her sene için bir iyileştirme oranına sahiptir. Fakat bu oranlar incelendiğinde, 2016 ve 2018 yıllarındaki değerlerin düşük olduğu görülmektedir. Dolayısıyla Türkiye altyapı ihtiyacını zaman içinde gidermiş ve belirli bir seviyeye ulaşmıştır. Aynı performansın sergilenmesi durumunda, Türkiye “altyapı” için olan eksikliğini hızlı bir şekilde giderebileceği görülmüştür.

Çıktılar için ise; Türkiye’nin oldukça gayretli bir şekilde çalışması gerekmektedir. Çıktıların iyileştirme oranları oldukça yüksektir. Ortalama olarak en fazla iyileştirme yapılması gereken alt boyut “takip / izleme”dir. Bu konuda gerekli adımlar kamu ve özel sektör tarafından atılmalı, “takip / izleme” için ihtiyaç duyulan teknik altyapı geliştirilmelidir. Özellikle gıda gibi soğuk zincir gerektiren sektörler için yasal düzenlemeler yapılmalı ve özel sektörün “takip / izleme” konusuna önem vermesi sağlanmalıdır.

Bunlara ek olarak, “uluslararası sevkiyat” ve “zamanındalık” çıktıları içinde iyileştirme oranları oldukça yüksektir. İlgili konularda, 2007-2018 yılları arasında her sene ciddi iyileştirme yapılması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Dolayısıyla ithalat ve ihracat operasyonlarının daha rahat yapılabilmesi adına, lojistik süreçleri aksatan ve yavaşlatan bürokratik işlemler azaltılmalıdır. Aynı zamanda lojistik hizmetlerin rekabetçi fiyatlar ile sağlanabilmesi için sektörde faaliyet gösteren firma sayısının artması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Zamanındalık alt boyutu için ise iş ahlakı alanında firmalar kendilerini daha fazla geliştirmelidirler ve taahhüt edilen işlerin beklenen zaman içinde yapılması konusunda hassas davranmalıdırlar.

VI.SONUÇ

Artan ve hızla gelişen küresel ticaret, ülkeleri lojistik alanındaki performanslarını izlemelerine ve değerlendirmelerine neden olmuştur. Birçok ülke yatırımcı çekebilme ve kendi iş insanlarına daha uygun lojistik imkanlar sunmak için çalışmaktadır. Bu bağlamda, Dünya Bankası’nın 2007 yılında yayınlamaya başladığı LPİ, ülkelerin kendilerini değerlendirebilmeleri adına önemli bir veri kaynağıdır. Bu çalışmada LPİ’nin altı farklı alt boyutu dikkate alınarak Türkiye ve AB ülkelerinin olduğu grup için VZA uygulanmıştır. Analiz sonucunda 2007-2018 yılları arasında en iyi ve en kötü performans gösteren ülkeler listelenmiştir. Ayrıca çalışmada, ayrıntılı olarak Türkiye’nin 2007 ve 2018 yılları arasındaki tüm etkinlik puanları, sıralaması, Mİ değeri ve iyileştirme oranları verilmiştir. Bu verilere göre, Türkiye lojistik etkinlik anlamında ciddi bir ilerleme kaydedememiştir. İyileştirme oranlarına göre Türkiye, “uluslararası sevkiyat”, “takip / izleme” ve “zamanındalık” konularında kendini ciddi anlamda geliştirmelidir.

KAYNAKLAR

- [1] Martí, L., Martín, J.C., Puertas, R., 2017. A DEA-logistics performance index. *J. Appl. Econ.* 20, 169–192. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1514-0326\(17\)30008-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1514-0326(17)30008-9)
- [2] Razzaque, M. A. (1997). Challenges to logistics development: The case of a Third World country- Bangladesh. *International journal of physical distribution & logistics management.*
- [3] Beysenbaev, R., & Dus, Y. (2020). Proposals for improving the Logistics Performance Index. *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, 36(1), 34-42.
- [4] Chow, G., Heaver, T. D., & Henriksson, L. E. (1994). Logistics performance: definition and measurement. *International journal of physical distribution & logistics management.*
- [5] Rezaei, J., van Roekel, W. S., & Tavasszy, L. (2018). Measuring the relative importance of the logistics performance index indicators using Best Worst Method. *Transport Policy*, 68, 158-169.
- [6] Arvis, J.-F., Ojala, L., Wiederer, C., Shepherd, B., Raj, A., Dairabayeva, K., Kiiski, T., 2018. Connecting to compete 2018: trade logistics in the global economy. World Bank.
- [7] Cho, H., Lee, J., 2020. Does transportation size matter for competitiveness in the logistics industry? The cases of maritime and air transportation. *Asian J. Shipp. Logist.* <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ajsl.2020.04.002>
- [8] Kumar, A., Anbanandam, R., 2020. Assessment of environmental and social sustainability performance of the freight transportation industry: An index-based approach. *Transp.*

- Policy.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2020.01.006>
- [9] Chen, X., Wu, G., & Li, D. (2019). Efficiency measure on the truck restriction policy in China: A non-radial data envelopment model. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 129, 140-154.
- [10] Nash, C.A., Smith, A.S.J., 2014. Rail efficiency: Cost research and its implications for policy, in: *International Transport Forum Discussion Paper*, Paris.
- [11] Lai, Y.-C., Barkan, C.P.L., Önal, H., 2008. Optimizing the aerodynamic efficiency of intermodal freight trains. *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.* 44, 820–834. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tre.2007.05.011>
- [12] Yan, B., Zhu, X., Lee, D.-H., Jin, J.G., Wang, L., 2020. Transshipment operations optimization of sea-rail intermodal container in seaport rail terminals. *Comput. Ind. Eng.* 141, 106296. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106296>
- [13] Rashidi, K., Cullinane, K., 2019. Evaluating the sustainability of national logistics performance using Data Envelopment Analysis. *Transp. Policy* 74, 35–46. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2018.11.014>
- [14] Önsel Ekici, Ş., Kabak, Ö., Ülengin, F., 2019. Improving logistics performance by reforming the pillars of Global Competitiveness Index. *Transp. Policy* 81, 197–207. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2019.06.014>
- [15] Quariguasi Frota Neto, J., Walther, G., Bloemhof, J., van Nunen, J.A.E.E., Spengler, T., 2009. A methodology for assessing eco-efficiency in logistics networks. *Eur. J. Oper. Res.* 193, 670–682. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.06.056>
- [16] Önsel Ekici, Ş., Kabak, Ö., Ülengin, F., 2016. Linking to compete: Logistics and global competitiveness interaction. *Transp. Policy* 48, 117–128. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2016.01.015>
- [17] Kabak, Ö., Önsel Ekici, Ş., Ülengin, F., 2019. Analyzing two-way interaction between the competitiveness and logistics performance of countries. *Transp. Policy*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2019.10.007>
- [18] Stojanović, Đ., Ivetić, J., 2020. Possibilities of using Incoterms clauses in a country logistics performance assessment and benchmarking. *Transp. Policy*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2020.03.012>
- [19] İris, Ç. & Tanyaş, M. (2011). "Analysis of Turkish Logistics Sector and Solutions Selection to Emerging Problems Regarding Criteria Listed in Logistics Performance Index(LPI)". *International Journal of Business and Management Studies*. 3(1). 93-102.
- [20] Danacı, T. & Nacar, R. (2017). "Comparing The Foreign Trade and Logistic Performance of Turkey and EU Members With Clusteer Analysis". *Global Business Reserch Congress (GBRC)*. 24-25 Mayıs 2017. İstanbul.
- [21] Uca, N., Civelek, M. E., & Çemberci, M. (2015). The effect of the components of logistics performance index on gross domestic product: conceptual model proposal. ". *Eurasian Academy of Sciences Eurasian Business and Economics Journal*. 1(4). 86-93.
- [22] Orhan, M. (2019). Türkiye ile Avrupa Birliği ülkelerinin lojistik performanslarının Entropi ağırlıklı EDAS yöntemiyle karşılaştırılması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (17), 1222-1238.
- [23] Güngör, Ş., Dursun, E., & Karaoğlu, A. Lojistik Faaliyetlerin Akdeniz Ülke Ekonomileri İle İlişkisi. *İktisat Politikası Araştırmaları Dergisi*, 6(2), 91-106.
- [24] Pekmezci M. & Mutlu M. (2018), "Türkiye'yi Konu Alan "Lojistik Performans İndeksi" Çalışmalarına Yönelik Bibliyometrik Bir Analiz" IV. International Caucasus-Central Asia Foreign Trade and Logistics Congress , Didim/Aydın.
- [25] Charnes, A., Cooper, W. W., & Rhodes, E. (1978). Measuring the efficiency of decision making units. *European journal of operational research*, 2(6), 429-444.
- [26] Banker, R. D., Charnes, A., & Cooper, W. W. (1984). Models for estimating technical and returns-to-scale efficiencies in DEA. *Management Science*, 30(5), 1078-1092.
- [27] Coelli, T. J., Rao, D. S. P., O'Donnell, C. J., & Battese, G. E. (2005). *An introduction to efficiency and productivity analysis*. springer science & business media.
- [28] www.saitech-inc.com/index.asp, User Manual DEA-Solver, 2018.

Metal Oksit Nanopartiküllerin Genotoksik Etkileri

Genotoxic Effects of Metal Oxide Nanoparticles

Yasemin SAYGILI¹ , Fatma ÜNAL¹ , Deniz YÜZBAŞIOĞLU¹ 

¹ Gazi Üniversitesi, Fen Fakültesi, Biyoloji Bölümü, 06560, Ankara, Türkiye

Öz

Nanopartiküller (NP) (Nanomateriyaller-NM), hızla gelişen nanoteknolojide çığır açan partiküllerdir. Bu partiküllerin en az bir boyutu 1-100 nm aralığındadır. Metal oksit nanopartikülleri, nanomateriyallerin temel üyelerinden biri olup, tıp, kozmetik, boya, tekstil ve gıda ürünleri gibi çok çeşitli alanlarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Metal oksit NP'lerinin yoğun kullanımı, insanların partiküllere inhalasyon, dermal ve oral yollar dahil çeşitli yollarla maruz kalmasına sebep olmaktadır. Diğer taraftan, nanopartiküllere böylesi yoğun maruziyet, partiküllerin olası toksisitesi konusunda endişelerin artmasına sebep olmuştur. Metal oksit nanopartiküllerin şekil ve ebatlarına ilave olarak diğer fizikokimyasal özellikleri de, NP'lerin toksik etkilerinde de önemli rol oynamaktadır. Metal oksit nanopartiküllerinin toksisitesi konusunda yapılan araştırmalar, bazı partiküllerin genotoksik olduğunu ve dolayısıyla insanlar için de zararlı olabileceğini göstermektedir. Bu nedenle bu çalışmada Al₂O₃, CeO₂, CuO, Fe₂O₃, SiO₂, TiO₂ ve ZnO nanopartiküllerinin genotoksik etkileri derlenmiştir. Makalede kromozom anomali analizleri ile Ames (bakteriyel geri mutasyon), mikronukleus ve komet testleri kullanılarak yürütülen bazı araştırmalar dikkate alınmıştır. Derlemenin sonunda, metal oksit nanopartiküllerinin genotoksik mekanizmaları konusunda ileri sürülen görüşler sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Bakteriyel geri mutasyon testi, kromozom anormallikleri testi, mikronukleus testi, komet testi, sitotoksosite, mutajen, karsinojen.

Abstract

Nanoparticles (NPs) (nanomaterials-NMs) are at the cutting edge of the speedily advancing area of nanotechnology. At least one dimension of these particles are in the range of 1-100 nm. Metal oxide NPs are the main members of nanomaterials. They have been applied in various fields such as medicine, cosmetics, paints, textiles, and food products. However, extensive use of metal oxide NPs lead to exposure of humans by various ways including inhalation, dermal, and oral routes. On the other hand, such an exposure raises concerns about their potential toxicity. The physicochemical properties of metal oxide NPs such as shape and size play an important role in their toxic effects. Studies about genotoxicity of metal oxide NPs on humans indicate that some metal oxide nanoparticles have genotoxic effects and they may be hazardous for humans. Therefore, in this study, genotoxic effects of some widely used metal oxide nanoparticles such as Al₂O₃, CeO₂, CuO, Fe₂O₃, SiO₂, TiO₂, and ZnO were reviewed. Studies carried out using Ames (bacterial reverse mutation), chromosome aberration analysis, sister chromatid exchange, micronucleus, and comet assays were included. At the end, general mechanisms proposed for the genotoxic effects of metal oxide nanoparticles were presented.

Keywords: Bacterial reverse mutation test, kromozom aberration test, micronucleus test, comet assay, cytotoxicity, mutagen, carcinogen.

I. GİRİŞ

Atom ve moleküllerin tek tek işlenip düzenlenmesi ile kullanışlı materyal, araç ve sistemlerin oluşturulduğu bilim dalı nanoteknoloji olarak isimlendirilmektedir [1]. Bu alanda ölçü birimi olarak kullanılan nanometre (nm), metrenin milyarda birine eşittir. Nanoteknolojide kullanılan nanopartiküller (NP) (nanomateriyaller-NM), genellikle 100 nm'den küçük partiküller olup [2], bu partiküller fiziksel ve kimyasal özellikleri dikkate alınarak özel olarak sentezlenmektedir [3]. Sahip oldukları eşsiz özelliklerinden dolayı NP'ler son yıllarda endüstriyel ve bilimsel alanlarda çok sık kullanılmaya başlanmıştır. Bu partiküllerin boyutu küçüldükçe yüzey alanı ve kuantum etkisi artış göstermekte böylece optik, elektrik ve manyetik özellikleri değişerek, daha reaktif özellikler kazanmaktadır [4-6]. NP'ler, fiziksel ve kimyasal yapılarındaki farklılıklar sebebiyle günümüzde biyoteknoloji, biyogörüntüleme, ilaç taşınması, otomotiv, tekstil, gıda, kozmetik, elektronik ve savunma sanayii gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Günümüzde, piyasada 1800'den fazla nano ürün bulunmakta ve bu ürünlerin %37'lik kısmını metal ve metal oksit türevi nanopartiküller oluşturmaktadır. Metal oksit nanopartikülleri, yapısında en az bir oksijen atomu bulunan metal içerikli bileşiklerdir. Bu partiküller arasında en çok kullanılan üçü sırasıyla TiO₂, SiO₂ ve ZnO şeklinde sıralanmaktadır [7].

Nanopartiküller son yıllarda yaygın bir şekilde kullanılmalarına rağmen, bunların canlılardaki ve çevredeki toksik etkileri, özellikle genotoksik etkileri konusunda yeterli araştırma bulunmamaktadır. Yapılan araştırmalarda, bazı metal oksit nanopartiküllerinin herhangi bir toksik etkisinin olmadığı belirtilirken [8-16], bazı nanopartiküllerin ise genotoksik, mutajenik ve hatta karsinojenik etkilerinin olabileceğine dair veriler bulunmaktadır [17-26]. Bu derlemede, gelişen teknoloji ile kullanım alanları ve düzeyleri giderek artarken genotoksik, mutajenik ve karsinojen etkileri konusunda çelişkili sonuçların yer aldığı bazı metal oksit nanopartiküllerinin genotoksik etkilerini ele alan bazı araştırmalar derlenmiştir.

II. METAL OKSİT NANOPARTİKÜLLERİN TOKSİK ETKİLERİ

Nanopartiküller, daha ziyade üretimleri sırasında olmak üzere, kullanımları sırasında veya sonrasında ekosisteme salınmaktadır. Bu nedenle insanların ve diğer tüm canlıların bu partiküllere maruziyeti kaçınılmaz bir hale gelmeye başlamıştır. NP'ler deri, solunum, damar ve oral yollar ile vücuda alınıp, organ ve dokulara yerleşebilir [12, 27, 28]. Bu durum organizmada alerji ve fibrosis'in yanı sıra, organlarda birikmeye bağlı olarak doku ve organ hasarına, inflamasyona, sitotoksisiteye, reaktif oksijen türlerinin (ROT) oluşumuna ve DNA hasarına sebep olabilir [29]. NP'lerin solunum yolu ile organizma içine girme potansiyelleri, daha büyük boyutta olan partiküllere kıyasla daha yüksek düzeyde olduğu gibi, toksik etkileri de daha fazladır. Vücutta astım ve bronşit gibi solunum yolu enfeksiyonlarına da neden olabilirler [30, 31]. Ayrıca kolon, akciğer ve karaciğer kanseri ile, Parkinson, Alzheimer ve kalp rahatsızlıkları gibi hastalıklara da sebep olabilirler [22, 32-34]. NP'ler bir kere vücuda girdikten sonra, yarılanma ömürleri uzun olduğundan, vücuttan atılmaları da oldukça zordur. Özellikle metal oksit NP'leri kolayca degrades olmamakta, çok yavaş parçalanmaktadır. Bu durumda NP'lerin birikimi, stres reaksiyonlarını başlatmakta, bu da inflamasyona sebep olarak, bir yandan oksidasyonun artmasına diğer yandan da antioksidan sistemin zayıflamasına sebep olmaktadır [20, 35, 36]. Biyolojik olaylar sırasında hücre ile etkileşime girebildikleri gibi, çeşitli biyolojik reaksiyonları da engelleyebilirler [32]. Gametogenezi etkileyerek üreme hücrelerinde hasarlara [37-39] ve hatta fetüste anormalliklere bile sebep olabilirler[40]. NP'lerin sebep olduğu tüm bu toksik etkiler, yine NP'lerin fizikokimyasal özelliklerinden kaynaklanmakta ve etkileşime girdikleri hücre tipine göre de etkilerinde farklılıklar gözlenmektedir. Bu nedenle bir NP'ün toksisitesinin belirlenmesinde başta NP'ün kimyasal yapısı olmak üzere onun şekil, boyut, yüzey yapısı, yüzey yükü, aglomerasyon durumu, fonksiyonel grupların varlığı ve çözünübilirlik gibi birçok özelliği önemli rol oynamaktadır [6, 41-50]. Dolayısıyla nanopartiküllerin toksisitesinin genel olarak en doğru

şekilde değerlendirilebilmesi için deneysel aşamada öncelikle farklı nanopartikül tiplerinin, farklı hücre, organ ve organizmalar üzerinde denenmesi gerekmektedir. İkinci aşamada ise tasarlanan deney, farklı testler kullanılarak tekrarlanmalı ve elde edilen sonuçlar bir biriyle kıyaslanmalıdır.

III. GENOTOKSİTE TESTLERİ

Nanoteknolojide yaşanan gelişmeler ile nanopartiküllerin toksisitesine yönelik çalışmalar da artış göstermiştir. Bugün itibarıyla (6/2/2021) Web of Science'ta, "nanoparticles" terimi ile bir araştırma yapıldığında, karşımıza 749.130 çalışma çıkmaktadır. "Nanoparticles, toxicity" terimleri ile araştırdığımızda 42.132 çalışma, "nanoparticles, genotoxicity" terimleri ile araştırdığımızda da 2.659 çalışma olduğu görülmektedir.

Genotoksik etkilerin tespitinde daha ziyade kısa süreli genotoksisite testleri kullanılmaktadır. Bu testler, NP'ler de dahil olmak üzere, çeşitli fizi ayrılmış ksel ve kimyasal maddelerin genotoksik potansiyellerinin ve güvenilirliklerinin araştırılmasında kullanılmaktadır. En yaygın kullanılan testler, bakteriyel geri mutasyon (Ames), rodentlerde dominant letal, somatik mutasyon ve rekombinasyon (SMART), fare lenfoma, programlanmamış DNA sentezi (UDS), hipoksantin guanin fosforibozil transferaz (HPRT) gen mutasyonu, mikronükleus (MN), kromozomal anormallik (KA), kardeş kromatit değişimi (KKD) ve komet testleridir [51-57]. Bu testlerden genotoksisite testlerinin uygulanmasıyla, organizmaların herhangi bir kimyasal maddeye verecekleri genetik cevap, maruz kalınan kimyasal maddenin sebep olduğu klinik belirtiler daha ortaya çıkmadan, önceden belirlenebilmekte ve gerekli önlemlerin alınması sağlanabilmektedir. Dolayısıyla genotoksisitenin tespiti başta insan sağlığı olmak üzere, diğer canlılar ve çevre açısından da büyük önem taşımaktadır.

Nanopartiküllerin genotoksik potansiyellerinin tespit edilmesinde sıklıkla komet ve mikronükleus testleri tercih edilmektedir. Bunların dışında Ames, kromozom anormallikleri ve kardeş kromatit değişimleri testi de oldukça fazla kullanılmaktadır [24, 25, 57-61]. Komet testi veya diğer adıyla tek hücre jel elektroforez testi, DNA hasarı ve tamirinin tek hücre düzeyinde belirlenmesinde kullanılan çok yönlü, basit ve çeşitli hücre tiplerine adapte edilebilen bir testtir [62-65]. Komet, negatif yüklü DNA fragmentlerinin, agaroz jel ortamında uygulanan elektroforez sırasında kuyruklu yıldız benzer bir görüntü oluşturmasıyla bilinen bir testtir. Bu test, DNA'da tek zincir kırıklarının (zincir kırığı ve tamamlanmamış kesip çıkarma onarım bölgeleri), alkali-label bölgeleri ve çapraz bağlar gibi çeşitli DNA hasarlarının belirlenmesinde kullanılmaktadır [66]. Mikronükleus testi, uygulanması kolay ve hızlı sonuç alınan bir testtir. Mikronükleus testi genel olarak nükleustan koparak ayrılmış parçaları saptamaktadır. Örneğin, bölünmekte olan hücrelerde,

sentromer bulundurmeyen (asentrik) ve ana çekirdeğe katılmayan kromozom kırıklarından (klastojenik etki) ve/veya bölünme sırasında kutuplara ulaşamayan, sentromer bulunduran bütün bir kromozomdan (anöjenik etki) oluşan ve ana çekirdeğe katılmayan genetik yapıları tespit etmektedir. Telofazda geri kalmış kromozom veya kromozom parçalarının etrafında nüklear membran oluşumuyla meydana gelen mikronukleuslar, ana nükleustan daha küçük bir yapıdadırlar [67-69]. Kromozom anormallikleri testi, fiziksel, kimyasal ve biyolojik moleküllerin DNA düzeyindeki etkilerinin belirlenmesinde rol oynayan önemli ve faydalı bir biyogöstergedir. Kromozom kırıkları, DNA'da meydana gelen çift zincir kırıklarından oluşurken, yeniden düzenlenmiş kromozomlar ise DNA'daki zincir kırıklarının yanlış onarılmasından oluşmaktadır. Mikronukleus ve kromozom anormallikleri testlerinde elde edilen ve anomali varlığını doğrulayan sonuçlar kalp damar ve nörodejeneratif hastalıkların yanı sıra, diyabet, kanser ve yaşlanma ile de ilişkilendirilmiştir; adı geçen hastalıkların tespitinde mikronukleus ve kromozom anomali testleri önemli biyogöstergeler olarak ifade edilmişlerdir [57, 69-73]. NP'lerin toksik açıdan değerlendirilerek, ciddi genotoksik risk taşıyanların belirlenmesi ve bunların kullanımı konusunda gerekli önlemlerin alınabilmesi için, üst metinde ifade edilen bu testlerin kullanılması hem insan ve diğer canlıların sağlığı hem de ekosistem açısından büyük önem taşımaktadır.

IV. METAL OKSİT NANOPARTİKÜLLERİNİN GENOTOKSİK ETKİLERİ

Yaygın olarak kullanılan ve insanların maruz kalma potansiyeli oldukça yüksek olan metal oksit nanopartikülleri ve bu nanopartiküllerin genotoksik etkileri alfabetik sırayla Al_2O_3 , CeO_2 , CuO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , SiO_2 , TiO_2 ve ZnO şeklinde Tablo 1'de özetlenmiştir. Bunlardan SiO_2 , metal ve metal olmayanlar arasında özelliklere sahip olması nedeniyle teknik olarak metalloid olarak kabul edilmektedir [74]. Aynı zamanda SiO_2 nanotoksikolojide bir dereceye kadar metal oksit olarak da sınıflandırılmaktadır [58, 75]. Bu nedenle çalışmamıza SiO_2 de dahil edilmiştir. SiO_2 NP'lerinin kristal formu 1. sınıf kanserojen olarak sınıflandırıldığından [76-77] bu çalışmanın kapsamı dışında tutulmuş ve sadece amorf formdaki SiO_2 NP'lere ait yayınlanmış sonuçlar makaleimize dahil edilmiştir. Bu çalışmada incelediğimiz nanopartiküllerin özellikle ebat ve şekil bilgilerinin de erişilebilir olmasına dikkat edilmiştir. Tabloya, daha ziyade son on yılda memelilerde gerçekleştirilen MN, Komet, KA, KKD testleri ve bakterilerde uygulanan Ames testi kullanılarak araştırılmış olan 5-10 arasında genotoksisite çalışması dahil edilmiştir. Diğer çalışmalar kapsam dışında tutulmuştur.

Tablo 1'de, 4,17 nm ile 40 nm arasında değişen ebatlardaki Al_2O_3 nanopartiküllerinin genotoksisitesi

konusunda yapılan araştırmalarda, genotoksik açıdan hem negatif ve hem de pozitif etkilerin ortaya çıktığı görülmektedir. Al_2O_3 'in 4,17 nm'lik en küçük formu insan lenfositlerinde kromozom anormallikleri ve mikronukleus frekansında herhangi bir artış oluşturmazken [78]; 13 nm'lik küresel Al_2O_3 NP'leri fare makrofaj hücre hattında komet testi ile belirlenen DNA hasarında anlamlı bir artışa sebep olmuştur [79]. Di Virgilio ve arkadaşlarının [79] Çin hamsteri ovaryum hücrelerine uyguladıkları ~28 nm'lik küresel yapıdaki Al_2O_3 NP'lerinin de MN frekansını anlamlı düzeyde artırdığı rapor edilmiştir. Daha büyük ebat olan 39 nm'lik partiküllerin uygulandığı insan lenfositlerinde ise MN ve Komet testlerinin her ikisinde de negatif sonuçlar gözlenmiştir [80]. En büyük ebat olan 40 nm'lik partiküllerle muamele edilen *Salmonella typhimurium*'da da negatif sonuçlar bildirilmiştir [9]. Bu nanopartiküllerin genelde mitotik iğ yapısında fiziksel bozulmalara ve kromozom hasarından ziyade kromozom kaybına sebep olduğu belirtilmiştir [80]. Somatik dokulardaki kromozom kaybı özellikle kanser gelişmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, mitoz sonucunda oluşan yavru hücrelere kromozom dağılımının uygun şekilde yapılması bir organizmanın hayatını sağlıklı bir şekilde sürdürmesi açısından şarttır [65, 69, 72]. Söz konusu partiküllerin havacılık, seramik endüstrileri ve özellikle biyomedikal alanlarında kullanıldığı dikkate alındığında, ilgili partiküllerin genotoksisiteleri konusunda daha detaylı araştırmaların yapılması gerektiği açıktır.

CeO_2 'in 5,5 nm'den 148 nm'ye kadar olan farklı büyüklüklerdeki nanopartikülleri ile yapılan araştırmalarda, genotoksik etkilerinin daha ziyade pozitif olduğu fakat genotoksik açıdan negatif etkilerin de olduğu görülmektedir (Tablo 1). En düşük ebatlı olan 5,5 nm CeO_2 NP'leri kullanılarak insan lens epitel hücreleri üzerinde yapılan Komet ve KKD testlerinde genotoksik etkiye rastlanmaması nedeniyle araştırmacılar, bu partiküllerin antioksidan etkili olduğunu ve bu nedenle kanser tedavisinde kullanılabileceğini bildirmişlerdir [10]. 40 nm'lik küresel CeO_2 nanopartiküllerinin ratlarda Komet ve MN testinde genotoksik olmadığı tespit edilmiştir [14]. İnsan nöroblastoma hücrelerine uygulanan ~25 nm ve ~3 µm ebatlarındaki CeO_2 NP'lerinden sadece nano ebatların gerek Komet gerekse MN testinde genotoksik olduğu rapor edilmiştir [82]. 25 nm ve 148 nm'lik CeO_2 NP'leri insan lenfositlerinde düşük konsantrasyonlarda dahi kromozom anormallikleri ve mikronukleus frekansında artışa sebep olmuştur [24]. Yapılan Komet testinde CeO_2 NP'lerinin 33 nm'lik formunun A549 ve TK6 hücrelerinde DNA hasarı oluşturduğu, 140 µg/mL'lik konsantrasyonda ise sitotoksik olduğu belirlenmiştir [83]. CeO_2 nanopartiküllerinin genotoksik etkilerinin, oksidatif stres kaynaklı reaktif oksijen türlerinin hücredeki konsantrasyonlarının artışı ile glutatyon ve katalaz gibi hücreyi mutajen saldırılarından koruyan antioksidan enzim

seviyelerinin azalmasından kaynaklandığı vurgulanmıştır [82]. Araba egzozlarının verdiği zararı en aza indirmek için kullanılan CeO₂ NP'lerinin solunmasının, hücre ölümüne neden olacak kadar sitotoksik ve genotoksik olduğu da rapor edilmiştir [83]. CeO₂ biomedikal, kozmetik ve cam sanayiinde yoğun olarak kullanıldığından, partikülün genotoksik etkileri konusunda detaylı çalışmalar yapılması gerektiği görülmektedir.

CuO'nun 1-100 nm şekilsiz, 7 nm küresel, 7 nm x 40 nm çubuk, 1200 nm x 270 nm x 30 nm iç şeklindeki alternatif partiküllerinin, çok düşük konsantrasyonlarda dahi periferik kan lenfositlerinde uygulanan Komet testinde ve fare makrofaj hücre hattında uygulanan MN testinde genetik hasarlar oluşturduğu rapor edilmiştir. Bu sonuçlara dayanarak araştırmacılar, CuO NP'lerinin nanotoksikoloji çalışmalarında pozitif kontrol olarak kullanılabilirliğini öne sürmüşlerdir [17]. Benzer şekilde, 27-95 nm'lik CuO NP'lerinin farelerde mikronukleus frekansında anlamlı artışa sebep olduğu, bu artışların en çok 48 saatlik uygulamada ortaya çıktığı belirtilmiştir [84]. CuO'nun ~35 nm'lik partiküllerinin Komet testi ile kullanılarak yapılan denemelerde, Caco-2 ve HepG2 hücrelerinin her ikisinde de DNA hasarında anlamlı artışlara sebep olduğu bildirilmiştir. İlave olarak, aynı nanopartikülün Caco-2 hücreleri üzerindeki toksik etkisinin, HepG2 hücreleri üzerindeki etkisinden daha güçlü olduğu vurgulanmıştır [26]. Çubuk şekilli CuO NP'leri de SK-Hep-1 ve HepG hücrelerinde DNA hasarında anlamlı artışlara sebep olmuştur [20]. Yapılan bir çalışmada <50 nm ve <10 µm ebatlı CuO nanopartiküllerinin BEAS-2B hücrelerinde DNA hasarının yanı sıra mikronukleus frekansında da artışa sebep olduğu bildirilmiş, nanometre ebatındaki partiküllerin, mikron boyutundaki partiküllerden daha genotoksik olduğu da belirlenmiştir [25]. İncelenen makalelerden sadece ~55 nm ebatlarındaki CuO NP'lerinin, insan kolorektal adenokarsinom HT29 hücrelerindeki genotoksik etkisinin Komet testinde negatif sonuç verdiği bildirilmiştir (85). Araştırmalardan elde edilen veriler, CuO NP'lerinin mitokondride yapısal hasar oluşturduğunu ve bu hasarın diğer birçok nanopartikülde olduğu gibi ROT'ni artırdığını göstermektedir. ROT'nin artışı ile DNA'da oluşan hasar arasında da pozitif bir korelasyon olduğu ifade edilmiştir [26]. CuO NP'leri, yüz spreylere, metalik kaplamalarda ve mürekkeplerde katkı maddesi olarak kullanılırken, özellikle gıdaların paketlenmesinde antimikrobiyal ajan, lityum iyon pillerinde anod materyali olarak tercih edilmekte ve buna benzer birçok alanda çeşitli amaçlar için kullanılmaktadır. Bu nedenle CuO NP'lerinin önce çevreye oradan da dermal yoldan veya yiyecek, su ve hatta toprak vasıtasıyla insan dahil diğer canlılara kontaminasyonu kolayca gerçekleşmektedir. Bu nedenle nanopartiküllerin de detaylı bir şekilde incelenerek risk değerlendirmelerinin yapılması büyük önem taşımaktadır.

Biomedikal alanda yoğun olarak kullanılan Fe₂O₃ ve Fe₃O₄ nanopartiküllerinin genotoksik etkileri konusunda varılan sonuçlar da birbirleriyle çelişir durumdadır. Buna göre bazı yayınlarda söz konusu partiküller genotoksik olarak nitelendirilirken başka yayınlarda genotoksik olmadığına dair sonuçlar göze çarpmaktadır (Tablo 1). 4-8 nm ebatlarındaki Fe₂O₃ nanopartiküllerinin *Salmonella typhimurium*'da mutajenik olmadığı belirlenmiştir. Aynı çalışmada, maymun böbrek hücre hattında gerçekleştirilen MN ve Komet testlerinde de genotoksik etki tespit edilmemiştir [9]. Bunun tersine, 14 nm ve 30 nm'lik Fe₂O₃ NP'lerinin insan nöroblastoma hücrelerinde Komet testiyle belirlenen DNA hasarında anlamlı artışlara sebep olduğu ve dolayısıyla genotoksik olduğu rapor edilmiştir [23]. Aynı nanomateryallerin küresel ve ~44 nm'lik partiküllerinin de insan lenfositleri kullanılarak yürütülen Komet testi ve kromozom anormallikleri testlerinin ikisinde birden genotoksik olduğu belirlenmiştir [81]. Farede *in vivo* olarak incelenen 60-100 nm'lik Fe₂O₃ NP'lerinin mikronukleus frekansında anlamlı artışa sebep olduğu belirlenmiş ve genotoksik olarak nitelendirilmiştir. MN frekansındaki en yüksek artışın, uzun süreli uygulamada gerçekleştiği ifade edilmiştir [84]. Benzer genotoksik etkiler Fe₃O₄ NP'leri için de gözlenmiştir. Örneğin, küresel şekilli ve ~8 nm'lik Fe₃O₄ NP'leri insan periferik lenfositlerinde ve HEK-293 hücre hatlarında genotoksik etkili olup, bu etki zamana bağlı şekilde bir artış göstermiştir. Aynı nanopartiküller *Salmonella typhimurium*'da Ames testinde de pozitif sonuçlar göstermiştir [86]. ~25 nm ve çokgen şekilli Fe₃O₄ nanopartiküllerinin Komet testi ile incelendiği çalışmada A549 ve A431 hücrelerinde DNA hasarında anlamlı artışlar saptanmıştır [87]. 80 nm'lik Fe₃O₄ NP'leri de farede MN frekansında anlamlı artışlara sebep olmuştur. En yüksek artış 48 saatlik uygulamada tespit edilmiştir [84].

Nanopartiküller tek başına kullanılabilirlikleri gibi, partiküllere daha farklı özellikler kazandırmak amacıyla, farklı materyaller ile kaplanarak da kullanılabilirler. Bu şekilde kaplanan nanopartiküller tıp, eczacılık, savunma sanayii, otomotiv ve gıda endüstrisi gibi çeşitli alanlarda kullanıldıklarından genotoksik etkileri araştırılmaktadır (Tablo 1). Dekstran, magnetik nanopartiküllerin bir yandan aglomerasyonunu engellemek diğer yandan toksik etkisini azaltmak amacıyla, özellikle biyomedikal uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılan biyoyumlu bir materyaldir. Dekstran kaplı ve kaplı olmayan, ~10 nm ebatlı, genelde küresel fakat çok azı çubuk şeklinde olan Fe₂O₃ NP'lerinin çeşitli dozlarının MCL-5 insan lenfoblastoid hücre hatlarına uygulanması sonucunda, dekstran kaplı Fe₂O₃ NP'lerinin MN frekansında artışa sebep olduğu anlaşılmıştır. Diğer yandan dekstran kaplı olmayan Fe₂O₃ NP'leri ile, dekstran kaplı ve kaplı olmayan Fe₃O₄ NP'lerinin MN frekansında bir artış oluşturmadığı rapor edilmiştir [19]. Oleik asit,

biyomedikal uygulamalarda, nanopartikülleri stabilize ederek yüzeyinin fonksiyonel hale gelmesini sağlamak ve nanopartiküller arasındaki etkileşimi azaltmak amacıyla kullanılan, iyonik olmayan ve yağda çözünebilen bir kaplama materyalidir. Kaplama materyali NP'lerin monodispersiyon oluşturması ve biyoyumluluğunda büyük önem taşımakta, nanopartiküllerin kan beyin bariyerini geçmesi, beyine hedefli ilaç taşınması ve hipertermia gibi uygulamalarda da büyük önem taşımaktadır. 11 nm boyutunda ve oleik asit kaplı Fe_3O_4 NP'leri insan A172 hücrelerinde serum içeren ve içermeyen ortamlarda primer DNA hasarı oluştururken, MN testinde toksik etki oluşturmamıştır. Bu durum, hücrelerin DNA hasarını tamir ettiği ve bu nedenle kromozom hasarı gözlenmediği şeklinde açıklanmıştır. Çalışmada nanopartiküllerin hücre döngüsüne katıldığı ve döngüyü S fazında duraksattığı hatta apoptoza neden olduğu da bildirilmiştir [88].

Bu derlemede incelenen beş farklı SiO_2 NP'ün de gerek *in vivo* gerekse *in vitro* koşullarda, genotoksik açıdan pozitif ve negatif etkiler oluşturduğu görülmektedir (Tablo 1). 10-100 nm'lik SiO_2 NP'leri, insan ven endotel hücrelerinde ve fare makrofaj hücre hattında DNA hasarının yanısıra MN frekansında da artışa sebep olmuştur [22, 79]. SiO_2 NP'lerinin iki farklı boyutunun insan periferik lenfositlerinde *in vitro*da MN frekansını artırmadığı fakat Wistar ratlarda *in vivo* koşullarda DNA hasarını da mikronukleus frekansını da artırdığı tespit edilmiştir [89]. 17 nm'lik küresel SiO_2 NP'leri ise insan lenfositlerinde genotoksik etki oluşturmamıştır [81]. Kaplı olmayan, vinil kaplı ve aminopropil vinil kaplı farklı boyutlardaki SiO_2 NP'lerinin hiç birinin kromozom anormallikleri oluşturmadığı fakat kaplanmamış NP'lerin Komet testinde DNA hasarı oluşturduğu belirlenmiştir. Bu farklılık, SiO_2 NP'lerinin genotoksik etkisinin, oksidatif DNA hasarı oluşturabilecek kadar güçlü fakat çift zincir DNA kırıklarından kaynaklanan kromozom hasarını artıracak kadar güçlü olmamasıyla açıklanmıştır. Aynı zamanda söz konusu farklılık, kullanılan NP'lerin G1/S noktasında hücre döngüsünü durdurmasıyla da bağlantılı olabilir. Kaplı ve kaplı olmayan nanopartiküllerin farklı genotoksik etki göstermesinin, NP'lerin kaplandıkları maddeler nedeniyle, yüzey yükü ve zeta potansiyelinde meydana gelen farklılıklardan veya hücre ile etkileşimlerindeki farklılıklardan kaynaklanabileceği rapor edilmiştir [90]. Yapılan bir çalışmada, silika NP'lerinin inflamatuvar hücre kaynaklı oksidanların serbest bırakılması ile sekonder genotoksisiteyi başlattığı bildirilmiştir. Sekonder genotoksisitede NP'ler *in vitro* test sistemlerinde genotoksik potansiyel göstermeyebilirken, *in vivo* koşullarda kronik bağışıklık yanıtını artırarak genotoksik etki oluşturabilir. NP'lerin, yangıya bağlı olarak artan nötrofilik sızma ile karaciğerde hücre ölümüne neden olduğu, yangı belirteci olan TNF (tümör nekrozu faktör) ve IL-6 (interlökin-6) miktarlarını plazmada

artırmak suretiyle genetik hasarlar oluşturduğu düşünülmektedir [88]. SiO_2 NP'leri gıda katkı maddesi olmalarının yanında biyobelirteç olarak da kullanılan partiküller olduklarından, sebep olabilecekleri genotoksik etkiler yönünden incelenmeleri insan sağlığı araştırmaları açısından oldukça önemlidir.

Nano teknolojik alanda, özellikle güneş kremleri ile gıda ve ilaç gibi ürünlerin renklendirilmesinde kullanılan TiO_2 NP'leri ile yapılan çalışmaların neredeyse tamamına yakınında genotoksik sonuçlar elde edilmiştir (Tablo 1). ~20 nm ebatlarındaki TiO_2 NP'leri, özellikle yüksek konsantrasyonlarda, insan lenfositlerinde DNA hasarı ve kromozom anormallikleri oluşturmuştur [21]. 19-101 nm boyutundaki partiküllerin farede MN frekansını artırdığı [84], Çin hamster ovarium hücresinde bazı konsantrasyonlarda sitotoksik, bazılarında da KKD ve MN frekansında artışa sebep olduğu belirtilmiştir [80]. 100 nm'nin altındaki TiO_2 NP'leri insan lenfositlerinde kromozom anormallikleri ve kardeş kromatid değişim frekansında artışlara ve kullanıldıkları en yüksek konsantrasyonlarda DNA hasarında artışa sebep olurken, MN frekansında bir değişiklik oluşturmamıştır [57]. A549 ve TK6 hücrelerine uygulanan ~110 nm'lik TiO_2 NP'leri ile [82], HT29 hücrelerine uygulanan ~27 nm'lik partiküllerin [85] DNA hasarı oluşturduğu tespit edilmiştir. Ebatları 20-150 nm arasında değişen küresel, şekilsiz ve yassı partiküller BEAS-2B hücrelerinde DNA hasarı oluştururken, bipiramit ve çubuk şeklindeki partiküller DNA hasarı oluşturmamıştır [91]. 40 nm'lik partiküller de *Salmonella typhimurium* da mutajenik etki göstermemiştir [15]. TiO_2 nanopartikülleri, ya direk DNA'ya bağlanarak veya alternatif olarak hücrede oksidatif strese artışa sebep olup ROT oluşturarak dolaylı şekilde genotoksik etki göstermektedir. TiO_2 NP'lerinin DNA ve kromozom düzeyinde oluşturduğu hasarların, partiküllerin DNA'ya bağlanma kapasitesinin yüksek olmasından ve direkt olarak DNA ile etkileşime girmesinden kaynaklandığı belirtilmiştir [21]. Diğer hücre kültürlerinden farklı olarak insan akciğer epitellerinde de genotoksik etki gösteriyor olması, tehlikenin farklı bir boyutuna da işaret etmektedir [83].

Kozmetik, ilaç sanayii, biomedikal ve elektronik gibi birçok endüstriyel alanda yoğun olarak kullanılan ZnO nanopartikülleri ile yapılan çalışmalarda genotoksik anlamda çoğunlukla negatif sonuçlar gözlenmekle beraber, pozitif sonuçların elde edildiği araştırmalar da mevcuttur (Tablo 1). ZnO'nin 20-70 nm'lik partiküllerin, Çin hamsteri akciğer (CHL) fibroblast hücresinde, ratlarda ve farelerde DNA hasarı, kromozom anormallikleri ve mikronukleus frekansında artışa sebep olmadığı, *Salmonella typhimurium* da Ames testinde de mutajenik olmadığı belirlenmiştir [13]. ~58 nm ebatlı ZnO NP'lerinin de HT29 hücrelerinde Komet testi ile negatif etkili olduğu bulunmuştur [85]. Diğer yandan, 10-50 nm aralığındaki

ZnO nanopartikülleri ile sıçan böbrek epiteli NRK-52E hücrelerinde Komet testi ile yapılan çalışmada en yüksek konsantrasyonun DNA hasarını artırdığı, bu hasarın, nanopartiküllerin membran geçirgenliğini etkileyerek mitokondri ve lizozomun yapısını bozmasıyla ortaya çıktığı ifade edilmiştir [92]. Periferik insan lenfositlerinde 19,8 nm boyutundaki NP'ler ile yapılan KA ve MN testleri ile de pozitif sonuçlar gözlenirken yüksek konsantrasyonlarda sitotoksikite tespit edilmiştir. ZnO NP'lerinin lipid peroksidasyonunu ve oksidatif stresi artırarak, DNA kırıkları ve apoptoza sebep olduğu vurgulanmıştır [78]. ZnO <100 nm'lik nanopartiküllerin insan lenfositlerinde 48 saatlik uygulamasında, nanopartikülün uygulanan tüm konsantrasyonlarının kromozom anormalliklerinde artışa sebep olduğu, 24 saatlik uygulamada ise en yüksek konsantrasyonlarda artış olduğu gözlenmiştir. Saptanan KKD sayısı ve komet testi ile belirlenen DNA hasarında da nanopartikülün uygulanan konsantrasyonu ile doğru orantılı sonuçlar elde edilmiştir [57]. A549 ve TK6 hücrelerine uygulanan ~147 nm'lik ZnO NP'leri de DNA hasarında artış ve yüksek konsantrasyonlarda sitotoksik etki göstermiştir [83]. Shalini ve arkadaşlarının [92] yaptığı çalışmada, 187 nm-küresel-NP'lerin insan periferik lenfositlerinde DNA hasarı oluşturduğu, diğer yandan 670 nm-çubuk-NP'lerinin, 683 nm-küresel-MP (mikropartikül) ve 1039 nm-mikroçubukların DNA hasarı oluşturmadığı gözlenmiştir. Küçük yapıları ve şekilleri nedeniyle küresel nanopartiküllerin, nanoçubuk, mikropartikül ve mikroçubuklara kıyasla hücreye daha kolay girdiği, daha yüksek düzeyde ROT oluşturduğu ve sonuçta daha genotoksik olduğu bildirilmiştir. Buradan da anlaşılacağı üzere nanomateryal toksisitesinde

nanopartikülün şekli kadar ebatlarının da önemli olduğu ortaya çıkmaktadır. Aynı çalışmada, nanopartiküllerin oluşturduğu toksik etkiye karşı çeşitli antioksidanların etkileri de incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre apocyninin küresel NP ve MP'ler ile beraber kullanımında DNA hasarında artış gözlenirken, diğer formlarda DNA hasarını düşürdüğü gözlenmiştir. Ayrıca tüm C vitamini ve kuersetin uygulamalarının nanopartikül kaynaklı genotoksik hasarı düşürdüğü ifade edilmiştir. Sonuç olarak, antioksidan alımının, NP kaynaklı toksisiteyi iyileştirebildiği de vurgulanmıştır [93].

İncelenen araştırmaların çoğunda, metal oksit NP'lerin genotoksik potansiyele sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca, aynı partikülün normal ebatlı formlarına kıyasla nanopartikül formlarının genotoksik etkilerinin genelde daha yüksek olduğu vurgulanmaktadır. Nanopartiküllerin belirlenen toksik etkilerinde boyut, şekil ve yüzey kaplama özellikleri gibi fizikokimyasal nitelikleri kadar, nanopartiküllerin uygulandıkları canlı türü, hücre tipi, kullanıldığı ortam ve çalışmada yararlanılan genetik toksisite testi de önemli rol oynamaktadır. Tüm bu parametrelere ilave olarak nanopartiküllerin teste kullanılan konsantrasyonları ile hücre/dokuların nanopartiküllere maruziyet süreleri de önemli parametrelerdir (Tablo 1). Metal oksit NP'lerin genotoksik etkileri sadece Tablo 1'de belirtilen memeli ve bakteri türleri ile sınırlı değildir. Yapılan çalışmalar metal ve metal oksit türevi NP'lerin yüksek yapılı bitkilerden planktonlara, omurgalılardan omurgasızlara kadar diğer birçok canlı türünde de genotoksik etkilerinin olabileceğini göstermektedir [94-99]. Ancak söz konusu araştırmalar bu derlemenin kapsamı dışında tutulmuştur.

Tablo 1: Metal oksit nanopartiküllerinin genotoksik etkileri

NP	Karakterizasyon	Hücre tipi	Test	Maruziyet	Sonuç	Kaynak
Al ₂ O ₃	4,17 nm	PBL	KA MN	1, 12,5, 25, 50, 100, 250, 500, 1000, 2000 µg/mL, 72s	-	[78]
Al ₂ O ₃	13 nm, küresel	Fare makrofaj hücre hattı	Komet	200, 400 µg/mL, 24 s	+	[79]
Al ₂ O ₃	~28 nm, küresel	Çin hamster ovarium hücresi	KKD MN	1, 5, 10, 25 µg/mL, 24 s 0,5, 1, 5, 10 µg/mL, 24 s	- +	[80]
Al ₂ O ₃	39 nm, küresel	PBL	Komet KA	100 µg/mL, 24 s 100 µg/mL, 24 s	- -	[81]
Al ₂ O ₃	40 nm	<i>Salmonella typhimurium</i> Maymun böbrek hücre hattı	Ames MN Komet	50, 100, 200, 400, 800, 1600, 3200 µg/petri, 72 s 10, 25, 50, 100 µg/mL, 24 s 5, 10, 25, 50, 100 µg/mL, 3 s	- - -	[9]
CeO ₂	5,5 nm	İnsan lens epitel hücresi	Komet KKD	5, 10 µg/mL, 24 s	- -	[10]
CeO ₂	~25 nm ~3 µm	İnsan nöroblastoma hücresi	Komet MN	10, 20, 50, 100, 200 µg/mL 24 s	+(sadece NP, 200 µg/mL) +(sadece NP, 100 ve 200 µg/mL)	[82]
CeO ₂	25 nm NPs	PBL	KA	0,78, 1,56, 3,125, 6,25,	+	[24]

	148 nm		MN	12,5, 50 µg/mL, 72 s	+	
CeO ₂	33 nm	A549	Komet	0,1, 0,3, 1, 3, 10, 30, 75 µg/cm ²	+	(30, 75 µg/cm ² , 3s) [83]
		TK6	Komet	0,14, 0,42, 1,4, 4,2, 14, 42, 140 µg/mL, 3 ve 24 s	+	(140 µg/mL, 3s) sitotoksik + (140 µg/mL, 24s) sitotoksik
CeO ₂	40 nm, küresel	Rat	Komet	0,1, 0,3, 1, 3 mg/m ³ 24 s	-	[14]
			MN		-	
CuO	1-100 nm şekilsiz, 7 nm küresel, 7x40 nm çubuk, 1200 nm x 270 nm x 30 nm iğ	PBL fare makrofaj hücre hattı	Komet	0,1, 1, 10 µg/mL, 2 ve 24 s	+	[17]
			MN	0,1, 1, 10 µg/mL 48 s	+	
CuO	27-95 nm	<i>In vivo</i> fare	MN	1, 3 mg/fare, 24, 48, 72 s	+	(en yüksek artış 48s) [84]
CuO	~35	Caco-2	Komet	5, 10, 15, 20 µg/mL, 24 s	+	(daha toksik) [26]
		HepG2			+	
CuO	50-70 nm çubuk	SK-Hep-1	Komet	25 µg/mL, 24 s	+	[20]
		HepG2			+	
CuO	<50 nm <10 µm	BEAS-2B	Komet	2, 10, 20, 30, 40 µg/cm ² , 3, 6, 24 s	+	(nm daha toksik) [25]
			MN	5, 25, 50, 75, 100 µg/cm ² , 48 s	+	(nm daha toksik)
CuO	~55	HT29	Komet	2, 4, 6, 8, 10 µg/mL, 24 s	-	[85]
Fe ₂ O ₃	4-8 nm	<i>Salmonella typhimurium</i>	Ames	50, 100, 200, 400, 800, 1600, 3200 µg/petri 72 s	-	[9]
		Maymun böbrek hücre hattı	MN	10, 25, 50, 100 µg/mL, 24 s	-	
			Komet	5, 10, 25, 50, 100 µg/mL, 3 s	-	
Fe ₃ O ₄	~8 nm, küresel	PBL Hek-293 <i>Salmonella typhimurium</i>	Komet	10, 30, 70 µg/mL 30 dakika, 1 s	+	(zamana bağlı artış) [86]
			AMES	10, 30, 70 µg/petri	+	(zamana bağlı artış) +(70 µg/petri)
Fe ₂ O ₃	14 nm	İnsan nöroblastoma hücresi	Komet	50, 200 µg/mL, 24s	+	[23]
	30 nm				+	
Fe ₃ O ₄	~25 nm çokgen	A549	Komet	25, 50, 100 µg/mL, 24s	+	[87]
		A431			+	
Fe ₂ O ₃	~ 44 nm, küresel	PBL	Komet	100 µg/mL, 24 s	+	[81]
			KA		+	
Fe ₂ O ₃	60-100 nm	<i>In vivo</i> fare	MN	1, 3 mg/fare, 24, 48, 72 s	+	(en yüksek artış 48s) [84]
Fe ₃ O ₄	80 nm	<i>In vivo</i> fare	MN	1, 3 mg/fare, 24,48,72 s	+	(en yüksek artış 48s) [84]
Fe ₂ O ₃ dekstran kaplı	~10 nm, küresel ve çok azı çubuk şeklinde	MCL-5	MN	1-100 µg/mL, 24 s	+	> 4 µg/mL [19]
					-	
kaplı olmayan					-	
Fe ₃ O ₄ dekstran kaplı	~10 nm, küresel	MCL-5	MN	1-100 µg/mL, 24 s	-	[19]
					-	
kaplı olmayan					-	

Fe ₃ O ₄ oleik asit kaplı, serumlu ortam (S+)	~11 nm, küresel	A172	Komet	5, 25, 50, 100 µg/mL, 3 s, 24 s	+ (S+); - (S-) + (S+); (S-)	[88]
serumsuz ortam (S-)			MN	5, 25, 50, 100 µg/mL, 3 s + 48 s, 24 s + 48s	- (S+, S-) - (S+, S-)	
SiO ₂	10 nm 25 nm 50 nm 100 nm	İnsan endotel hücreleri	ven Komet	1, 5, 25 µg/mL, 4 s	+ (boyut azaldıkça)	[22]
			MN	1, 5, 25 µg/mL, 24 s	+ (boyut azaldıkça)	
SiO ₂	~12 nm	Fare makrofaj hücre hattı	Komet	200, 400 µg/mL, 24 s	+	[79]
SiO ₂	15 nm 55 nm	PBL	MN	31,6, 100, 316, 1000 µg/mL, 24 s	-	[89]
		Rat	Komet	25, 50, 125 mg/kg, 4, 24, 48 s	+	
			MN		+	
SiO ₂	17 nm, küresel	PBL	Komet	100 µg/mL, 24 s	-	[81]
			KA	100 µg/mL, 24s	-	
SiO ₂ kaplı olmayan, vinil kaplı, aminopropil vinil kaplı	10-50 nm aralığında, küresel	PBL	Komet	10, 25, 50, 100 µg/mL, 2 ve 24 s	+(kaplı olmayan)	[90]
					-	
			KA	0, 10, 25, 50, 100 µg/mL, 50 s	-/-/-	
TiO ₂	~20 nm	PBL	Komet	25, 75, 125 µM, 24 s	+(75 ve 125 µM)	[21]
			KA		+(75 ve 125 µM)	
TiO ₂	~20 nm	Çin hamster ovaryum hücresi	KKD	1, 5, 10, 25 µg/mL, 48 s	+(10 ve 25 µg/mL sitotoksik)	[80]
			MN	0,5, 1, 5, 10 µg/mL, 24 s	+(10 µg/mL sitotoksik)	
TiO ₂	19-101 nm	<i>In vivo</i> fare	MN	1, 3 mg/fare, 24, 48, 72 s	+(en yüksek artış 48s)	[84]
TiO ₂	<100 nm	PBL	KA	20, 40, 60, 80, 100 µg/mL, 24 s, 48 s	+(24s, tüm dozlar) +(48s, 20 ve 40 µg/mL)	[57]
			KKD		+	
			MN	48 s	-	
			Komet	1 s	+(100 µg/mL, kuyruk uzunluğu)	
TiO ₂	~110 nm	A549	Komet	0.1, 0.3, 1, 3, 10, 30, 75 µg/cm ²	3 s (+), 75 µg/cm ² sitotoksik 24 s (-), 75 µg/cm ² sitotoksik 3 s (+), 24 s (+) 140 µg/mL	[83]
		TK6		0.14, 0.42, 1.4, 4.2, 14, 42, 140 µg/mL, 3 ve 24 s		
TiO ₂	~20 nm küresel ~150 nm şekilsiz ~50 nm bipiramit ~108 nm cubuk ~75 nm yassı	BEAS-2B	Komet	20, 50, 80, 120, 160 µg/mL, 24 s	+	[91]
					+	
					-	
					-	
					+	
TiO ₂	~27 nm	HT29	Komet	2, 4, 6, 8, 10 µg/mL, 24 s	+(8, 10 µg/mL)	[85]
TiO ₂	40 nm	<i>Salmonella Typhimurium</i>	AMES	78, 156, 312, 625, 1250 µg/petri	-	[15]
ZnO	10-50 nm	NRK-52E	Komet	12.5, 25, 32.5, 50 µg/mL, 24s	+(50 µg/mL)	[92]
ZnO	19,8 nm	PBL	KA	1, 12.5, 25, 50, 100, 250, 500, 1000, 2000 µg/mL, 72 s	+	[78]
			MN		+	
					500, 1000, 2000 µg/mL sitotoksik	

ZnO	20 nm ve 70 nm	CHL akciğer	KA	3,75, 7,5, 15 µg/mL 24 s	-	[13]
		Rat	Komet	500, 1000, 2000 mg/kg, 24 ve 45 s	-	
		Fare	MN	500, 1000, 2000 mg/kg, 24 s	-	
		<i>Salmonella typhimurium</i>	Ames	312,5, 625, 1250, 2500, 5000 µg/petri, 48-72 s	-	
ZnO	~58 nm	HT29	Komet	2, 4, 6, 8, 10 µg/mL, 24 s	-	[85]
ZnO	<100 nm	PBL	KA	1, 5, 10, 20, 30 µg/mL, 24 s, 48 s	+ (24 s, 20, 30 µg/mL) + (48 s)	[57]
			KKD		+ (24 s, 10, 20, 30 µg/mL) + (48 s, 20, 30 µg/mL)	
			MN	48 s	-	
			Komet	1 s	+ (30 µg/mL, kuyruk yoğunluğu) + (5, 20 µg/mL, kuyruk uzunluğu, momenti)	
ZnO	~147 nm	A549	Komet	0,1, 0,3, 1, 3, 10, 30, 75 µg/cm ² , 3 ve 24 s	3 s (+), 75 µg/cm ² sitotoksik 24 s (+), 75 µg/cm ² sitotoksik	[83]
		TK6		0,14, 0,42, 1,4, 4,2, 14, 42, 140 µg/mL, 3 ve 24 s	3 s (+), 42, 140 µg/mL sitotoksik 24 s (+), 14, 42, 140 µg/mL sitotoksik	
ZnO	187 nm, küresel NP	PBL	Komet	25, 50, 100 µg/mL, 4s	+	[93]
	670 nm, çubuk-NP				-	
	683 nm, küresel MP	PBL	Komet	25 µg/ml (NP), 4s	+	
	1039 nm, çubuk MP	+Apocynin (2 s)		25 µg/mL (NP), 4s	-	
				50 µg/mL (MP), 4s	+	
				50 µg/mL (MP), 4s	-	
		PBL+C vitamin (2 s)	Komet	25 µg/mL (NP), 4s	-	
				25 µg/mL (NP), 4s	-	
				50 µg/mL (MP), 4s	-	
				50 µg/mL (MP), 4s	-	
		PBL+Kuersetin (2 s)	Komet	25 µg/mL (NP), 4s	-	
				25 µg/mL (NP), 4s	-	
				50 µg/mL (MP), 4s	-	
				50 µg/mL (MP), 4s	-	

A172: İnsan glioblastoma, A531: İnsan deri epitel hücresi, A549: İnsan alveolar epitel hücresi, Ames: Bakteriyal geri mutasyon testi, BEAS-2B: İnsan bronşial epitel hücresi, Caco-2: Kolorektal adenokarsinom hücresi, CHL: Çin Hamster akciğer hücresi, HEK-293: Embriyonik böbrek hücresi hattı, HepG2: Farklılaşmış hepatosellüler karsinom hücresi, HT29: İnsan kolorektal adenokarsinom hücresi, KA: Kromozomal anormallik testi, KKD: Kardeş kromatit değişimi testi, MCL-5: İnsan lenfoblastoid hücre hattı, MN: Mikronükleus testi, MP: Mikropartikül, NP: Nanopartikül, NRK-52E: Sıçan böbrek epitel hücresi, PBL: İnsan periferik kan lenfositleri, s: saat, SK-Hep-1: Farklılaşmamış hepatosellüler karsinom hücresi, TK6: Lenfoblastoid hücresi.

V. METAL OKSİT NANOPARTİKÜLLERİN GENOTOKSİK MEKANİZMALARI

Metal oksit nanopartiküllerin oluşturduğu genetik hasarlar, primer (direkt, indirekt) ve sekonder olmak üzere iki farklı mekanizma ile açıklanmaktadır. Primer

etki iki farklı şekilde gözlenebilmektedir. Birinci senaryoda, nanopartiküller direkt olarak DNA üzerine etkiye bulunur. İkinci senaryoda ise nanopartikül indirekt olarak, aracı biyomoleküller (protein, enzim gibi) ile etkileşime girerek oksidatif strese bağlı reaktif oksijen türleri oluşturarak genotoksisiteye sebep olduğu belirtilmektedir [57-60, 100]. Primer indirekt etkinin mekanizması ise şu şekilde açıklanmaktadır: ROT artışına bağlı olarak oluşan oksidatif hasarı önlemek için hücrel antioksidanlar kullanılarak, ROT'lerinin etkisi yok edilmeye çalışılmaktadır. Fakat ROT'lerinin oluşumu ve hücredeki antioksidan düzeyi arasında bir dengesizlik bulunması durumunda hücrede oksidatif stres düzeyi yükselmekte, buna bağlı olarak da DNA hasarında artış meydana gelmektedir. Benzer şekilde antioksidan sistemin bloke edilmesi de ROT'lerinin oluşumunu artırarak indirekt DNA hasarına neden olmaktadır [36, 100]. Genotoksik etkinin sekonder mekanizması ise genellikle bir nanopartikülün *in vivo* koşullarda kronik bağımsızlık yanıtını tetiklemesiyle oluşmaktadır. İnflamasyon sonucunda maruziyet bölgesine gelen nötrofil ve

makrofajlar tarafından ROT'leri oluşturulmakta, sekonder yolla genotoksik hasarlar tetiklenmektedir [57-60, 89, 100]. Normal fizyolojik şartlarda savunma sistemi toksik ajanlara karşı vücudu korumak amacıyla nötrofil ve makrofajları hasar bölgesine göndermek şeklinde bir immün yanıt vermektedir. Ancak söz konusu immün yanıt kronik inflamasyona, buna bağlı olarak oksidatif stres artışına sonuçta ise hücrelerde sekonder hasara neden olmaktadır [101]. Metal oksit nanopartiküllerinin temel toksisite mekanizması çoğunlukla oksidatif stres oluşumuna bağlı olarak gerçekleşmektedir. Oksidatif stres oluşumu ile ROT üretimi artmakta ve bu durum normal hücresel aktiviteleri etkileyerek genotoksisiteye sebep olmaktadır [20, 22, 36, 81, 102-107].

Metal oksit NP'lerinin genotoksik mekanizması kısaca özetlenecek olursa, NP'ler oksidatif stresi artırarak hücrede inflamasyon oluşturabilmekte, genetik materyalde hasara [17, 108] ve gen ekspresyonunda değişime sebep olabilmektedir [109, 110]. Yeteri kadar küçük olduklarında nükleer membrandan geçerek DNA ile direkt etkileşime girebilmektedirler [36, 79]. Nanopartiküllerin sebep olduğu hasar onarılamayacak düzeyde olduğunda hücre apoptoza uğramaktadır [34, 36, 111, 112]. Hasarın uygun bir şekilde tamir edilemediği ve apoptozun gerçekleşmediği senaryoda ise, genomik kararsızlık ortaya çıkmakta, yaşlanma, nörodejeneratif hastalıklar ve çeşitli kanserler gelişebilmektedir [4, 60, 100, 113].

VI. SONUÇ ve TARTIŞMA

Nanoteknolojide yaşanan hızlı gelişmeler insan sağlığı ve hayatı konusunda birçok avantaj sağlarken, nanopartiküllerin kontrolsüz kullanımları da aynı şekilde problemlere sebep olmaktadır. Ortaya çıkan problemlerden ise insanlar kadar diğer canlılar da etkilenmekte ve sonuçta toksik, özellikle genotoksik etkiler gözlenmektedir. Farklı genetik testler ile yapılan araştırmalar, Al₂O₃, CeO₂, CuO, Fe₂O₃, SiO₂, TiO₂ ve ZnO gibi metal oksit nanopartiküllerin genellikle genotoksik etkili olduğunu dolayısıyla insan sağlığı açısından risk oluşturduğunu göstermektedir. Her ne kadar bazı araştırmalarda genotoksik etki gözlenmemiş ise de bu partiküllerin potansiyel zararlı olabileceği yönündeki bulgular daha fazladır. Nanopartiküller doğrudan nükleusa ulaşarak veya hücre bölünmesi esnasında DNA ve kromozomlar ile direk etkileşime girmek yoluyla etki gösterebildiği gibi benzr etkilere dolaylı şekilde de sebep olabilmektedir. Diğer etki şekilleri ise, hücrelerin savunma sistemini devre dışı bırakarak genetik hasarlara neden olmak şeklinde ortaya çıkmaktadır. Nanopartiküllerin, başta beyin olmak üzere, çeşitli organlarda birikebileceğinin gösterilmesi de organizma için zararlar oluşturabileceğinin kanıtıdır. Çalışmalardan elde edilen birbirine zıt sonuçlar, nanopartiküllerin genotoksik etkilerinin değişik test sistemlerinden yararlanılarak farklı hücre tipleri üzerinde *in vitro* koşullarda ve hatta değişik organizmalarda *in vivo* şartlarda detaylı bir

şekilde incelenmesi gerektiğini göstermektedir. Zira nanopartiküllerden mümkün olan en güvenli şekilde daha fazla yararlanmanın ancak bu şekilde mümkün olduğu kanaatindeyiz.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, 05/2011-74 numaralı Gazi Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projesi kapsamında kısmen desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Colvin, V. L. (2003). The potential environmental impact of engineered nanomaterials. *Nature Biotechnology*, 21(10), 1166-1170.
- [2] Wang, F., Gao, F., Lan, M., Yuan, H., Huang, Y., & Liu, J. (2009). Oxidative stress contributes to silica nanoparticle-induced cytotoxicity in human embryonic kidney cells. *Toxicology In Vitro*, 23(5), 808-815.
- [3] Oberdörster, G., Oberdörster, E., & Oberdörster, J. (2005). Nanotoxicology: an emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles. *Environmental Health Perspectives*, 113(7), 823-839.
- [4] Lanone, S., & Boczkowski, J. (2006). Biomedical applications and potential health risks of nanomaterials: molecular mechanisms. *Current Molecular Medicine*, 6(6), 651-663.
- [5] Choi, H. S., Kim, Y. J., Song, M., Song, M. K., & Ryu, J. C. (2011). Genotoxicity of nano-silica in mammalian cell lines. *Toxicology and Environmental Health Sciences*, 3(1), 7-13.
- [6] Wahrheit, D. B. (2018). Hazard and risk assessment strategies for nanoparticle exposures: how far have we come in the past 10 years? *F1000Research*, 7.
- [7] Vance, M. E., Kuiken, T., Vejerano, E. P., McGinnis, S. P., Hochella Jr, M. F., Rejeski, D., & Hull, M. S. (2015). Nanotechnology in the real world: Redeveloping the nanomaterial consumer products inventory. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 6(1), 1769-1780.
- [8] Jin, Y., Kannan, S., Wu, M., & Zhao, J. X. (2007). Toxicity of luminescent silica nanoparticles to living cells. *Chemical Research in Toxicology*, 20(8), 1126-1133.
- [9] Sadiq, R., Khan, Q. M., Mobeen, A., & Hashmat, A. J. (2015). *In vitro* toxicological assessment of iron oxide, aluminium oxide and copper nanoparticles in prokaryotic and eukaryotic cell types. *Drug and Chemical Toxicology*, 38(2), 152-161.
- [10] Pierscionek, B. K., Li, Y., Yasseen, A. A., Colhoun, L. M., Schachar, R. A., & Chen, W. (2009). Nanoceria have no genotoxic effect on human lens epithelial cells. *Nanotechnology*, 21(3), 035102.
- [11] Figuerola, A., Di Corato, R., Manna, L., & Pellegrino, T. (2010). From iron oxide nanoparticles towards advanced iron-based

- inorganic materials designed for biomedical applications. *Pharmacological Research*, 62(2), 126-143.
- [12] Singh, S. P., Rahman, M. F., Murty, U. S. N., Mahboob, M., & Grover, P. (2013). Comparative study of genotoxicity and tissue distribution of nano and micron sized iron oxide in rats after acute oral treatment. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 266(1), 56-66
- [13] Kwon, J. Y., Lee, S. Y., Koedrih, P., Lee, J. Y., Kim, K. M., Oh, J. M., & Seo, Y. R. (2014). Lack of genotoxic potential of ZnO nanoparticles in *in vitro* and *in vivo* tests. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 761, 1-9.
- [14] Cordelli, E., Keller, J., Eleuteri, P., Villani, P., Ma-Hock, L., Schulz, M., & Pacchierotti, F. (2017). No genotoxicity in rat blood cells upon 3-or 6-month inhalation exposure to CeO₂ or BaSO₄ nanomaterials. *Mutagenesis*, 32(1), 13-22.
- [15] Du, X., Gao, S., Hong, L., Zheng, X., Zhou, Q., & Wu, J. (2019). Genotoxicity evaluation of titanium dioxide nanoparticles using the mouse lymphoma assay and the Ames test. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 838, 22-27.
- [16] Cabellos, J., Gimeno-Benito, I., Catalán, J., Lindberg, H. K., Vales, G., Fernandez-Rosas, E., & Janer, G. (2020). Short-term oral administration of non-porous and mesoporous silica did not induce local or systemic toxicity in mice. *Nanotoxicology*, 28: 1-18.
- [17] Di Bucchianico, S., Fabbri, M. R., Misra, S. K., Valsami-Jones, E., Berhanu, D., Reip, P., & Migliore, L. (2013). Multiple cytotoxic and genotoxic effects induced *in vitro* by differently shaped copper oxide nanomaterials. *Mutagenesis*, 28(3), 287-299.
- [18] Sun, T., Yan, Y., Zhao, Y., Guo, F., & Jiang, C. (2012). Copper oxide nanoparticles induce autophagic cell death in A549 cells. *PloS one*, 7(8), e43442.
- [19] Singh, N., Jenkins, G. J., Nelson, B. C., Marquis, B. J., Maffei, T. G., Brown, A. P., & Doak, S. H. (2012). The role of iron redox state in the genotoxicity of ultrafine superparamagnetic iron oxide nanoparticles. *Biomaterials*, 33(1), 163-170.
- [20] Kung, M. L., Hsieh, S. L., Wu, C. C., Chu, T. H., Lin, Y. C., Yeh, B. W., & Hsieh, S. (2015). Enhanced reactive oxygen species overexpression by CuO nanoparticles in poorly differentiated hepatocellular carcinoma cells. *Nanoscale*, 7(5), 1820-1829.
- [21] Patel, S., Patel, P., & Bakshi, S. R. (2017). Titanium dioxide nanoparticles: an *in vitro* study of DNA binding, chromosome aberration assay, and comet assay. *Cytotechnology*, 69(2), 245-263.
- [22] Zhou, F., Liao, F., Chen, L., Liu, Y., Wang, W., & Feng, S. (2019). The size-dependent genotoxicity and oxidative stress of silica nanoparticles on endothelial cells. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(2), 1911-1920.
- [23] Askri, D., Cunin, V., Béal, D., Berthier, S., Chovelon, B., Arnaud, J., & Lehmann, S. G. (2019). Investigating the toxic effects induced by iron oxide nanoparticles on neuroblastoma cell line: an integrative study combining cytotoxic, genotoxic and proteomic tools. *Nanotoxicology*, 13(8), 1021-1040.
- [24] Arslan, K., & Akbaba, G. B. (2020). *In vitro* genotoxicity assessment and comparison of cerium (IV) oxide micro- and nanoparticles. *Toxicology and Industrial Health*, 36(2), 76-83.
- [25] Siivola, K. M., Suhonen, S., Hartikainen, M., Catalán, J., & Norppa, H. (2020). Genotoxicity and cellular uptake of nanosized and fine copper oxide particles in human bronchial epithelial cells *in vitro*. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 856, 503217.
- [26] Abudayyak, M., Guzel, E., & Özhan, G. (2020). Cupric oxide nanoparticles induce cellular toxicity in liver and intestine cell lines. *Advanced Pharmaceutical Bulletin*, 10(2), 213.
- [27] Balasubramanyam, A., Sailaja, N., Mahboob, M., Rahman, M. F., Misra, S., Hussain, S. M., & Grover, P. (2009). Evaluation of genotoxic effects of oral exposure to aluminum oxide nanomaterials in rat bone marrow. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 676(1-2), 41-47.
- [28] Peters, R. J., Oomen, A. G., van Bommel, G., van Vliet, L., Undas, A. K., Munniks, S., & van der Lee, M. (2020). Silicon dioxide and titanium dioxide particles found in human tissues. *Nanotoxicology*, 14(3), 420-432.
- [29] Rahi, A., Sattarahmady, N., & Heli, H. (2015). Toxicity of nanomaterials-physicochemical effects. *SSU Journals*, 22(6), 1737-1754.
- [30] Soto, K., Garza, K. M., & Murr, L. E. (2007). Cytotoxic effects of aggregated nanomaterials. *Acta Biomaterialia*, 3(3), 351-358.
- [31] Lu, X., Zhu, T., Chen, C., & Liu, Y. (2014). Right or left: the role of nanoparticles in pulmonary diseases. *International Journal of Molecular Sciences*, 15(10), 17577-17600.
- [32] Naseem, S., Gato, M. A., Dar, A. M., & Qasim, K. (2014). *In vivo* toxicity of nanoparticles: Modalities and treatment. *European Chemical Bulletin*, 3(10), 992-1000.
- [33] Valdiglesias, V., Kiliç, G., Costa, C., Fernández-Bertólez, N., Pásaro, E., Teixeira, J. P., &

- Laffon, B. (2015). Effects of iron oxide nanoparticles: cytotoxicity, genotoxicity, developmental toxicity, and neurotoxicity. *Environmental and Molecular Mutagenesis*, 56(2), 125-148.
- [34] Wang, W., Zeng, C., Feng, Y., Zhou, F., Liao, F., Liu, Y., & Wang, X. (2018). The size-dependent effects of silica nanoparticles on endothelial cell apoptosis through activating the p53-caspase pathway. *Environmental Pollution*, 233, 218-225.
- [35] Fahmy, B., & Cormier, S. A. (2009). Copper oxide nanoparticles induce oxidative stress and cytotoxicity in airway epithelial cells. *Toxicology In Vitro*, 23(7), 1365-1371.
- [36] Wang, Z., Li, N., Zhao, J., White, J. C., Qu, P., & Xing, B. (2012). CuO nanoparticle interaction with human epithelial cells: cellular uptake, location, export, and genotoxicity. *Chemical Research in Toxicology*, 25(7), 1512-1521.
- [37] Braydich-Stolle, L., Hussain, S., Schlager, J. J., & Hofmann, M. C. (2005). *In vitro* cytotoxicity of nanoparticles in mammalian germline stem cells. *Toxicological Sciences*, 88(2), 412-419.
- [38] Wang, R., Song, B., Wu, J., Zhang, Y., Chen, A., & Shao, L. (2018). Potential adverse effects of nanoparticles on the reproductive system. *International Journal of Nanomedicine*, 13, 8487-8506.
- [39] Lee, J., Jeong, J. S., Kim, S. Y., Lee, S. J., Shin, Y. J., Im, W. J., Yu, & W. J. (2020). Safety assessment of cerium oxide nanoparticles: Combined repeated-dose toxicity with reproductive/developmental toxicity screening and biodistribution in rats. *Nanotoxicology*, 14(5), 696-710.
- [40] Brohi, R. D., Wang, L., Talpur, H. S., Wu, D., Khan, F. A., Bhattarai, D., & Huo, L. J. (2017). Toxicity of nanoparticles on the reproductive system in animal models: a review. *Frontiers in Pharmacology*, 8, 606.
- [41] Warheit, D. B. (2008). How meaningful are the results of nanotoxicity studies in the absence of adequate material characterization? *Toxicological Sciences*, 101(2), 183-185.
- [42] Brown, S. C., Kamal, M., Nasreen, N., Baumuratov, A., Sharma, P., Antony, V. B., & Moudgil, B. M. (2007). Influence of shape, adhesion and simulated lung mechanics on amorphous silica nanoparticle toxicity. *Advanced Powder Technology*, 18(1), 69-79.
- [43] Brunner, T. J., Wick, P., Manser, P., Spohn, P., Grass, R. N., Limbach, L. K., & Stark, W. J. (2006). *In vitro* cytotoxicity of oxide nanoparticles: comparison to asbestos, silica, and the effect of particle solubility. *Environmental Science & Technology*, 40(14), 4374-4381.
- [44] Misra, S. K., Nuseibeh, S., Dybowska, A., Berhanu, D., Tetley, T. D., & Valsami-Jones, E. (2014). Comparative study using spheres, rods and spindle-shaped nanoplatelets on dispersion stability, dissolution and toxicity of CuO nanomaterials. *Nanotoxicology*, 8(4), 422-432.
- [45] Lee, J. H., Ju, J. E., Kim, B. I., Pak, P. J., Choi, E. K., Lee, H. S., & Chung, N. (2014). Rod-shaped iron oxide nanoparticles are more toxic than sphere-shaped nanoparticles to murine macrophage cells. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 33(12), 2759-2766.
- [46] Liu, Y., Xia, Q., Liu, Y., Zhang, S., Cheng, F., Zhong, Z., & Xiao, K. (2014). Genotoxicity assessment of magnetic iron oxide nanoparticles with different particle sizes and surface coatings. *Nanotechnology*, 25(42), 425101.
- [47] Yang, L., Kuang, H., Zhang, W., Aguilar, Z. P., Xiong, Y., Lai, W., & Wei, H. (2015). Size dependent biodistribution and toxicokinetics of iron oxide magnetic nanoparticles in mice. *Nanoscale*, 7(2), 625-636.
- [48] Corradi, S., Gonzalez, L., Thomassen, L. C., Bilaničová, D., Birkedal, R. K., Pojana, G., & Kirsch-Volders, M. (2012). Influence of serum on in situ proliferation and genotoxicity in A549 human lung cells exposed to nanomaterials. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 745(1-2), 21-27.
- [49] Gonzalez, L., De Santis Puzzonina, M., Ricci, R., Aureli, F., Guarguaglini, G., Cubadda, F., & Kirsch-Volders, M. (2015). Amorphous silica nanoparticles alter microtubule dynamics and cell migration. *Nanotoxicology*, 9(6), 729-736.
- [50] Ghosh, S., Ghosh, I., Chakrabarti, M., & Mukherjee, A. (2020). Genotoxicity and biocompatibility of superparamagnetic iron oxide nanoparticles: Influence of surface modification on biodistribution, retention, DNA damage and oxidative stress. *Food and Chemical Toxicology*, 136, 110989.
- [51] Zeiger E. (2010). Genetic Toxicology Testing. *Comprehensive Toxicology*. 2nd (Ed CA McQueen), Chapel Hill USA, s.139-158.
- [52] Ünal, F., Yüzbaşıoğlu, D., Yılmaz, S., Akıncı, N., & Aksoy, H. (2011). Genotoxic effects of chlorophenoxy herbicide diclofop-methyl in mice *in vivo* and in human lymphocytes *in vitro*. *Drug and Chemical Toxicology*, 34(4), 390-395.
- [53] Yüzbaşıoğlu, D., Yılmaz, E. A., & Fatma, Ünal (2016). Antidepresan ilaçlar ve genotoksisite. *TÜBAV Bilim Dergisi*, 9(1), 17-28.
- [54] Dusinska, M., Tulinska, J., El Yamani, N., Kuricova, M., Liskova, A., Rollerova, E., & Smolkova, B. (2017). Immunotoxicity, genotoxicity and epigenetic toxicity of nanomaterials: new strategies for toxicity testing? *Food and Chemical Toxicology*, 109,

- 797-811.
- [55] Elespuru, R., Pfuhler, S., Aardema, M. J., Chen, T., Doak, S. H., Doherty, A., & Tanir, J. Y. (2018). Genotoxicity assessment of nanomaterials: Recommendations on best practices, assays, and methods. *Toxicological Sciences*, 164(2), 391-416.
- [56] Avuloglu-Yilmaz, E., Yuzbasioglu, D., & Unal, F. (2020). *In vitro* genotoxicity assessment of monopotassium glutamate and magnesium diglutamate. *Toxicology in Vitro*, 65, 104780.
- [57] Unal, F., Demirtaş Korkmaz, F., Suludere, Z., Erol, O., & Yuzbasioglu, D. (2021). Genotoxicity of Two Nanoparticles: Titanium Dioxide and Zinc Oxide. *Gazi University Journal of Science*, DOI: 10.35378/gujs.826911.
- [58] Golbamaki, N., Rasulev, B., Cassano, A., Robinson, R. L. M., Benfenati, E., Leszczynski, J., & Cronin, M. T. (2015). Genotoxicity of metal oxide nanomaterials: review of recent data and discussion of possible mechanisms. *Nanoscale*, 7(6), 2154-2198.
- [59] Magdolenova, Z., Collins, A., Kumar, A., Dhawan, A., Stone, V., & Dusinska, M. (2014). Mechanisms of genotoxicity. A review of *in vitro* and *in vivo* studies with engineered nanoparticles. *Nanotoxicology*, 8(3), 233-278.
- [60] Huang, R., Zhou, Y., Hu, S., & Zhou, P. K. (2019). Targeting and non-targeting effects of nanomaterials on DNA: challenges and perspectives. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 18(4), 617-634.
- [61] Yazdimamaghani, M., Moos, P. J., Dobrovol'skaia, M. A., & Ghandehari, H. (2019). Genotoxicity of amorphous silica nanoparticles: Status and prospects. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*, 16, 106-125.
- [62] McArt, D. G., McKerr, G., Saetzler, K., Howard, C. V., Downes, C. S., & Wasson, G. R. (2010). Comet sensitivity in assessing DNA damage and repair in different cell cycle stages. *Mutagenesis*, 25(3), 299-303.
- [63] Collins, A. R. (2014). Measuring oxidative damage to DNA and its repair with the comet assay. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-General Subjects*, 1840(2), 794-800.
- [64] Azqueta, A., Langie, S. A., Boutet-Robinet, E., Duthie, S., Ladeira, C., Møller, P., & Godschalk, R. W. (2019). DNA repair as a human biomonitoring tool: Comet assay approaches. *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*, 781, 71-87.
- [65] Erikel, E., Yuzbasioglu, D., & Unal, F. (2020). Genotoxic and antigenotoxic potential of amygdalin on isolated human lymphocytes by the comet assay. *Journal of Food Biochemistry*, 44(10), e13436.
- [66] Langie, S. A., Azqueta, A., & Collins, A. R. (2015). The comet assay: past, present, and future. *Frontiers in Genetics*, 13(6):266. doi: 10.3389/fgene.
- [67] Fenech, M. (2007). Cytokinesis-block micronucleus cytome assay. *Nature Protocols*, 2(5), 1084.
- [68] Fenech, M., Kirsch-Volders, M., Natarajan, A. T., Surrallés, J., Crott, J. W., Parry, J., & Thomas, P. (2011). Molecular mechanisms of micronucleus, nucleoplasmic bridge and nuclear bud formation in mammalian and human cells. *Mutagenesis*, 26(1), 125-132.
- [69] Bonassi, S., Znaor, A., Ceppi, M., Lando, C., Chang, W. P., Holland, N., & Fenech, M. (2007). An increased micronucleus frequency in peripheral blood lymphocytes predicts the risk of cancer in humans. *Carcinogenesis*, 28(3), 625-631.
- [70] Boffetta, P., Van Der Hel, O., Norppa, H., Fabianova, E., Fucic, A., Gundy, S., & Bonassi, S. (2007). Chromosomal aberrations and cancer risk: results of a cohort study from Central Europe. *American Journal of Epidemiology*, 165(1), 36-43.
- [71] Vodenkova, S., Polivkova, Z., Musak, L., Smerhovsky, Z., Zoubkova, H., Sytarova, S., & Vodicka, P. (2015). Structural chromosomal aberrations as potential risk markers in incident cancer patients. *Mutagenesis*, 30(4), 557-563.
- [72] Adhikari, A. (2019). Micronuclei (MN), an Important Cancer Biomarker. *Edelweiss Cancer*. 1(1):37-42.
- [73] Wang, H., Wang, Y., Kota, K. K., Sun, B., Kallakury, B., Mikhail, N. N., & Zheng, Y. L. (2017). Strong associations between chromosomal aberrations in blood lymphocytes and the risk of urothelial and squamous cell carcinoma of the bladder. *Scientific Reports*, 7(1), 1-10.
- [74] Vernon, R. E. (2013). Which elements are metalloids? *Journal of Chemical Education*, 90(12), 1703-1707.
- [75] Ju-Nam, Y., & Lead, J. R. (2008). Manufactured nanoparticles: An overview of their chemistry, interactions and potential environmental implications. *Science of the total Environment*, 400(1-3), 396-414.
- [76] Durnev, A. D., Solomina, A. S., Shreder, E. D., Nemova, E. P., Shreder, O., Daugel'-Dauge, N., & Seredenin, S. (2010). *In vivo* study of genotoxicity and teratogenicity of silica nanocrystals. *International Journal of Biomedical Nanoscience and Nanotechnology*, 1(1), 70-86.
- [77] Napierska, D., Thomassen, L. C., Lison, D., Martens, J. A., & Hoet, P. H. (2010). The nanosilica hazard: another variable entity. *Particle and Fibre Toxicology*, 7(1), 1-32.

- [78] Akbaba, G. B., & Türkez, H. (2018). Investigation of the genotoxicity of aluminum oxide, β -tricalcium phosphate, and zinc oxide nanoparticles *in vitro*. *International Journal of Toxicology*, 37(3), 216-222.
- [79] Hashimoto, M., & Imazato, S. (2015). Cytotoxic and genotoxic characterization of aluminum and silicon oxide nanoparticles in macrophages. *Dental Materials*, 31(5), 556-564.
- [80] Di Virgilio, A. L., Reigosa, M., Arnal, P. M., & De Mele, M. F. L. (2010). Comparative study of the cytotoxic and genotoxic effects of titanium oxide and aluminium oxide nanoparticles in Chinese hamster ovary (CHO-K1) cells. *Journal of Hazardous Materials*, 177(1-3), 711-718.
- [81] Rajiv, S., Jerobin, J., Saranya, V., Nainawat, M., Sharma, A., Makwana, P., & Chandrasekaran, N. (2016). Comparative cytotoxicity and genotoxicity of cobalt (II, III) oxide, iron (III) oxide, silicon dioxide, and aluminum oxide nanoparticles on human lymphocytes *in vitro*. *Human Experimental Toxicology*, 35(2), 170-183.
- [82] Kumari, M., Singh, S. P., Chinde, S., Rahman, M. F., Mahboob, M., & Grover, P. (2014). Toxicity study of cerium oxide nanoparticles in human neuroblastoma cells. *International Journal of Toxicology*, 33(2), 86-97.
- [83] El Yamani, N., Collins, A. R., Rundén-Pran, E., Fjellsbø, L. M., Shaposhnikov, S., Zienolddiny, S., & Dusinska, M. (2017). *In vitro* genotoxicity testing of four reference metal nanomaterials, titanium dioxide, zinc oxide, cerium oxide and silver: towards reliable hazard assessment. *Mutagenesis*, 32(1), 117-126.
- [84] Song, M. F., Li, Y. S., Kasai, H., & Kawai, K. (2012). Metal nanoparticle-induced micronuclei and oxidative DNA damage in mice. *Journal of Clinical Biochemistry and Nutrition*, 50(3):211-216.
- [85] Schneider, T., Westermann, M., & Gleis, M. (2017). *In vitro* uptake and toxicity studies of metal nanoparticles and metal oxide nanoparticles in human HT29 cells. *Archives of Toxicology*, 91(11), 3517-3527.
- [86] Gomaa, I. O., Kader, M. H. A., Eldin, T. A. S., & Heikal, O. A. (2013). Evaluation of *in vitro* mutagenicity and genotoxicity of magnetite nanoparticles. *Drug Discoveries & Therapeutics*, 7(3), 116-123.
- [87] Ahamed, M., Alhadlaq, H., Alam, J., Khan, M., Ali, D., & Alarafi, S. (2013). Iron oxide nanoparticle-induced oxidative stress and genotoxicity in human skin epithelial and lung epithelial cell lines. *Current Pharmaceutical Design*, 19(37), 6681-6690.
- [88] Fernández-Bertólez, N., Costa, C., Brandão, F., Duarte, J. A., Teixeira, J. P., Pásaro, E., & Laffon, B. (2019). Evaluation of cytotoxicity and genotoxicity induced by oleic acid-coated iron oxide nanoparticles in human astrocytes. *Environmental and Molecular Mutagenesis*, 60(9), 816-829.
- [89] Downs, T. R., Crosby, M. E., Hu, T., Kumar, S., Sullivan, A., Sarlo, K., & Pfuhler, S. (2012). Silica nanoparticles administered at the maximum tolerated dose induce genotoxic effects through an inflammatory reaction while gold nanoparticles do not. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 745(1-2), 38-50.
- [90] Lankoff, A., Arabski, M., Wegierek-Ciuk, A., Kruszewski, M., Lisowska, H., Banasik-Nowak, A., & Slomkowski, S. (2012). Effect of surface modification of silica nanoparticles on toxicity and cellular uptake by human peripheral blood lymphocytes *in vitro*. *Nanotoxicology*, 7(3), 235-250.
- [91] Gea, M., Bonetta, S., Iannarelli, L., Giovannozzi, A. M., Maurino, V., Bonetta, S., & Schilirò, T. (2019). Shape-engineered titanium dioxide nanoparticles (TiO₂-NPs): cytotoxicity and genotoxicity in bronchial epithelial cells. *Food and Chemical Toxicology*, 127, 89-100.
- [92] Uzar, N. K., Abudayyak, M., Akcay, N., Algun, G., & Özhan, G. (2015). Zinc oxide nanoparticles induced cyto- and genotoxicity in kidney epithelial cells. *Toxicology Mechanisms and Methods*, 25(4), 334-339.
- [93] Shalini, D., Senthilkumar, S., & Rajaguru, P. (2018). Effect of size and shape on toxicity of zinc oxide (ZnO) nanomaterials in human peripheral blood lymphocytes. *Toxicology Mechanisms and Methods*, 28(2), 87-94.
- [94] Ghosh, M., Ghosh, I., Godderis, L., Hoet, P., & Mukherjee, A. (2019). Genotoxicity of engineered nanoparticles in higher plants. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 842, 132-145.
- [95] Park, C. B., Jung, J. W., Baek, M., Sung, B., Park, J. W., Seol, Y., & Kim, Y. J. (2019). Mixture toxicity of metal oxide nanoparticles and silver ions on *Daphnia magna*. *Journal of Nanoparticle Research*, 21(8), 1-13.
- [96] Hou, J., Wu, Y., Li, X., Wei, B., Li, S., & Wang, X. (2018). Toxic effects of different types of zinc oxide nanoparticles on algae, plants, invertebrates, vertebrates and microorganisms. *Chemosphere*, 193, 852-860.
- [97] Zhu, Y., Wu, J., Chen, M., Liu, X., Xiong, Y., Wang, Y., & Wang, X. (2019). Recent advances in the biotoxicity of metal oxide nanoparticles: impacts on plants, animals and microorganisms. *Chemosphere*, 237, 124403.
- [98] Rajput, V., Minkina, T., Sushkova, S., Behal, A., Maksimov, A., Blicharska, E., & Barsova, N. (2020). ZnO and CuO nanoparticles: a threat

- to soil organisms, plants, and human health. *Environmental Geochemistry and Health*, 42(1), 147-158.
- [99] Surendhiran, D., Cui, H., & Lin, L. (2020). Mode of Transfer, Toxicity and Negative Impacts of Engineered Nanoparticles on Environment, Human and Animal Health. *The ELSI Handbook of Nanotechnology: Risk, Safety, ELSI and Commercialization*, s.165-204.
- [100] Doak, S. H., Liu, Y., & Chen, C. (2012). Genotoxicity and cancer. *Adverse Effects of Engineered Nanomaterials*; Elsevier Inc.: Amsterdam, The Netherlands, s. 243-261.
- [101] Kryston, T. B., Georgiev, A. B., Pissis, P., & Georgakilas, A. G. (2011). Role of oxidative stress and DNA damage in human carcinogenesis. *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, 711(1-2), 193-201.
- [102] Gong, C., Tao, G., Yang, L., Liu, J., He, H., & Zhuang, Z. (2012). The role of reactive oxygen species in silicon dioxide nanoparticle-induced cytotoxicity and DNA damage in HaCaT cells. *Molecular Biology Reports*, 39(4), 4915-4925.
- [103] Könczöl, M., Weiß, A., Gminski, R., Merfort, I., & Mersch-Sundermann, V. (2013). Oxidative stress and inflammatory response to printer toner particles in human epithelial A549 lung cells. *Toxicology Letters*, 216(2-3), 171-180.
- [104] Laha, D., Pramanik, A., Maity, J., Mukherjee, A., Pramanik, P., Laskar, A., & Karmakar, P. (2014). Interplay between autophagy and apoptosis mediated by copper oxide nanoparticles in human breast cancer cells MCF7. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-General Subjects*, 1840(1), 1-9.
- [105] Bulcke, F., Thiel, K., & Dringen, R. (2014). Uptake and toxicity of copper oxide nanoparticles in cultured primary brain astrocytes. *Nanotoxicology*, 8(7), 775-785.
- [106] Canlı, E. G. (2020). Bakır Oksit Nanopartikülü Etkisinde Kalan Memelilerde (*Rattus norvegicus* var. *albinos*) Bazı Metabolik Tepkilerin İncelenmesi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi*, 23(2), 304-315.
- [107] Paunovic, J., Vucevic, D., Radosavljevic, T., Mandić-Rajčević, S., & Pantic, I. (2020). Iron-based nanoparticles and their potential toxicity: Focus on oxidative stress and apoptosis. *Chemico-biological interactions*, 316, 108935.
- [108] Singh, N., Manshian, B., Jenkins, G. J., Griffiths, S. M., Williams, P. M., Maffei, T. G., & Doak, S. H. (2009). NanoGenotoxicology: the DNA damaging potential of engineered nanomaterials. *Biomaterials*, 30(23-24), 3891-3914.
- [109] Choi, A. O., Brown, S. E., Szyf, M., & Maysinger, D. (2008). Quantum dot-induced epigenetic and genotoxic changes in human breast cancer cells. *Journal of molecular medicine*, 86(3), 291-302.
- [110] Athinarayanan, J., Periasamy, V. S., Alsaif, M. A., Al-Warthan, A. A., & Alshatwi, A. A. (2014). Presence of nanosilica (E551) in commercial food products: TNF-mediated oxidative stress and altered cell cycle progression in human lung fibroblast cells. *Cell Biology and Toxicology*, 30(2), 89-100.
- [111] Marano, F., Hussain, S., Rodrigues-Lima, F., Baeza-Squiban, A., & Boland, S. (2011). Nanoparticles: molecular targets and cell signalling. *Archives of Toxicology*, 85(7), 733-741.
- [112] Guichard, Y., Schmit, J., Darne, C., Gaté, L., Goutet, M., Rousset, D., & Binet, S. (2012). Cytotoxicity and genotoxicity of nanosized and microsized titanium dioxide and iron oxide particles in Syrian hamster embryo cells. *Annals of Occupational Hygiene*, 56(5), 631-644.
- [113] AshaRani, P. V., Low Kah Mun, G., Hande, M. P., & Valiyaveetil, S. (2009). Cytotoxicity and genotoxicity of silver nanoparticles in human cells. *ACS nano*, 3(2), 279-290.

Mühendislik Öğrencilerinin Teknik Çizim Sürelerinin Farklılaşmasına Sebep Olan Faktörler Üzerine Keşifsel Bir Araştırma

An Exploratory Research on the Factors that Cause Engineering Students' Technical Drawing Times to Differ

İdris KARAGÖZ¹ 

¹Yalova Üniversitesi, Polimer Malzeme Mühendisliği Bölümü, 77200, Yalova, Türkiye

Öz

Bu araştırma, mühendis adaylarının aldıkları mesleki dersler ve kullanabildikleri 3D CAD programlarıyla teknik çizim tamamlama süreleri ve CAD kütüphanesi kullanımının çeşitli değişkenlere göre nasıl değiştiğini tespit etmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışma mühendislik fakültesi, polimer malzeme mühendisliği ana bilim dalında öğrenim gören ve kolayda örnekleme yolu ile seçilen toplam 60 mühendis adayı üzerinde yürütülmüştür. Çalışma keşifsel bir araştırma tasarımına sahiptir. Öğrencilerin teknik çizim sürelerinin aldıkları mesleki dersler, CAD kütüphanesi kullanımı, kullanabildikleri 3D CAD programları, cinsiyete göre incelenmiştir. Öğrenciler tarafından, üç farklı zorluk seviyesindeki parçalar SolidWorks yazılımında modellenmiş ve çizim süreleri kayıt altına alınmıştır. Sonrasında çizilen parçaların, çok sayıda önceden çizilmiş parçanın karışık şekilde yer aldığı online CAD kütüphanesi ve offline CAD kütüphanesi üzerinden indirilmesi istenmiştir. Öğrencilerin almış oldukları mesleki dersler, öğrenci cinsiyeti ve kullandığı tasarım programları, öğrencilerin çizim tamamlama sürelerine bağlı olarak karşılaştırılmış ve Kruskal-Wallis testi ve Mann Whitney U testi ile belirlenmiştir. Çizim tamamlama süresinin alınan ders sayısı ve bilinen tasarım programları ile ilişkili olduğu, mühendislik becerileri gelişmiş öğrencilerin çizim tamamlama sürelerinin de benzer şekilde geliştiği tespit edilmiştir. Farklı geometrilere sahip parçaların algılanması ve tasarımda bir sonraki adımın planlanması üzerinde mesleki derslerin etkili olduğu gözlemlenmiştir. Cinsiyet açısından veriler incelendiğinde, kız ve erkek öğrencilerin çizim tamamlama süreleri arasında belirgin bir fark olmadığı, mühendislik bilgisi aynı ya da benzer olan öğrenciler arasında çizim tamamlama sürelerinin de benzer olduğu bulunmuştur.

Anahtar kelimeler: CAD kütüphanesi, mühendislik, mühendislik öğrencileri, tasarım, çizim tamamlama süresi, CAD yazılımları.

Abstract

The study was conducted on a total of 60 engineer candidates studying at Polymer Materials Engineering Department in Yalova University and the interviewees were determined based on convenience sampling. In this study, the results were analysed using exploratory research design: taking into consideration vocational courses, 3D CAD programs and gender criteria, the students were divided into three groups of 20 people (medium, good and expert) using proportional stratified (stratified) sampling. During the research, primarily the candidates modelled parts by using SolidWorks software according to three different difficulty levels and their drawing times were recorded. Afterwards, the drawn parts were requested to be downloaded from the online CAD library and offline CAD library, which contains many pre-drawn parts. At final stage, the change of the drawing completion time based on the courses, the gender and the design programs were determined by Kruskal-Wallis test and Mann Whitney U test. It was determined that the drawing completion time was related to the number of courses taken and known design programs, and the drawing completion time of students with advanced engineering skills developed similarly. It has been observed that vocational courses were effective on the perception of parts with different geometries and planning the next step in design. When the data were examined in terms of gender, it was found that there was no significant difference between the drawing completion time of male and female students, and that the drawing completion times were similar between students with the same engineering knowledge.

Keywords: CAD library, engineering, engineering students, design, drawing completion time, CAD software.

I. GİRİŞ

90'lı yılların mühendislik ve üretim endüstrisinin en önemli teknolojilerden biri 3D CAD' dir [1,2]. Günümüzde farklı sektörler için çok çeşitli tasarım olanağı sunan CAD programları, kullanılmaya başlandığı yıllardan itibaren yeni ürünlerin tasarlanmasında ve daha fazla pazar payı elde etmelerinde firmalara rekabet avantajı sağlamıştır [3-5]. Özellikle son yıllarda yeni tasarımların ve inovasyonların ticarileşme hızını arttırmak amacıyla 3D CAD programları yoğun bir şekilde kullanılmaktadır [3,6]. Ekonomik gelişme hızının artırılması, firmaların rekabet gücü elde etmesi, inovasyon yoluyla ekonomik büyümenin teşvik edilmesi gibi amaçlarla, Avrupa Birliği "Horizon 2020 Programı", ABD ise 2011 yılında başkan Obama' nın açıkladığı "Amerikan İnovasyon Stratejisi" kapsamında yenilikçi projeleri destekleyen birçok faaliyette bulunmaktadır [6]. Son yıllarda yazılım teknolojileri

ve CAD yazılımlarındaki gelişmelere paralel olarak, tasarımların birbiri ile ilişkilendirilmesi, eski tasarımlardaki bazı parçaların yeni tasarımlarda kullanılması, tasarım geçmişi ve güncellemelerinin takibi amacıyla çalışmalar yapılmaktadır [7-11]. Bu amaçla yapılan çalışmalardan biri de CAD kütüphanelerinin oluşturulmasıdır [2,8,12-14]. 90' lı yıllardan günümüze CAD kütüphanelerinin oluşturulmasıyla ilgili çalışmaların yapıldığı ve patentlerin alındığı bilinmektedir [15,16].

CAD kütüphaneleri, ürün ya da kalıp tasarımında daha önceden çizilmiş standart parçaların kullanılmasıyla çizim sürecini hızlandıran, tasarımcıya yardımcı olan bir veri tabanıdır [2,8,12,17]. İçerisinde hazır halde, standart ya da kütüphaneyi oluşturan firmaya ait ürünler içermektedir [15,16,18]. Bu kütüphaneler, bir ara yüz CAD programında ürünlerin tek tek çizilmesiyle oluşturulabileceği gibi, bir modelin çizilmesi ve bir programlama dili yardımıyla bu modele bağlı olarak değişen ölçülere göre yeni parçaların oluşturulması şeklinde de hazırlanabilmektedir [2,7,14,19]. Referans model üzerinde yapılan değişiklikler, programlama dilleri ve parametreler sayesinde türetilmiş diğer ürünlerde de otomatik olarak güncellenmektedir [20]. CAD kütüphanesi hazırlandıktan sonra parçalar, internet üzerinden online ve internet erişimi olmayan ortamlarda ise offline CD şeklinde kullanıcıların erişimine sunulmaktadır [16,17,21]. Hazırlanmış ürünler 2D çizim ya da 3D model olarak farklı formatlarda, tasarım yapılan CAD programına aktararak kullanılabilir [5,8,19]. Kullanıcılar CAD kütüphanelerini özelleştirilebilmekte, kelime ya da görselle tasarımda kullanacağı ürünlerle ilgili olarak kütüphane içinde arama yapabilmektedir [7,14]. Günümüzde pek çok firma ve bilgisayar destekli tasarım programlarının çoğunda CAD kütüphaneleri mevcuttur [2,8,14]. CAD kütüphaneleri oluşturma ve sunma hizmeti veren firmalar, tasarladıkları yüzlerce firmaya ait CAD kütüphanelerini server sistemlerinde tutmakta ve bu kütüphaneleri ücretli ya da ücretsiz olarak tasarımcılara/kullanıcılara sunmaktadır [15,16]. CAD kütüphaneleri, özellikle küçük ve orta büyüklükteki işletmeler için sürdürülebilir tasarımın yapılmasına, tasarım sürecinin hızlandırılmasına, maliyetlerin azaltılmasına ve işletmenin rekabet avantajı elde etmesine çok büyük bir katkı sunmaktadır [4,5,13,14]. Benzer şekilde farklı sektörlerde ve farklı uygulamalara yönelik CAD kütüphaneleri de mevcuttur [8,9,12,22].

Chang ve ark. [6] öğrencilerin sahip olduğu yeteneklere göre 3D CAD uygulamalarının öğrencilerin tasarım yaratıcılığı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Araştırmacılar, farklı öğretim stratejileri uygulanmasının öğrencilerin yenilikçi tasarım yeteneklerini geliştirmede çok önemli olduğunu ve öğrencilerin mesleki bilgilerinin pekiştirilmesiyle 3D tasarımların daha hızlı ve bilinçli olarak yapıldığını belirtmişlerdir. Alghazzawi yaptığı çalışmada, CAD/CAM yazılımlarının günümüzde hala pahalı

teknolojiler olduğu ve yüksek eğitimli personel gerektirdiği sonucuna varmıştır [23]. Eltaief ve ark. [24] özellikle projede ya da firmada çalışan tasarımcı değiştiğinde, tasarımdaki tutarlılığın ve sürekliliğin sağlanması, tasarımla ilgili verilerin çalışanlar arasında aktarılması gibi konularda CAD yazılımlarının/kütüphanelerinin zaman ve maliyet tasarrufu sağladığı ve hataları azalttığını tespit etmişlerdir. Liu ve ark. [8] 3D kütüphanelerinin, mevcut tasarımların yeniden kullanılmasıyla, modelleme işleminin kolaylaştırıldığı, verimliliğin arttığı, kalıp tasarımında tasarımcının ihtiyacını karşıladığını belirtmişlerdir.

Kim ve ark. [2] kalıp tasarımında 3D CAD kütüphanesi ve standart kalıp elemanları kullanımının maliyet ve zaman tasarrufu sağladığını belirtmişlerdir. Lupinetti ve ark. [5] tarafından CAD montaj modüllerine yönelik yaklaşım ve sistemlerin son durumları analiz edilmiştir. Araştırmacılara göre, mevcut ürünlerle ve geçmişteki tasarımlarla ilgili önceki bilgilere erişilmesi, ürün kullanım süresinin etkinliğini arttırmakta ve bu da firmaların rekabet gücünü geliştirmektedir. Az parçadan oluşan montaj bileşenleri için, CAD kütüphanesine benzer sistemlerin önemsenmediği, ancak çok sayıda bileşenden oluşan montajlı parçalarda bunun kritik bir rol oynayabileceği ifade edilmiştir. Muraleedharan ve ark. [7] tasarım sürecinde, mühendislerin zamanının %60' ının ürün aramakla geçtiği belirtilmiştir. Gunn, yeni bir tasarım yapılırken, mevcut tasarımlar üzerinde %40' a kadar yapılacak değişikliklerle yeni bir tasarımın yapılabileceğini [10], Ulmann [11] yeni ürün geliştirme sürecinde mevcut bilginin kullanımının maliyetleri %35-%75 arasında azalttığını ifade etmiştir.

Chan ve ark. [12] CAD kütüphanesine benzer bir 3D CAD yazılımını kullanarak enjeksiyon kalıbı tasarlamışlardır. Araştırmacılar kalıp tasarımında CAD/CAM sistemlerinin birbirine entegre edilmesinin, işletmenin rekabet avantajı elde etmesinde, tasarım ve üretim süreçlerinin kısaltılmasında etkili olduğunu belirtmişlerdir. Collins&King [13] bu durumu CAD programlarının iş ve performans üzerindeki etkisini inceledikleri çalışmalarında, CAD programlarının hem tasarımcı ve teknik ressamlar arasındaki ilişkiyi hem de çalışma grupları arasındaki ilişkiyi geliştirerek tasarımlardan yüksek performans elde edilmesini sağlama şeklinde açıklamışlardır. Wei&Yuanjun [14] CAD kütüphanelerinde model arama yapılması, tasarlanmış parçaların tekrar kullanılarak tasarım süresinin ve maliyetlerin azaltılması üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. CAD modellerinde sınıflandırmaların yapılmasının yeni ürün geliştirme maliyetlerini önemli oranda azalttığı, verimliliği ve tasarımlarda standart ürün kullanımını arttırdığı araştırmacılar tarafından belirtilmiştir.

CAD kütüphaneleri ile ilgili çalışmaların daha çok parça ve kalıp tasarımı [2,8,12,14,17], CAD kütüphanesi kullanımının hata oranları [5,24] ve

maliyetler [2,13,14] üzerindeki etkisinin belirlenmesi üzerine yapıldığı görülmüştür. Tasarım süresi üzerinde, tasarımcının sahip olduğu uzmanlık ve bilgi birikiminin yanında pek çok diğer faktörün etkili olduğu bilinmektedir [25]. Tasarımcının sahip olduğu özellikleri dikkate alan ve bunların tasarım süresi, online ya da offline CAD kütüphanesi kullanma süreleri üzerindeki farklılıklarını inceleyen çalışmalar sınırlıdır [6]. Bu nedenle yapılan bu çalışmanın alana katkı sağlayacağı, mühendis adaylarının aldığı mesleki dersler ve kullanabildikleri (eğitimi aldıkları) 3D CAD program sayısının, teknik çizim tamamlama süresi, CAD kütüphanesi kullanım düzeyleri ve bunlara etki eden faktörlerin incelenmesinin geleceğin mühendis adaylarına ve kalıp ve parça tasarımcılarına ışık tutacağı düşünülmektedir. Plastik sektörü ülkemizin öncü sektörlerinden biridir. Plastiklerin enjeksiyon [26,27] ve döküm [3] yöntemlerle kalıplanması, plastiklerin kaynakla birleştirilmesi [28-30] vb. konularda optimizasyon ve maliyeti azaltıcı çalışmalar mevcuttur. Ancak bu çalışmalar araştırılan konu hakkında yol gösterici olmaktan uzaktır. Araştırmacılar tarafından CAD kütüphaneleri benzeri sistemlerin ölçeklenebilirliğinin ve verimliliğinin belirlenmesi gerektiği, ürün geliştirme süreci için bunun önemli olduğu ifade edilmiştir [2,4,5]. Ancak literatürde parça ve kalıp tasarımı, CAD kütüphanesi kullanımı ile ilgili çalışmalar oldukça az sayıda ve sınırlıdır. Endüstride, araştırmacılar tarafından ifade edilen çalışmaların ticari kaygılar, şirket politikaları vb. nedeniyle büyük ölçekli kullanıcılarla yapılması ve tasarım konusunda çalışan mühendislerin bir araya getirilmesi oldukça zordur. Bu nedenle, çalışmadaki örneklem grubuna, plastik malzemeler konusunda bilgi sahibi, ilgili mesleki derslerini almış, farklı tasarım programlarına ait eğitimlerin verildiği Polimer Malzeme Mühendisi adayları alınmıştır. Fakültede mevcut diğer mühendislik bölümlerinde tasarım tabanlı derslerin SolidWorks üzerinden tek bir programla öğretilmesi, araştırmanın zaman ve katılımcı kısıtlamaları nedeniyle Polimer Malzeme Mühendisliği bölümü öğrencileri ile sınırlı kalması en önemli sınırlılığdır. Bu durum araştırma sonuçlarının genellenmesine engel teşkil etmektedir. Ancak mühendis adayları arasında böyle bir çalışmanın yapılması, tasarımcının sahip olduğu bilgi birikiminin, tasarım süresi ve CAD kütüphanesi kullanmadaki farklılıkların belirlenmesi açısından oldukça önemlidir. Araştırmanın literatürdeki bu boşluğun doldurulmasına katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Literatür incelemelerinde CAD kütüphaneleri ile ilgili çalışmaların daha çok parça ve kalıp tasarımı [2,8,12,14,17], CAD kütüphanesi kullanımının hata oranları [5,24] ve maliyetler [2,13,14] üzerindeki etkisinin belirlenmesi üzerinde yapıldığı görülmüştür. Tasarımcı yetkinliği ve parça zorluğuna göre; offline ve online CAD kütüphanesi kullanım etkinliği üzerine yeterli çalışmaların yapılmadığı gözlemlenmiştir [6]. Araştırmacılar tarafından CAD kütüphaneleri benzeri sistemlerin ölçeklenebilirliğinin ve verimliliğinin

belirlenmesi gerektiği, ürün geliştirme süreci için bunun önemli olduğu ifade edilmiştir [2,4,5]. Bu çalışmanın amacı; mühendislik fakültesinde öğrenim gören öğrencilerin farklı seviyelerdeki çizimleri tamamlama sürelerinin cinsiyet, aldıkları mesleki dersler ve kullanabildikleri CAD programlarına göre nasıl farklılaştığının, online ve offline CAD kütüphanesi çizim bulma ve indirme süreleri ile ne derece ilişkili olduğunun araştırılmasıdır.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Araştırmanın Modeli

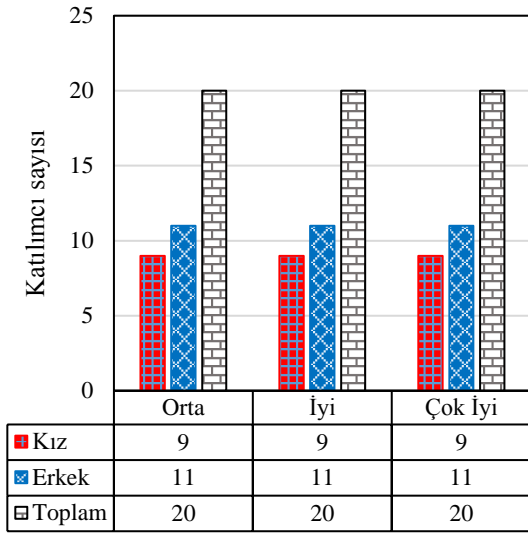
Araştırmada, keşifsel bir araştırma modeli kullanılmıştır. Çalışmada, kontrol değişkenleri bakımından aynı değere sahip katılımcılar, gruplarda kendi içerisinde eşleştirilmiştir. Çalışmada, oluşturulan üç farklı grup üzerinden mühendis adaylarının teknik çizim tamamlama ve CAD kütüphanesi kullanma sürelerinin çeşitli değişkenlere göre değişip değişmediği araştırılmıştır.

2.2. Katılımcılar

Araştırmada, Yalova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Polimer Malzeme Mühendisliği Bölümünde 2018-2019 eğitim öğretim yılında 3. ve 4. sınıfta okuyan öğrenciler araştırma grubu olarak belirlenmiştir. Etik kurul kararı gerektirmeyen ancak veri kullanım izni gerektiren bu çalışma için Polimer Malzeme Mühendisliği Bölüm Başkanlığından veri kullanım izni alındı. Kolayda örnekleme, ana kütle içerisinde seçilecek örnek kesimin araştırmacının yargılarınca belirlendiği, verilerin ana kütlede en kolay, hızlı ve ekonomik şekilde toplandığı tesadüfi olmayan örnekleme yöntemidir [31]. Bu yüzden bu araştırmada, öğrenciler öğrenim gördükleri sınıf ve dönem, aldıkları mesleki dersler ve bu derslerden aldıkları notlar, eğitimi aldıkları 3D CAD programları ve cinsiyet göz önünde bulundurularak kolayda örnekleme yolu ile seçildi. Belirlenen bu kriterlere göre eşleştirilen öğrenciler, mesleki derslerden aldıkları notlar ve 3D CAD programları ile yaptıkları uygulamalardan aldıkları notlara göre, aynı değere sahip 20 kişiden oluşan, orta, iyi ve çok iyi şeklinde üç gruba ayrılmıştır. Katılımcıların %45' i (n=27 Kişi) kız ve %55' i (n=33 Kişi) erkektir. Katılımcıların gruplara ve cinsiyete göre dağılımı Şekil 1' de grafiksel olarak gösterilmiştir.

Orta, iyi ve çok iyi olmak üzere her bir grup için çalışmalar ayrı gruplar halinde farklı zamanlarda yapıldı. Katılımcılar mühendislik fakültesi tasarım laboratuvarında bulunan bilgisayarlara rastgele dağıtıldı. Tasarım öncesinde katılımcılara çalışma ile ilgili olarak gerekli bilgiler verildi. Her bir katılımcıya tasarlayacakları parçaların perspektif resimleri dağıtıldı. Her bir parça tasarımı öncesinde katılımcıların tasarımı planlaması amacıyla modellemeye başlamadan önce resim üzerinde düşünceleri için bir dakika süre verildi. Sonrasında başla komutu ile aynı anda çizime başlandı ve çizim

süreleri kronometre ile kayıt altına alındı.



Şekil 1. Katılımcı gruplarının cinsiyete göre dağılımı

2.3. Bağımsız Değişkenler

Bu çalışmada, öğretim stratejisi bağımsız bir değişken olarak kabul edilmiştir. Gruplardaki öğrenciler, ilgili sınıfların ders programlarının gerektirdiği tüm dersleri almıştır. Gruplarda öğrencilerin kullanabildikleri CAD/CAM programlarının ve almış oldukları mesleki derslerin sayısı birbirinden farklıdır. Farklı gruplarda yer alan öğrencilerin, kullanabildiği CAD/CAM yazılımlarının ve aldığı mesleki derslerin öğrencinin çizim tamamlama süresi, online ve offline CAD kütüphanesi kullanımı üzerindeki farklılıkların ölçülmesi hedeflenmiştir. Her bir grupta yer alan öğrencilerin kullanabildikleri CAD yazılımları ve almış

oldukları mesleki derslere ait bilgiler Tablo 1’ de verilmiştir.

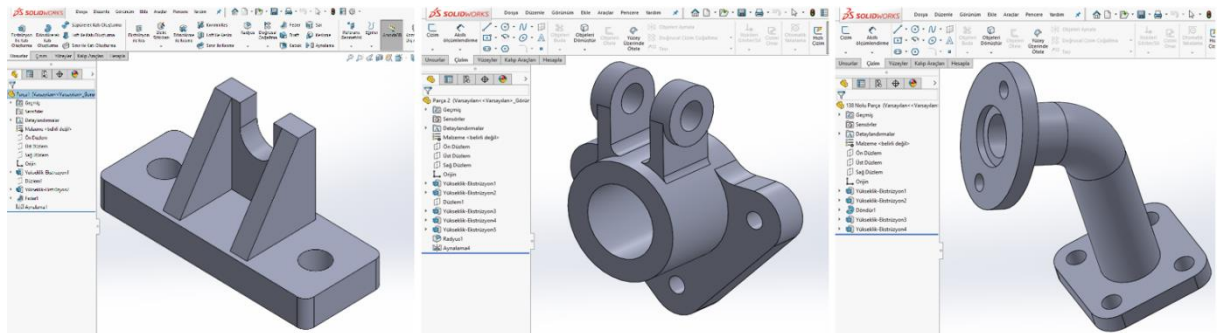
Öğrencilerden ilk aşamada; sırasıyla Şekil 2’ de yer alan üç parçayı SolidWorks yazılımında modellemeleri istendi. Öğrenciler tarafından her bir parça ayrı olacak şekilde part ortamında modellendi. Modellenen parça bittikten sonra tüm öğrenciler çizimi tamamlayınca kadar diğer öğrenciler bekledi. Daha sonra hep beraber diğer parçanın modellenmesine geçildi. Tüm süreç boyunca bu tekrar edildi. Öğrencilerin çizime başlama ve bitiş süreleri kronometre ile kontrol altına alındı ve çizim esnasında öğrenci bilgisayarları “NetSupport School” isimli yazılım yardımıyla eğitimci bilgisayarı tarafından kontrol edildi.

İkinci aşamada öğrencilerden, ürünü bulut tabanlı depolama sistemleri üzerinden oluşturulan ve giriş bilgileri öğrencilerle paylaşılan içerisinde farklı çizimlerinde yer aldığı online CAD kütüphanesinden indirmeleri istendi. Aramaya başlama ve CAD dosyasının bilgisayara indirilmesine kadar olan süreç kronometre ile kontrol altına alındı. Üçüncü aşamada öğrencilerden, offline CAD kütüphanesi mantığıyla server (eğitici bilgisayarı) üzerine yüklenen kütüphaneden parçayı bulmaları ve kendi bilgisayarlarına indirmeleri istendi. Benzer şekilde servera bağlanma ve CAD dosyasının bilgisayara indirilmesine kadar olan süreç kronometre ile kontrol altına alındı. Elde edilen ölçüm sonuçları, Kruskal-Wallis testi ve Mann Whitney U testi ile değerlendirilerek öğrencilerin online ve offline CAD kütüphanesi kullanıma süreleri incelendi. Elde edilen veriler kullanılarak, kız ve erkek öğrencilerin çizim tamamlama süreleri arasındaki farklılıklar incelendi.

Tablo 1. Cad/CAM yazılımları ve mesleki derslere göre öğrencilerin gruplandırılması

Grup	CAD/CAM Yazılımları			Mesleki Dersler				
	AutoCad	SolidWorks	CATIA	TR ^a	Tİ ^b	PPT ^c	BDT ^d	KT ^e
Orta	+	+	-	+	+	-	-	-
İyi	+	+	+	+	+	+	+	-
Çok İyi	+	+	+	+	+	+	+	+

^aTeknik Resim, ^bTemel İşlemler ve Makine Proses, ^cPlastik Parça Tasarımı ve Müh. Uyg., ^dBilg. Destekli Tasarım, ^eKalıp Tasarım ve Üretimi



Şekil 2. Öğrencilerin modellediği parçalara ait ekran görüntüleri

İkinci aşamada öğrencilerden, ürünü bulut tabanlı depolama sistemleri üzerinden oluşturulan ve giriş bilgileri öğrencilerle paylaşılan içerisinde farklı çizimlerinde yer aldığı online CAD kütüphanesinden indirmeleri istendi. Aramaya başlama ve CAD dosyasının bilgisayara indirilmesine kadar olan süreç kronometre ile kontrol altına alındı. Üçüncü aşamada öğrencilerden, offline CAD kütüphanesi mantığıyla server (eğitici bilgisayarı) üzerine yüklenen kütüphaneden parçayı bulmaları ve kendi bilgisayarlarına indirmeleri istendi. Benzer şekilde servera bağlanma ve CAD dosyasının bilgisayara indirilmesine kadar olan süreç kronometre ile kontrol altına alındı. Elde edilen ölçüm sonuçları, Kruskal-Wallis testi ve Mann Whitney U testi ile değerlendirilerek öğrencilerin online ve offline CAD kütüphanesi kullanıma süreleri incelendi. Elde edilen veriler kullanılarak, kız ve erkek öğrencilerin çizim tamamlama süreleri arasındaki farklılıklar incelendi.

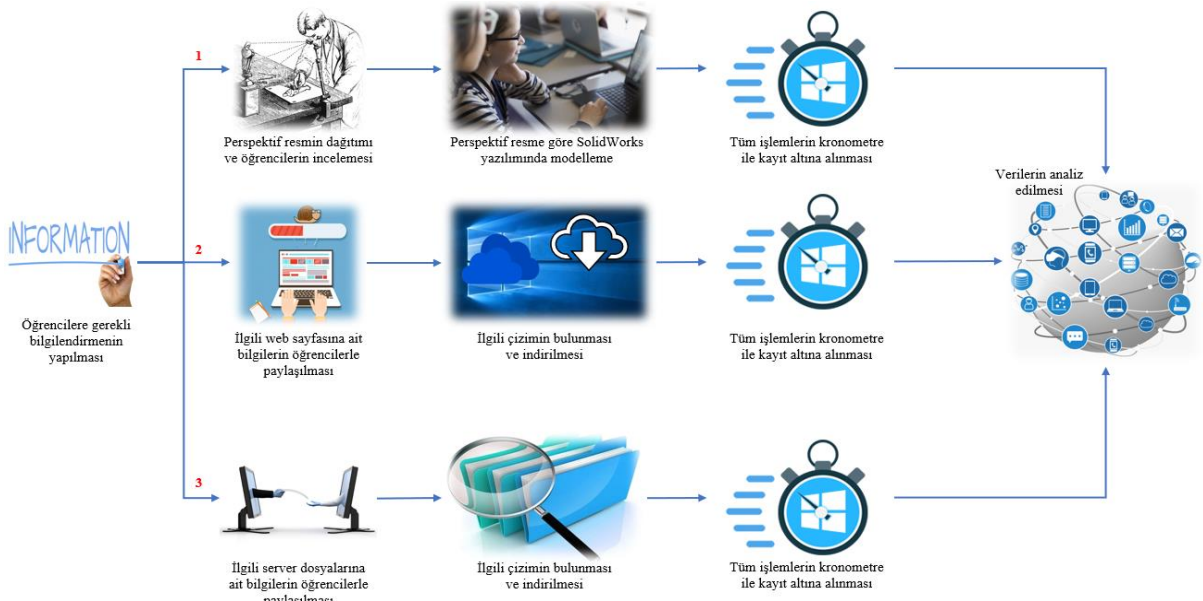
2.4. Değerlendirme ve Tasarım Prosedürü

Şekil 2' de SolidWorks ekran görüntüsü verilen parçalar, modellemede kullanılan komut sayısı, bütünleşik komut kullanımı, ürün ağacının yapısı, parça geometrisi, katı modeli oluşturmak için kullanılan unsurlar, katı model oluşturma sırası dikkate alınarak basit, orta ve zor tasarım şeklinde sınıflandırıldı. Her bir parçanın tamamlanmasından sonra, 100 tam puan

üzerinden yapılan modelleme, çizim tamamlama süresi, çizimde izlenen tasarım mantığı, komut kullanma sırası, yapılan işlemin doğruluğu, ürün ağacının yapısı değerlendirilerek her öğrencinin yaptığı tasarımlar puanlandı. Öğrencilere ait tasarım süreleri, online ve offline CAD kütüphanesinden parçayı indirme süreleri, öğrencinin kullanabildiği CAD yazılımları ve almış olduğu mesleki derslere ve öğrenci cinsiyetine göre başarı değerlendirmeleri ve analizler yapıldı. Öğrencilerin çizim tamamlama süreleri ve CAD Kütüphanelerinden çizim bulma ve indirme süreleri arasındaki farklılıklar belirlendi. Çalışma tasarımı Şekil 3' te şematik olarak gösterilmiştir.

2.5. Verilerin Analizi

Araştırma verilerinin analizinde yüzde, aritmetik ortalama, Pearson korelasyon, Mann Whitney U Test, Kruskal-Wallis Testi kullanılmış ve SPSS-16.0 istatistik programından yararlanılmıştır. Katılımcıların online ve offline CAD kütüphanesi kullanma sürelerinin farklılaşıp farklılaşmadığını belirlemek için T-testi; kullanılan CAD yazılımları ve çizim süreleri arasındaki farklılıklar Mann Whitney U Test; alınan mesleki dersler ve çizim süreleri arasındaki farklılıklar Kruskal-Wallis Testi, cinsiyete göre çizim tamamlama süreleri arasında farklılıklar olup olmadığını belirlemek amacıyla Mann Whitney U Testi yapılmıştır.



Şekil 3. Çalışma tasarımı ve işlemlerin şematik gösterimi

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Çizimlerin Zorluk Seviyesi ve Tamamlama Süreleri

Kolay, orta ve zor olmak üzere üç farklı zorluk seviyesindeki çizimlerin, öğrencilerin hangi sürelerde tamamladıkları ölçülmüş ve tanımlayıcı istatistikler Tablo 2' de sunulmuştur. Beklendiği gibi çizimlerin zorlaşmasıyla birlikte çizimlerin tamamlanma süreleri artmaktadır. Genel olarak farklı özelliklere sahip

tasarımlarda süreler farklılaşmakta ve tasarımdaki geometrik hatlara bağlı olarak süreler artmaktadır [25]. Aynı geometrileri çalışan/çizen öğrencilerin, geometri farklılaştığında daha yavaş çizim yapmaları beklenen bir durumdur. CAD programlarının öğretildiği derslerde uygulama kısmına daha fazla ağırlık verilmesi, farklı geometrilerin bir bütünlük içinde uygulama da kullanılması, öğrenciler için zor parçalarda çizim sürelerini daha da kısaltabilir.

Tablo 2. Üç farklı zorluk seviyesi için çizimlerin tamamlanma süreleri

Parça zorluk seviyesi	Kişi Sayısı	Min. (Saniye)	Max. (Saniye)	Ortalama (Saniye)	Standard Sapma
Kolay	60	80	196	131,58	42,96
Orta	60	165	307	232,27	52,04
Zor	60	440	1034	723,53	230,31

3.2. Online CAD Kütüphanesi ve Offline CAD Kütüphanesi Kullanımı

Araştırma soruları kapsamında cevap aranırken diğer bir soru, tüm katılımcıların online CAD kütüphanesi kullanma süreleri ile offline CAD kütüphanesi kullanma sürelerinin farklılaşıp farklılaşmadığıdır. Bu amaçla öğrencilerin online ve offline CAD kütüphanelerinde çizim bulma ve indirme süreleri karşılaştırılmıştır. Yapılan İlişkili-Örneklem T Testi sonucunda öğrencilerin offline kütüphanede çizim bulma ve indirme sürelerinin, online CAD kütüphanesinden çizimi bulma ve indirme sürelerinden anlamlı şekilde farklılaştığı ($p<0,01$) ve varyansların homojen bir dağılım gösterdiği belirlenmiştir. Tablo 3’ te sunulan ortalama değerler

incelendiğinde öğrencilerin çizimleri offline olarak bulmaları için harcadıkları zamanın online CAD kütüphanesinden çizim bulup indirme zamanlarının neredeyse yarısı olduğu (Ort. offline= 56,367; Ort. online=104,633) görülmüştür. Online CAD kütüphanesindeki dosya sayıları, dosyalama ve gruplandırma sistemi, internet altyapısı ve indirme hızı bu kütüphanelerin verimi üzerinde oldukça etkilidir. Diğer yandan firmalarda offline CAD kütüphanesi şeklinde, sürekli kullanılan parçaların bir tasarım klasöründe kolay ulaşılabilen bir yerde tutulması, çoklu parçalardan oluşan tasarımlarda tasarım sürelerinin kısaltılmasında etkili olacaktır. Bu etki Tablo 3’ te net bir şekilde görülmektedir.

Tablo 3. Online ve offline CAD kütüphanesi indirme sürelerine dair tanımlayıcı istatistiksel ve bağımlı örneklem T testi sonucu

Çizim bulma ve indirme süresi	Ortalama (s)	Kişi Sayısı	Std. Sapma	Ort. Std. Hata	t	Serbestlik Derecesi	Anlamlılık düzeyi
Offline CAD kütüphanesi	56,37	60	10,69	1,38			
Online CAD kütüphanesi	104,63	60	4,48	,58	-47,54	59	,00

3.3. Korelasyon Analizi Sonuçları

Analiz sürecinde bir sonraki aşamada; çizim tamamlama sürelerinin hangi faktörler ile ilişkili olduğu araştırılmıştır. Bu kapsamda ilk aşamada, çizim sürelerinin offline CAD ve online CAD kütüphanesinden çizim indirme süreleri ile Tablo 4’ te verilen Pearson korelasyon katsayıları kolay, orta ve zor parçaların çizim süreleri ile ve offline CAD ve online CAD kütüphanesi parça indirme süreleri arasında güçlü pozitif yönlü bir ilişki olduğunu göstermiştir. Buna göre CAD kütüphaneleri parça indirme süresi arttıkça, parça çizim süreleri de artmaktadır. Benzer dosyalar içerisinde, karmaşık

geometrilerin algılanması ve dosyanın bulunmasını daha da zorlaşmaktadır. Bu durum üzerinde algıda seçicilik etkili olmaktadır. Özellikle online CAD kütüphanelerinde, parça geometrilerine bağlı olarak arama seçeneklerinin eklenmesi, aranan parçaların daha kolay bir şekilde bulunmasını sağlayacaktır. Tasarımlarında farklı firmalara ait ürünleri online CAD kütüphanelerinden indirerek kullanan tasarımcılar ilgili web sayfalarında geçirmiş oldukları süreyi azaltarak, daha verimli bir tasarım zamanına kavuşacaklardır. Tasarım sürelerinin azalması ile ilgili ürünlerin maliyetlerini önemli oranda etkileyecektir [32].

Tablo 4. Korelasyon analizi sonuçları

Parça zorluk seviyesi	Offline CAD Kütüphanesi Süre (dakika)	Online CAD Kütüphanesi Süre (dakika)
Parça çizim süresi (S), Seviye: Basit	,88**	,78**
Parça çizim süresi (S), Seviye: Orta	,88**	,80**
Parça çizim süresi (S), Seviye: Zor	,89**	,78**

3.4. Kullanılan CAD Yazılımları ve Çizim Süreleri

Çizim sürelerinin kullanılan (hâkim olunan veya eğitimi alınan CAD yazılımı) sayısına göre farklılaşp farklılaşmadığı incelenmiştir. Öğrenciler tarafından kullanılan yazılımların oranları Tablo 5’ de verilmiştir. Özellikle lisans öğrenimi boyunca farklı bilgisayar yazılımlarını kullanan/kullanacak öğrenciler için ders planlarının oluşturulmasında, kolaydan zora birbirini tamamlayıcı yazılım programlarının birbirini takip eden dönemlere ayrılması, ilgili yazılımları öğrenme ve kullanma kolaylığını arttıracaktır.

Öğrencilerin tamamı çizim yazılımlarından AutoCAD ve SolidWorks’ u kullanırken, yalnızca %33’ ünün CATIA kullandığı dikkat çekmektedir. Diğer bir ifade ile öğrencilerin tamamı en az iki çizim programı kullanırken, yalnızca %33’ ü üçüncü bir program

kullanmayı bilmektedir. Üçüncü programın kullanılıp kullanılmama durumuna göre çizim sürelerine dair ortalamalar ve süreler arasında farkın sınındığı Mann Whitney U Test sonuçları Tablo 6’ da sunulmuştur.

Test sonuçları, diğer tasarım programlara ek olarak CATIA yazılımını da kullanan öğrencilerin çizim sürelerinin kullanmayanlardan anlamlı şekilde daha kısa olduğunu ($p<0,01$) göstermiştir. Bu durum, az sayıda tasarım programı kullanan kişilere oranla daha fazla sayıda tasarım programını kullanan kişilerde tasarım yetkinliğinin gelişmesi ve daha iyi bir bakış açısının oluşmasından kaynaklanmış olabilir. Benzer şekilde kullanılan programın özelliklerini ve kullanıcıya kolaylık sağlayacak modülleri bilmekte tasarımın daha hızlı geliştirilmesine katkı sağlayabilir [33].

Tablo 5. Öğrencilerin eğitimini aldıkları programlara ait istatistiksel veriler

CAD Yazılımı	Kullanan öğrencilerin oranı (%)	Kullanmayan öğrencilerin oranı (%)
AutoCad	100	0
SolidWorks	100	0
CATIA	33	67

Tablo 6. CATIA kullanma durumuna göre çizimlerin tamamlanma süreleri ve Mann Whitney U Test sonuçları

Parça zorluk seviyesi	CATIA kullandı mı?	N	Ortalama	Std. Sapma	Anlamlılık düzeyi
Parça çizim süresi (s), Seviye: Basit	Evet	40	103,28	17,87	,00
	Hayır	20	188,20	3,82	
Parça çizim süresi (s), Seviye: Orta	Evet	40	198,00	21,73	,00
	Hayır	20	300,80	4,87	
Parça çizim süresi (s), Seviye: Zor	Evet	40	573,95	106,60	,00
	Hayır	20	1022,70	8,32	

3.5. Alınan Mesleki Dersler ve Çizim Süreleri

Öğrenci çizim süreleri ile aldıkları ders sayıları arasında bir farklılık olup olmadığı araştırılmıştır. Buna göre öğrencilerin %33’ ünün iki, %33’ ünün dört, %33’ ünün ise toplam beş mesleki eğitim dersi (mühendislik temel dersleri) aldıkları görülmüştür. Tablo 7’ de öğrencilerin almış olduğu dersler ve ortalamalarına dair tanımlayıcı istatistikler verilmiştir.

Farklı zorluk seviyesindeki çizimlerin farklı sayılarda mesleki eğitim dersi alan öğrenciler tarafından ne sürede tamamlandığını gösterir tanımlayıcı istatistiksel veriler Tablo 8’ de sunulmuştur. Gruplar arasındaki süre farklarının anlamlı olup olmadığını test etmek için Kruskal-Wallis Testi uygulanmıştır. Tablo 8’ de özetlenen sonuçlar farklı zorluk seviyelerindeki çizimlerin tamamlanma sürelerinin alınan mesleki ders sayısına göre anlamlı farklılık gösterdiğini ($p<0,01$), nispeten daha fazla sayıda ders alan öğrencilerin

çizimlerini çok daha kısa sürelerde tamamladıklarına işaret etmektedir. Öğrencilerin daha fazla mesleki ders alması, çizim tamamlama sürelerini kısaltmakta [34] ve farklı programları kullanma becerisi kazanan öğrenciler tasarımda, bir sonraki tasarım adımını daha hızlı bir şekilde planlayabilmektedir [6].

3.6. Cinsiyete Göre Çizim Süreleri

Öğrenci çizim tamamlama sürelerinin, öğrenci cinsiyetlerine göre farklılık gösterip göstermediği incelenmiştir. Tablo 9’ da özetlenen Mann Whitney U Testi sonuçları farklı zorluk düzeylerindeki çizimlerin tamamlanma sürelerinin kız ve erkek öğrenciler için çok benzer seyrettiği ve anlamlı bir farkın bulunmadığını göstermiştir. Çizim tamamlama süresi açısından kız ve erkek öğrenciler arasında belirgin bir fark yoktur. Bilgisayar programları kullanma açısından kız ve erkek öğrenciler arasında belirgin bir fark olmadığı bilinmektedir [35].

Tablo 7. Alınan mesleki derslere ait istatistiksel veriler

Mesleki Ders Adı	Alanlar (%)	Almayanlar (%)
Teknik Resim ve Bilgisayar Uygulamaları	100	0
Temel İşlemler ve Makine Proses	100	0
Bilgisayar Destekli Tasarım	33	67
Plastik Parça tasarımı ve Mühendislik Uygulamaları	67	33
Kalıp Tasarım ve Üretimi	33	67

Tablo 8. Alınan mesleki ders sayısına göre çizimlerin tamamlanma süreleri ve Kruskal-Wallis Testi sonuçları

Parça zorluk seviyesi	Alınan ders sayısı	N	Ortalama	Std. Sapma	Anlamlılık düzeyi
Parça çizim süresi (S), Seviye: Basit	2	20	188,20	3,82	,00
	4	20	120,60	3,84	
	5	20	85,95	2,95	
	Toplam	60	11,58	42,96	
Parça çizim süresi (S), Seviye: Orta	2	20	300,80	4,87	,00
	4	20	218,85	3,69	
	5	20	177,15	6,35	
	Toplam	60	232,27	52,04	
Parça çizim süresi (S), Seviye: Zor	2	20	1022,70	8,32	,00
	4	20	677,55	22,14	
	5	20	470,35	15,48	
	Toplam	60	723,53	230,31	

Tablo 9. Cinsiyete göre farklı zorluklardaki çizimlerin tamamlanma süreleri ve Mann Whitney U Testi sonuçları

Parça zorluk seviyesi	Cinsiyet	N	Ortalama	Std. Sapma	Anlamlılık düzeyi
Parça çizim süresi (S), Seviye: Basit	Kız	27	131,52	43,30	0,96
	Erkek	33	131,64	43,35	
Parça çizim süresi (S), Seviye: Orta	Kız	27	231,48	52,78	0,76
	Erkek	33	232,91	52,23	
Parça çizim süresi (S), Seviye: Zor	Kız	27	721,44	234,24	0,77
	Erkek	33	725,24	230,67	

III. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada; Yalova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Polimer Malzeme Mühendisliği'nde öğrenim gören mühendis adaylarının, SolidWorks programında çizim tamamlama süreleri, online ve offline CAD kütüphanesi kullanma süreleri arasındaki farklılıklar, Kruskal-Wallis testi ve Mann Whitney U testi kullanılarak incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen genel sonuçlar aşağıdaki gibi açıklanabilir:

1. Çizimlerin zorluk derecesinin artmasıyla, öğrencilerin çizim tamamlama süreleri de artmıştır. 3D CAD programlarının öğretildiği derslerin uygulama kısmı için ders sayılarının artırılması, öğrenciler için farklı geometrilere sahip parçaların çiziminde daha fazla pratik imkânı sağlanması ve programların daha kolay öğrenilmesi açısından olumlu olacaktır. Özellikle uygulama ağırlıklı derslerde, bir parçayı modellemeye başlamadan önce, eğitmen ve

öğrencilerin birlikte çizim analizi yapmaları ve modellemenin daha kısa sürede nasıl tamamlanacağı ile ilgili, çizimde ve tasarım programında nelere dikkat etmeleri gerektiğine ilişkin çalışmaların niteliği ve sayısı artırılması önerilmektedir. Bu sayede öğrencilerin uygulama ağırlıklı derslerde aktif katılımı daha fazla olacaktır.

2. Gruplar arasında online ve offline CAD kütüphanesi kullanma süreleri farklılaşmaktadır. Daha fazla sayıda mesleki ders alan ve 3D CAD programı kullanan öğrencilerin hem online hem de offline CAD kütüphanesinden çizimi bulup indirmeleri daha kısa sürede gerçekleşmiştir. Tasarım tabanlı derslerini, mesleki derslerle pekiştiren öğrencilerin mühendislik bakış açısının geliştiği, sürekli benzer işleri yapan öğrencilerin ise; kendilerinden beklenileni daha kolay algılayabildikleri gözlemlenmiştir. Özellikle

- tasarım/uygulama tabanlı eğitim verilen bölümlerde, mesleki derslerle birlikte mühendislik eğitiminin pekiştirilmesi, ilgili bölüm amaçları ile verilen derslerden (eğitim-öğretimden) istenilen çıktılardan elde edilmesi açısından önerilmektedir.
3. Tüm gruplar için, öğrencilerin online CAD kütüphanesi (Ort. online=104,63) ve offline CAD kütüphanesinden (Ort. online=56,37) çizim bulma ve indirme sürelerinin ortalamasına bakıldığında, offline CAD kütüphanesinden çizim bulma ve indirme işleminin daha hızlı gerçekleştirildiği görülmektedir. İnternet altyapısı, CAD dosyalarını dosyalama ve gruplandırma sistemleri, indirme hızı gibi parametrelerin bu durum üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir. Bu durum çok parçadan oluşan tasarımlarda maliyeti arttırıcı bir unsur olacaktır. Tasarım sürelerinin kısaltılması ve parçalara daha kolay erişimin sağlanması açısından, online CAD kütüphanelerine ek olarak, şirket içerisindeki ağda offline CAD kütüphanesi şeklinde sürekli kullanılan dosyaların depolanması ve ürünlerin gruplandırılması önerilmektedir. Bu sayede CAD kütüphanelerinin kullanıldığı tasarımlarda, tasarım sürelerinin kısaltılması ve standart parçaların kullanılmasıyla tasarım maliyetlerin azaltılması sağlanabilir.
 4. Karmaşık geometrilere sahip parçaların öğrenciler tarafından modelleme esnasında algılanması, basit parçalara oranla daha da zorlaşmaktadır. Bu durum çizim tamamlama sürelerini de arttırmaktadır. Benzer şekilde karmaşık geometrilere sahip parçaların CAD kütüphaneleri içerisinde aranması ve indirilmesi de daha uzun sürelerde gerçekleşmektedir. Bu nedenle CAD kütüphaneleri yazılımlarında arama seçenekleri içerisinde geometri ile arama yapma seçeneğinin de eklenmesi, parçaların daha kısa sürelerde bulunabilmesi açısından önerilmektedir.
 5. Az sayıda 3D CAD tasarım programı kullanan öğrencilere oranla, daha fazla sayıda 3D CAD tasarım programı kullanan öğrenciler çizimlerini daha kısa sürede tamamlamışlardır. Birden fazla tasarım programı kullanabilmek öğrencilerin tasarıma olan yatkınlığını arttırdığı ve bakış açısını geliştirdiği düşünülmektedir. Farklı tasarım programlarının eğitimlerinin verildiği mühendislik bölümlerinde, programların sistematik bir şekilde kolaydan zora doğru (önce 2D sonra 3D) olacak şekilde dönem planlarına eklenmesi, aynı dönem içerisinde benzer tabanlı en fazla bir tasarım programının öğretilmesi, öğrenci başarısının yükseltilmesi ve istenilen çıktılardan elde edilmesi açısından önerilmektedir.
 6. Nispeten daha fazla sayıda mesleki ders alan öğrenciler, diğer öğrencilere oranla çizimlerini çok daha kısa sürelerde tamamlamışlardır. Alınan mesleki derslerin fazlalığı, temel üretim yöntemlerinin bilinmesi modellenen parça geometrisinin algılanmasını kolaylaştırmakta ve öğrenci bir sonraki tasarım adımını daha kolay planlayabilmektedir. Tasarım programlarının yönelik eğitimlerin verildiği mühendislik bölümlerinde, bu eğitimlerin uygun içerikteki mesleki derslerle birlikte desteklenmesi ve konuların senkronize şekilde ilerlemesi önerilmektedir. Bu sayede öğrencilerde hem üretim mantığı hem de tasarım mantığı daha kolay yerleşecek ve bölüm amaçları ile uyumlu ders çıktıları elde edilebilecektir.
 7. Cinsiyetin çizim tamamlama süreleri açısından belirgin bir önemi yoktur. Aynı grupta yer alan kız ve erkek öğrenciler arasında çizim tamamlama süreleri açısından belirgin bir fark gözlemlenmemiştir. Dolayısıyla; tasarımcı arayışı içerisinde olan firmaların verdiği iş ilanlarında cinsiyet belirtmeleri ve erkek öğrencilerin kız öğrencilere oranla daha başarılı olduğu düşüncesi geçersizdir. Tasarımcı aranıyor ilanlarında cinsiyet belirtilmemesi, kadınların iş hayatında daha fazla desteklenmesi ve önyargıların kırılması açısından önerilmektedir.

TEŞEKKÜR

Yazar, etik kurul kararı gerektirmeyen ancak veri kullanım izni gerektiren bu çalışma için, gerekli izinleri sağlayan ve çalışmada kullanılan verileri yazarla paylaşan Polimer Malzeme Mühendisliği Bölüm Başkanlığı'na ve 2020/F/001 nolu proje ile çalışmaya verdiği destek nedeniyle Yalova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- [1] Toriya, H., Chiyokura, H. (2012). 3D CAD: Principles and Applications, Springer Publishing Company, USA.
- [2] Kim, C.W., Park, C.H., Lee, S.S. (2007). An Automated Design System of Press Die Components Using 3-D CAD Library, Computational Science and Its Applications, O. Gervasi and M.Gavrilova (Eds.), Part II, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, s. 961-974.
- [3] Karagöz, İ. (2018). Bilgisayar Destekli Programlar Kullanılarak Hazırlanmış Döküm Kalıbı ve Ürün Tasarımının Polimer Kompozit Malzemedan Üretilmesi, *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 5(2), 346-352. doi: 10.31202/ecjse.378957
- [4] Mikolajczyk, T., Malinowski, T., Moldovan, L., Fuwen, H., Pacakowski, T., Ciobanu, I. (2019). CAD CAM System for Manufacturing Innovative Hybrid Design Using 3D Printing, *Procedia*

- Manufacturing*, 32, 22-28.
- [5] Lupinetti, K., Pernot, J.P., Monti, M., Giannini, F. (2019). Content-based CAD assembly model retrieval: Survey and future challenges, *Computer-Aided Design*, <https://doi.org/10.1016/j.cad.2019.03.005>
- [6] Chang, Y.S., Chien, Y.H., Lin, H.C., Chen, M.Y., Hsieh, H.H. (2016). Effects of 3D CAD Applications on the design creativity of students with different representational abilities, *Computers in Human Behavior*, 65, 107-113.
- [7] Muraleedharan, L.P., Kannan, S.S., Muthuganapathy, R., Autoencoder-based part clustering for part-in-whole retrieval of CAD models, *Computers & Graphics*, <https://doi.org/10.1016/j.cag.2019.03.016>
- [8] Liu, W., Zhou, X., Niu, Q., Ni, Y. (2014). A convenient part library based on SolidWorks platform, *International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering*, 8(12), 1941-1944.
- [9] Park, S.C., Sukthakar, R., Mummert, L., Satyanarayanan, M., Zheng, B. (2007). Optimization of reference library used in content-based medical image retrieval scheme, *Medical Physics*, 34,11, 4331-4339.
- [10] Gunn, G.T. (1982). The Mechanization of Design and Manufacturing, *Scientific American*, 247(3), 114-131.
- [11] Ullman, D.G. (2010). The Mechanical Design Processes, 4th ed., McGraw-Hill Companies Inc., USA, s. 4-7.
- [12] Chan, W.M., Yan, L., Xiang, W., Cheok, B.T. (2003). A 3D CAD knowledge-based assisted injection mould design system, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 22, 387-395.
- [13] Wei, L., Yuanjun H. (2008). Representation and retrieval of 3D CAD models in part library, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 36, 950-958.
- [14] Collins, P.D., King, D.C. (1998). Implications of computer-aided design for work and performance, *The Journal of Applied Behavioral Science*, 24(2), 173-190.
- [15] Minagawa, E. (1998). Preparation system for automatically preparing and processing a CAD library model. US Patent 5,754, 842.
- [16] Duncan, S.A., McKee, L.J. (2004). Multi-discipline universal CAD library. US Patent US 6, 721, 614 B2.
- [17] Shin, Y., Han, S.H., Bae, D.H. (2000). Integration of heterogeneous CAD databases using STEP and the Internet, *Decision Support Systems*, 28, 365-379.
- [18] Ma, Y.S., Tor, S.B., Britton, G.A. (2003) The development of a standard component library for plastic injection mould design using an object-oriented approach, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 22, 611-618.
- [19] Ma, Y.S., Britton, G.A., Tor, S.B., Jin, L.Y. (2007). Associative assembly desing features: concept, implementation and application, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 32, 434-444.
- [20] Qamhiyah, A.Z. (1998). A Strategy fort he construction of customized design libraries for CAD, *Computer-Aided Design*, 30(11), 897-904.
- [21] Bedeka, A.K., Lin, C.Y. (2018). CAD_based robot path planning and simulation using OPEN CASCADE, *Procedia Computer Science*, 2018, 133, 779-785.
- [22] Myung, S., Han, S. (2001). Knowledge-based parametric design of mechanical products based on configuration design method, *Expert Systems with Applications*, 2001, 21, 99-107.
- [23] Alghazzawi, T.F. (2016). Advancements in CAD/CAM technology: Options for practical implementation, *Journal of Prosthodontic Research*, 60(2), 72-84.
- [24] Eltaief, A., Louhichi, B., Remy, S. (2018). Associations management and change propagation in the CAD assembly, *Computers in Industry*, 98, 134-144.
- [25] Higashi, T., Kanai, H. (2018). Impact of practice effect on each difficulty of cutting skill, NordiCHI '18: Proceedings of the 10th Nordic Conference on Human-Computer Interaction, September s. 904-909. <https://doi.org/10.1145/3240167.3240236v>
- [26] Karagöz, İ. (2021). An efect of mold surface temperature on inal product properties in the injection molding of high-density polyethylene materials, *Polym. Bull.*, <https://doi.org/10.1007/s00289-020-03231-2>
- [27] Karagöz, İ., Tuna, Ö. (2021). Effect Efect of melt temperature on product properties of injection-molded high-density polyethylene, *Polym. Bull.*, 78, 2627-2644.
- [28] Karagöz İ., Öksüz, M. (2018). Microstructures occurring in the joined thermoplastics sheets with friction stir welding, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33(2), 503-515.
- [29] Karagöz İ., Öksüz, M. (2016). Termoplastiklerin Sürtünme Karıştırma Kaynağı İle Birleştirilmesinde Kullanılan Yöntemler, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(ÖS 1), 1-27.
- [30] Karagöz İ. (2014). Termoplastiklerin sürtünme karıştırma kaynak özellikleri. Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- [31] Haşiloğlu, S.B., Baran, T., Aydın, O. (2015). Pazarlama araştırmalarındaki potansiyel problemlere yönelik bir araştırma: kolayda örnekleme ve sıklık ifadedi ölçek maddeleri, *Pamukkale İşletme ve Bilişim Yönetimi Dergisi*, 2(1), 19-28.
- [32] Battaia, O., Dolgui, A., Guschinsky, N. (2020). Optimal cost design of flow lines with reconfigurable machines for batch production, *International Journal of Production Research*, 58(10), 2937-2952. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1716092>

-
- [33] Tao, J., Li, L., Yu, S. (2018). An innovative eco-design approach based on integration of LCA, CAD/CAE and optimization tools, and its implementation perspectives, *Journal of Cleaner Production*, 187, 839-851. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.213>
- [34] Costley, J., Lange, C. (2017). The mediating effects of Germane cognitive load on the relationship between instructional design and students' future behavioral intention, *The Electronic Journal of e-Learning*, 15(2), 174-187.
- [35] Chen, Y.T., Liou, S., Chen, L.F. (2019). The relationship among gender, cognitive styles, learning strategies, and learning performance in the flipped classroom, *International Journal of Human-Computer Interaction*, 35(4-5), 395-403. <https://doi.org/10.1080/10447318.2018.1543082>

A Study on the L2 Stability and Transparency of Three Channel Control Architectures in Bilateral Teleoperation under Time Delays

Zaman Gecikmeleri Altında İki-Yönlü Teleoperasyonda Üç Kanallı Kontrol Mimarilerinin L2 Kararlılığı ve Şeffaflığı Üzerine Bir Çalışma

Uğur TÜMERDEM¹ 

¹ Mechanical Engineering Department Marmara University, 34722, Istanbul, Turkey

Abstract

Bilateral/haptic teleoperation is the remote control of a "slave" robotic system through a "master" robot or haptic interface, and involves the feedback of the slave interaction forces to the operator. Thus, the master operator can operate the slave as an extension of his/her body. Time delay among the robots is a long-standing problem in bilateral teleoperation. The existence of force feedback to the operator in haptic/bilateral teleoperation makes the teleoperation system less robust to time delays on the communication channels. Three channel architectures have been proposed in the literature to provide increased robustness against time delays with increased transparency (kinesthetic coupling). In this paper, we propose modifications on three channel architectures to guarantee delay independent L2 stability, while exploiting the increased transparency characteristics of these architectures. The validity of the proposed approach is examined both analytically and experimentally on a bilateral teleoperation system.

Keywords: Robotics, Teleoperation, Haptics, Force Feedback, Stability

Öz

İki-yönlü/haptik teleoperasyon; bir "takipçi" robotun bir "yönlendirici" robot, veyahut arayüz, aracılığıyla operatör tarafından uzaktan kumandasını ve takipçi robotun etkileşim kuvvetlerinin operatöre geri beslenmesini kapsar. Böylece operatör, takipçi robotu kendi uzuvlarının bir uzantısı gibi kullanabilir. Robotlar arasındaki iletişimde yaşanan gecikmeler, iki-yönlü teleoperasyonda bilinen en eski problemlerdendir. Operatöre kuvvet geri beslenmesinin olması haptik/iki-yönlü teleoperasyon sistemlerinin gecikmelere karşı daha kararlı/dayanıklı olmasına sebebiyet vermektedir. Üç kanal mimarileri, literatürde, gecikmelere karşı daha dayanıklı ve yüksek şeffaflığa (kinestetik bağa) izin veren mimariler olarak ortaya çıkmışlardır. Bu makalede, üç kanal mimarilerinde, bu mimarilerin hem şeffaflığından faydalanmayı amaçlayan hem de gecikmeden bağımsız L2 kararlılığını garantileyen değişiklikler yapılması önerilmektedir. Önerilen yaklaşımın geçerliliği hem analitik hem de deneysel yöntemlerle bir iki-yönlü teleoperasyon sisteminde incelenmiş, ve doğrulanmıştır.

Keywords: Robotik, Teleoperasyon, Haptik, Kuvvet kontrolü, Kararlılık

I. INTRODUCTION

Teleoperation systems were first developed for remote manipulation in nuclear plants, by Goertz. The first teleoperation systems were composed of master and slave manipulators that were mechanically coupled. Later Goertz also led the development of first electrically controlled teleoperator systems where the master and slave manipulators were connected to each other through electrical communication. This development has also expanded the application fields of teleoperator systems, to military and law enforcement, aerospace, medical and construction. Bilateral teleoperation systems involve actuated master systems, in contrast with unilateral teleoperation systems with passive masters, which can feed the forces acting on the slave systems back to the operator first by acquiring the force measurement with a sensor and then transmitting this measurement back.

One of the greatest problems in bilateral teleoperation systems is the existence of time delays as the presence of force feedback coupled with time delay destabilizes the control system. The first solution to the time delay problem in bilateral teleoperation was presented in [1] by Anderson and Spong, by treating the communication among the master and the slave as a power transmission line and rendering the overall system passive by using the scattering approach. The passivity concept was further developed with the use of wave variables in [2] by Niemeyer and Slotine. Many other researchers [3][4][5] have since used and built upon the passivity approach to guarantee stability of bilateral teleoperation systems under time delay. However, an important drawback of the passivity approach is that the performance of the control system deteriorates once it is made passive. The performance of bilateral teleoperation systems is often described by the term "transparency". Transparency refers to the teleoperation system being transparent to the operator, thus enabling perfect kinesthetic coupling between the

operator and the environment. One way to quantify transparency is to use hybrid matrices as proposed by Hannaford [6]. Lawrence [7] and Yokokohji [8] have independently shown that perfect transparency can be achieved by using the four channel control architecture, that makes use of four communication channels among the master and slave robots: two position channels for the position control loops of each robot and two force channels for the force control of each robot. However it is widely known that the four channel architecture is not capable of guaranteeing stability and transparency under time delays. It was later shown that the transmission of four measurements among the robots as in the four channel architecture is not a requisite for transparency. By using local force compensators, one of the force communication channels can be eliminated, and transparency can still be achieved when there is no time delay with a three channel architecture [9][10]. Furthermore, three channel architecture offers better transparency than the four channel architecture under time delay. In [11], Kubo et. al. has proposed a novel three channel approach eliminating one of the position channels rather than the force channels, to provide some improvements in terms of transparency under time delay. In [12], a type of three channel architecture has been applied to multilateral teleoperation with multiple robots. In [13], passivity/ absolute stability and Z-width (transmitted impedance bandwidth) based transparency analyses of all three channel architectures presented in [9]-[11] have been performed. However, it has been shown that it is impossible to guarantee absolute stability of any of the three channel architectures for all frequencies. Furthermore, Z-width does not provide a complete picture of the critical kinematic/force coupling performance of the teleoperation system.

The reason that three channel architectures can not guarantee absolute stability is that, absolute stability/passivity criteria are often too conservative. In this paper we are proposing the use of input-output L2 stability [14][15] for the stability analysis of three channel teleoperation systems due to more relaxed stability conditions. It will be shown that by introducing modifications on the known three channel architectures it is possible to guarantee delay independent stability of all the three channel controllers for all LTI environmental parameters for the first time. Furthermore we also analyze the effects of the proposed stability modifications on the transparency of the system under time delay. For transparency analyses/comparisons of all three channel architectures, hybrid and inverse hybrid matrices are utilized, which also allow the quantification of kinematic/force correspondences. The theoretical results are then validated with experiments performed on a bilateral teleoperation system composed of two linear motors.

The organization of the paper is as follows: Section II describes the Lawrence and three channel architectures

for bilateral teleoperation under time delay and introduces the proposed modifications, Section III provides the stability analysis and Section IV provides transparency analyses for the proposed framework, Section V reports the experimental results and Section VI discusses the outcomes of this research and possible future directions.

II. THREE CHANNEL ARCHITECTURES

In bilateral teleoperation, Lawrence architectures [16] are commonly used to obtain controllers. This name stems from the four channel architecture proposed by Lawrence and by using the channel parameters described in that paper almost all teleoperation controllers can be obtained. While describing the three channel architecture Zaad and Salcudean [9] proposed the use of two local force compensation channels. Here we will be using the same approach to describe the dynamic equations of a bilateral teleoperation system. The dynamic equations of the master and the slave systems under the mentioned control laws are given respectively in frequency domain:

$$\begin{aligned} (Z_m + C_m(s))V_m(s) - C_4V_s(s)e^{-sT_2} \\ = (1 - C_6)F_m(s) - C_2F_s(s)e^{-sT_2} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} (Z_s + C_s(s))V_s(s) - C_1V_m(s)e^{-sT_1} \\ = (C_5 - 1)F_s(s) + C_3F_m(s)e^{-sT_1} \end{aligned} \quad (2)$$

Here, s is the complex frequency variable, V_m, V_s are the velocity vectors for the master and slave robots, Z_m, Z_s are the impedances of each robot. The impedances are assumed to be masses $Z_m = M_ms, Z_s = M_ss$. $F_m(s), F_s(s)$ are the forces acting on the master and slave robots respectively. In this paper these forces are modeled as linear time invariant (LTI) systems as in [9]:

$$F_m = F_h^* - Z_h v_m \quad (3)$$

$$F_s = F_e^* + Z_e v_s \quad (4)$$

Z_h, Z_e , are the human and environmental impedance terms respectively and can be written as: $Z_h = m_h s + b_h + \frac{k_h}{s}$, $Z_e = m_e s + b_e + \frac{k_e}{s}$ where $m_{h,e}, b_{h,e}, k_{h,e}$ are the human and environmental mass, spring and damper coefficients respectively. F_h^*, F_e^* are the exogenous master and environmental forces which are independent of the system states. $C_m(s), C_s(s)$ are the local position feedback controllers, $C_1(s), C_4(s)$ are position channel feedforward controllers, C_2, C_3 are force channel feedforward control gains, and e^{-sT_1}, e^{-sT_2} are the time delays between each robot where T_1 is the amount of time delay in seconds from the master robot to the slave and T_2 is the delay from the slave to the master. Here the robots are assumed to behave as pure masses in the Cartesian space, and disturbance observers and or computed torque method can be utilized to transform any robot dynamics into

this form. The control diagram can then be seen in Figure 1.

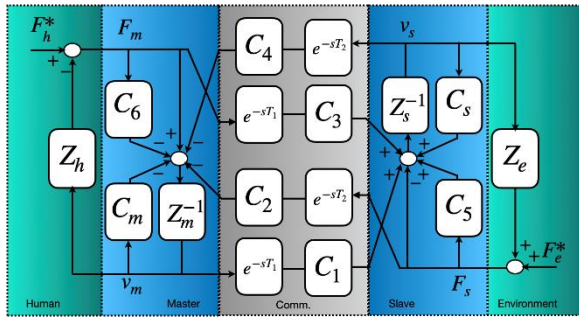


Figure 1. Lawrence architectures in Bilateral Teleoperation

Conventional four channel controllers are obtained by the following selection of the controller/channel parameters:

$$C_1(s) = C_4(s) = C_m(s) = C_s(s) = k_p/s + k_v \quad (5)$$

$$C_2 = C_3 = 1 \quad (6)$$

$$C_5 = C_6 = 0 \quad (7)$$

Three channel architectures as devised by Zaad and Salcudean [9]-[10] make use of the local force feedback channels C_5, C_6 to compensate for the effects of forces acting on one of the robots so that the robot is purely position controlled. This robot can be selected as the master or the slave, depending on the requirements for the teleoperation system (such as environment the slave robot will be in contact with.) This allows the elimination of the force channel to the force compensated/position controlled robot, reducing in effect the number of communication channels to three. In this paper we will call the three channel architecture where the master is position controlled P-PF architecture, and the one where the slave is position controlled the PF-P architecture. This naming convention implies that the PF controlled robot receives both force and position measurements from the other robot and P controlled robot receives only position information. The channel and controller parameters for the P-PF architecture can be written as follows:

$$C_1(s) = C_4(s) = C_m(s) = C_s(s) = k_p/s + k_v \quad (8)$$

$$C_2 = 0, C_3 = 1 \quad (9)$$

$$C_5 = 0, C_6 = 1 \quad (10)$$

On the other hand the PF-P architecture can be written as:

$$C_1(s) = C_4(s) = C_m(s) = C_s(s) = k_p/s + k_v \quad (11)$$

$$C_2 = 1, C_3 = 0 \quad (12)$$

$$C_5 = 1, C_6 = 0 \quad (13)$$

Both of these controllers are designed with the assumption that one of the robots is position controlled and the disturbances acting on the robot in the form of external forces are compensated through the control system. However Kubo et al. [11] has also shown that if one of the robots is purely force controlled instead of being position controlled a new kind of three channel architecture can be obtained for transparency. This would mean that both robots communicate their force measurements to one another and one robot also transmits its position measurements. In this architecture the local force compensation channels are also not mandatory. Thus, two more three channel architectures are obtained: the F-PF and PF-F types. The F-PF type three channel architecture can be obtained by the following selection of controllers:

$$C_1(s) = C_s(s) = k_p/s + k_v, C_4(s) = C_m(s) = 0 \quad (14)$$

$$C_2 = 1, C_3 = 1 \quad (15)$$

$$C_5 = 0, C_6 = 0 \quad (16)$$

The final type of three channel architecture is the PF-F type described by the following channel parameters:

$$C_1(s) = C_s(s) = 0, C_4(s) = C_m(s) = k_p/s + k_v \quad (17)$$

$$C_2 = 1, C_3 = 1 \quad (18)$$

$$C_5 = 0, C_6 = 0 \quad (19)$$

Linear stability analysis under time delays using Nyquist stability criterion has been demonstrated for the PF-P and P-FP three channel architectures in [10]. Absolute stability analysis has been performed for the F-PF and PF-F architectures in [12], however it has been demonstrated that stability can not be guaranteed for all frequencies. In this paper we will perform delay independent L_2 stability analysis as proposed in [15] to demonstrate that the architectures with the controllers given as in (8)-(19) can not guarantee delay independent stability. However we will also demonstrate for the first time that with some modifications on the channel and local controllers, it is possible to guarantee delay independent stability for all three channel architectures. We modify the local controllers C_m, C_s by adding local damping injection terms and introduce force controllers C_f which will be selected as proportional controllers for the P-PF, PF-P architectures and as high-pass filters for the F-PF, PF-F architectures. The new local controller parameters C'_m, C'_s for the PF-P architecture can then be written as:

$$C'_s(s) = C_s(s) + b_s, C'_m(s) = C_m(s) + b_m \quad (20)$$

and the new force controllers can be written as :

$$C_2 = C_f, C_3 = 0 \quad (21)$$

$$C_5 = 1, C_6 = 1 - C_f \quad (22)$$

Here, b_m, b_s are the local master and slave velocity feedback coefficients employed for damping injection. For the P-PF architecture, the modified controllers can be written as:

$$C'_s(s) = C_s(s) + b_s, C'_m(s) = C_m(s) + b_m \quad (23)$$

$$C_2 = 0, C_3 = C_f \quad (24)$$

$$C_5 = 1 - C_f, C_6 = 1 \quad (25)$$

For the PF-F and F-PF architectures, force controller will be modified as a high pass filter: $C'_f(s) = \frac{C_f s}{s+g}$. The PF-F architecture controller parameters can then be written as:

$$C'_s(s) = b_s, C'_m(s) = C_m(s) + b_m \quad (26)$$

$$C_2 = C'_f, C_3 = C'_f \quad (27)$$

$$C_5 = 1 - C'_f, C_6 = 1 - C'_f \quad (28)$$

Finally, the F-PF architecture will be written as:

$$C'_s(s) = C_s(s) + b_s, C'_m(s) = b_m \quad (29)$$

$$C_2 = C'_f, C_3 = C'_f \quad (30)$$

$$C_5 = 1 - C'_f, C_6 = 1 - C'_f \quad (31)$$

The reasons for these selections of controllers will be evident in the stability and transparency analyses in the next two sections. Firstly we derive the necessary conditions for delay independent L_2 stability with these controllers.

III. INPUT-OUTPUT STABILITY ANALYSIS

To guarantee stability of the teleoperation system, input-output stability analysis will be performed [17]. An input-output connection refers to two systems interconnected in feedback configuration as in Figure 2. We first start with the definitions and properties of the signal spaces used in this paper. L_2 space is the set of square integrable functions $f(t)$ defined in the domain $t: [0, \infty)$, satisfying the inequality: $\int_0^\infty |f(t)|^2 dt < \infty$. The extended L_2 spaces L_{2e} are the set of functions in L_2 that are equal to 0 for $t > T$, satisfying the inequality: $\int_0^T |f(t)|^2 dt < \infty$. The norm of a signal in L_2 space is given as $\|f\| = (\int_0^\infty |f(t)|^2 dt)^{1/2}$.

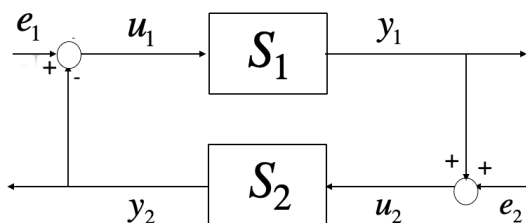


Figure 2. Input-Output connected systems

The equations describing an input-output connected system as in Figure 2 can be written as:

$$u_1 = e_1 - y_2, u_2 = e_2 + y_1 \quad (32)$$

$$y_2 = S_2 u_2, y_1 = S_1 u_1 \quad (33)$$

where u_1, u_2 are the input signals in L_{2e} , y_1, y_2 are the output signals in L_{2e} , and e_1, e_2 are the exogenous inputs in L_{2e} which are independent of the systems states. The operators S_1, S_2 are mappings on L_{2e} signals s.t. $S_1, S_2: L_{2e} \mapsto L_{2e}$. An operator on L_{2e} is said to be L_2 stable if for an input u and an output y it satisfies the norm inequality: $\|y\| \leq \gamma \|u\| + b$, where b and γ are finite constants, and is said to have finite gain. For linear systems the L_2 induced gain of an operator $G: L_{2e} \mapsto L_{2e}$ can be computed as $\gamma = \sup_{\omega > 0} |G(j\omega)|$ where $G(j\omega)$ is the Fourier transform of G and ω is the frequency variable. We now introduce the small gain theorem.

Theorem 1- Small Gain Theorem

The input-output interconnection in Figure 2 described by the equations (32)-(33) is bounded input bounded output (BIBO) stable if the operators S_1, S_2 are stable with finite gains γ_1, γ_2 and the product of the gains satisfy the small gain condition: $\gamma_1 \cdot \gamma_2 < 1$. For linear operators this condition can be expressed as $\sup_{\omega > 0} |S_1(j\omega)| \cdot \sup_{\omega > 0} |S_2(j\omega)| < 1$.

Next we are going to transform the bilateral teleoperation system depicted in Figure 1 and described by equations (1)-(2) into input output form as in Figure 2 and equations (32)-(33) and apply the small gain theorem to derive the stability conditions for the controllers given in (8)-(31). The system in Figure 1 can be redrawn in input-output form as in Figure 3. From the figure, the input output system transfer function $S_1(s), S_2(s)$ can be obtained as:

$$S_1: \frac{(-C_4 - C_2 Z_e) e^{-sT_2}}{Z_m + C_m + (1 - C_6) Z_h}, S_2: \frac{(C_1 - C_3 Z_h) e^{-sT_1}}{Z_s + C_s + (1 - C_5) Z_e} \quad (34)$$

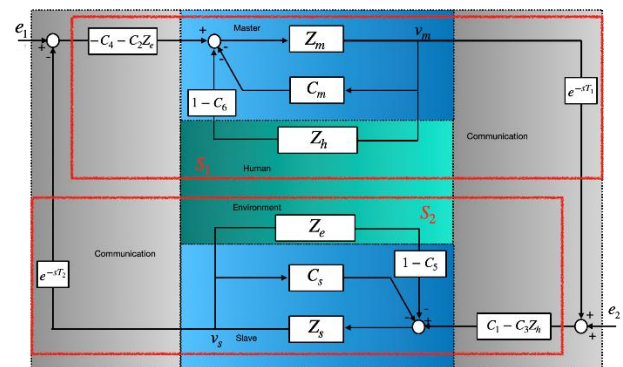


Figure 3. Input-Output Form of the Bilateral Teleoperation System

The channel parameters in equations (8)-(31) can then be plugged in (34) to obtain the system transfer functions for different three channel architectures. The S_1, S_2 transfer functions for each architecture can then be written as follows.

For the P-PF architecture:

$$S_1: \frac{C_p e^{-sT_1}}{Z_m + C_p}, \quad S_2: \frac{(C_p - C_f Z_h) e^{-sT_2}}{Z_s + C_p + b + Z_e} \quad (35)$$

for the PF-P architecture:

$$S_1: \frac{(C_p - C_f Z_e) e^{-sT_1}}{Z_m + C_p + b + C_f Z_h}, \quad S_2: \frac{C_p e^{-sT_2}}{Z_s + C_p} \quad (36)$$

for the F-PF architecture:

$$S_1: \frac{-C_f' Z_e e^{-sT_1}}{Z_m + b + C_f' Z_h}, \quad S_2: \frac{(C_p - C_f' Z_h) e^{-sT_2}}{Z_s + C_p + b + C_f' Z_e} \quad (37)$$

for the PF-F architecture:

$$S_1: \frac{(C_p - C_f' Z_e) e^{-sT_1}}{Z_m + C_p + b + C_f' Z_h}, \quad S_2: \frac{-C_f' Z_h e^{-sT_2}}{Z_s + b + C_f' Z_e} \quad (38)$$

The stability conditions can be obtained by determining the L_2 gains of these terms. We first solve for the controller parameters that can guarantee the stability of the P-PF architecture. From Theorem 1, the stability condition is given as: $\sup_{\omega>0} |S_1(j\omega)| \cdot \sup_{\omega>0} |S_2(j\omega)| < 1$, also both $\sup_{\omega>0} |S_1(j\omega)|$ and $\sup_{\omega>0} |S_2(j\omega)|$ should be finite. However slightly more conservative stability conditions can be obtained easily if we assume $|S_1(j\omega)| < 1, |S_2(j\omega)| < 1, \forall \omega > 1$. We have that $\sup_{\omega>0} |S_i(j\omega)| = \sup_{\omega>0} \sqrt{(S_i(j\omega)S_i(-j\omega))}$. Then for the P-PF architecture we have:

$$|S_1(j\omega)| = \left(\frac{k_p^2 + k_f^2 \omega^2}{M_m^2 \omega^4 - 2k_p M_m \omega^2 + (k_v + b_m)^2 \omega^2 + k_p^2} \right)^{1/2} \quad (39)$$

$$|S_2(j\omega)| = \left(\frac{C_f^2 m_h^2 \omega^4 + 2C_f m_h (k_p - C_f k_h) \omega^2 + (k_v - C_f b_h)^2 \omega^2 + (k_p - C_f k_h)^2}{(M_s + C_f m_e)^2 \omega^4 - 2(C_f M_e + M_s) (k_p + C_f k_e) \omega^2 + (k_v + b_s + C_f b_e)^2 \omega^2 + (k_p + C_f k_e)^2} \right)^{1/2} \quad (40)$$

From $|S_1(j\omega)| < 1$, the stability conditions for the master system can be written as:

$$2b_m k_v + b_m^2 > 2k_p M_m \quad (41)$$

From $|S_2(j\omega)| < 1$, the stability conditions for the slave system can be written as:

$$M_s + C_f m_e > C_f m_h \quad (42)$$

$$2k_p > C_f k_h \quad (43)$$

$$b_s^2 + 2k_v b_s + 2k_v C_f b_h > 2(C_f M_e + M_s) (k_p + C_f k_e) + 2C_f m_h (k_p - C_f k_h) + C_f^2 b_h^2 \quad (44)$$

All these conditions can be satisfied by the appropriate selection of damping injection parameters b_m, b_s and

the force controller gain C_f for all possible environmental/human impedance parameters. Furthermore it can be seen that without damping injection and force controller gains it is not possible to guarantee small gain conditions and stability for all impedances. Also, due to the fact that the L_2 gain of the delay operator is unity, the delays are eliminated in the gain calculations and the stability analysis becomes delay independent. Thus the P-PF three channel controller with the controllers (23)-(25) satisfying the conditions (41)-(44) is guaranteed to be delay independent L_2 stable. Similarly, the stability condition can be derived for the PF-P architecture and will be symmetric to the P-PF architecture. The gain functions are:

$$|S_1(j\omega)| = \left(\frac{C_f^2 m_e^2 \omega^4 + 2C_f m_e (k_p - C_f k_e) \omega^2 + (k_v - C_f b_e)^2 \omega^2 + (k_p - C_f k_e)^2}{(M_m + C_f m_h)^2 \omega^4 - 2(C_f M_h + M_m) (k_p + C_f k_h) \omega^2 + (k_v + b_m + C_f b_h)^2 \omega^2 + (k_p + C_f k_h)^2} \right)^{1/2} \quad (45)$$

$$|S_2(j\omega)| = \left(\frac{k_p^2 + k_b^2 \omega^2}{M_s^2 \omega^4 - 2k_p M_s \omega^2 + (k_v + b_s)^2 \omega^2 + k_p^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (46)$$

The stability conditions for the master system becomes:

$$M_m + C_f m_h > C_f m_e \quad (47)$$

$$2k_p > C_f k_e \quad (48)$$

$$b_m^2 + 2k_v b_m + 2k_v C_f b_e > 2(C_f M_h + M_m)(k_p + C_f k_h) + 2C_f m_e (k_p - C_f k_e) + C_f^2 b_e^2 \quad (49)$$

And for the slave it becomes:

$$2b_s k_p + b_s^2 > 2k_p M_s \quad (50)$$

On the other hand, for three channel architectures with pure force control, the stability conditions will be different. For the F-PF architecture the gain for the force controlled master system $S_1(j\omega)$ system with a high pass filter can be written as:

$$|S_1(j\omega)| = \left(\frac{C_f^2 (M_m^2 \omega^6 + b_m^2 \omega^4 + k_e^2 \omega^2)}{M_m^2 \omega^6 + (b_m + M_m g)^2 \omega^4 + (b_m g)^2 \omega^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (51)$$

The stability conditions can then be written as:

$$M_m > C_f m_e \quad (52)$$

$$b_m g > C_f k_e \quad (53)$$

$$b_m + g M_m > C_f b_e \quad (54)$$

Through the use of the high-pass filter and the controller gains b_m, g, C_f it is possible to satisfy these conditions for all possible human impedance parameters. The slave system on the other hand which is under PF control is the same as the P-PF architecture, so the stability conditions are already provided in equations (42)-(44).

Finally, the stability conditions for the PF-F architecture is symmetric to the F-PF, and the master system gain conditions are equivalent to that of the PF-P architecture in (47)-(49). On the other hand the slave system is force controlled, as a result the gain $|S_2(j\omega)|$ can be written as:

$$|S_2(j\omega)| = \left(\frac{C_f^2 (M_h^2 \omega^6 + b_h^2 \omega^4 + k_h^2 \omega^2)}{M_s^2 \omega^6 + (b_s + M_s g)^2 \omega^4 + (b_s g)^2 \omega^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (55)$$

The stability conditions can then be written as:

$$M_s > C_f m_h \quad (56)$$

$$b_s g > C_f k_h \quad (57)$$

$$b_s + g M_s > C_f b_h \quad (58)$$

Now that the conditions for delay independent stability of all three channel architectures have been demonstrated, in the next section we are going to

discuss the transparency of different three channel architectures, while taking into account the controller modifications we have proposed in this section. The transparency analysis will also serve as a guide in the selection of the controller parameters for performance.

IV. TRANSPARENCY ANALYSIS

Transparency refers to the performance of a teleoperation system. A teleoperation system should ideally become transparent to the user, meaning that it should provide a direct (kinesthetic) coupling between the master and the environment the slave robot is in contact with, without exhibiting any extra dynamics. The impedance of the environment should be transmitted to the operator one to one. Although this in theory is impossible to achieve perfectly under time delays, the degree to which it can be achieved can be measured through hybrid matrices. Kinesthetic coupling implies that at all times the position/velocities of the robots should be equal (velocity/position tracking) and the forces acting on the robots should be equal but in opposite directions (force reflection). These goals can be written in terms of the equations:

$$V_m(t) = V_s(t) \quad (59)$$

$$F_m(t) = -F_s(t) \quad (60)$$

It was demonstrated in [6] that, these goals can be written in terms of a hybrid matrix which can be obtained in frequency domain by solving for the relationship between these variables from the system dynamics provided in (1)-(2). The hybrid matrix \mathbf{H} is of the form:

$$\begin{bmatrix} F_m(s) \\ V_s(s) \end{bmatrix} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} V_m(s) \\ F_s(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_m(s) \\ F_s(s) \end{bmatrix} \quad (61)$$

where h_{ij} are the hybrid matrix elements. The ideal kinesthetic coupling, or transparency conditions in (59)-(60) are then replicated if the hybrid matrix is written as:

$$\begin{bmatrix} F_m(s) \\ V_s(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_m(s) \\ -F_s(s) \end{bmatrix} \quad (62)$$

These ideal conditions are practically very difficult to achieve for the whole spectrum, however can be approximated by transparency optimized control architectures such as the four channel architecture when communication delays are not present. For instance practically h_{11} represents the "operationality" of the teleoperation system [19], which is a measure of the impedance of the teleoperation system as perceived by the master, and in practice is almost impossible to make 0. Therefore it is common to represent the ideal operationality by the value $\frac{C_f}{s}$, which is the impedance of a mass with a coefficient determined by the force controller gain. By increasing the force controller gain, it is possible to decrease operationality but this would

be at the cost of stability. Furthermore, when delay is introduced to the system, it has been demonstrated that ideal transparency can not be achieved. The development of the three channel control architectures was a result of the need for transparency improvement under time delays. Hashtrudi-Zaad and Salcudean [9]-[10] demonstrated that a transparency improvement as well as guaranteed stability could be achieved with the three channel architecture. But due to the existence of time delay in the communication channels they modified the transparency conditions and introduced the concept of delayed transparency conditions:

$$\begin{bmatrix} F_m(s) \\ V_s(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & e^{\pm Ts} \\ e^{\pm Ts} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_m(s) \\ -F_s(s) \end{bmatrix} \quad (63)$$

which also take into consideration the delay elements and meaning that the robot velocities and forces can be tracked with a certain amount of time delay. The matrix elements in (63) can be noncausal in the hybrid matrix with negative time delay for certain three channel architectures, and to solve that problem the input and output effort/flow variables can be exchanged. The resulting matrix will be the alternate or inverse hybrid matrix G [18]:

$$\begin{bmatrix} V_m(s) \\ -F_s(s) \end{bmatrix} = G \begin{bmatrix} F_m(s) \\ V_s(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_m(s) \\ V_s(s) \end{bmatrix} \quad (64)$$

the delayed transparency conditions on the inverse hybrid matrix can be obtained as:

$$\begin{bmatrix} V_m(s) \\ -F_s(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & e^{\mp Ts} \\ e^{\mp Ts} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_m(s) \\ V_s(s) \end{bmatrix} \quad (65)$$

Thus, depending on the control architecture and time delay the appropriate matrix hybrid (63) or inverse hybrid matrix (65) is selected to analyze transparency. The magnitudes of the ideal hybrid and inverse hybrid matrices under time delay should be the same with the no time delay case as the delay operator has unity gain. Next, transparency analyses will be performed using the delayed transparency conditions for the three channel architectures under time delay with and without the proposed stability modifications and the performance of different architectures will be compared using the hybrid/inverse hybrid matrix frequency responses. Possible performance improvements and stability/transparency trade-offs will also be discussed. The hybrid matrix elements for the general Lawrence architecture as proposed in (1),(2) and Figure 1 can be obtained as:

$$h_{11} = \frac{C_1 C_4 e^{-sT_1} e^{-sT_2} + (Z_m + C_m)(Z_s + C_s)}{(Z_s + C_s)(1 - C_6) - C_3 C_4 e^{-sT_1} e^{-sT_2}} \quad (66)$$

$$h_{12} = \frac{C_2 e^{-sT_2} (Z_s + C_s) - C_4 e^{-sT_2} (1 - C_5)}{(Z_s + C_s)(1 - C_6) - C_3 C_4 e^{-sT_1} e^{-sT_2}} \quad (67)$$

$$h_{21} = \frac{-C_1 e^{-sT_1} (1 - C_6) - C_3 e^{-sT_1} (Z_m + C_m)}{(Z_s + C_s)(1 - C_6) - C_3 C_4 e^{-sT_1} e^{-sT_2}} \quad (68)$$

$$h_{22} = \frac{(1 - C_5)(1 - C_6) - C_2 C_3 e^{-sT_1} e^{-sT_2}}{(Z_s + C_s)(1 - C_6) - C_3 C_4 e^{-sT_1} e^{-sT_2}} \quad (69)$$

On the other hand, the inverse hybrid matrix elements can be similarly obtained as:

$$g_{11} = \frac{C_1 C_4 e^{-sT_1} e^{-sT_2} + (Z_m + C_m)(Z_s + C_s)}{(Z_m + C_s)(C_5 - 1) - C_1 C_2 e^{-sT_1} e^{-sT_2}} \quad (70)$$

$$g_{12} = \frac{C_2 e^{-sT_2} (Z_s + C_s) - C_4 e^{-sT_2} (1 - C_5)}{(Z_m + C_s)(C_5 - 1) - C_1 C_2 e^{-sT_1} e^{-sT_2}} \quad (71)$$

$$g_{21} = \frac{-C_1 e^{-sT_1} (1 - C_6) - C_3 e^{-sT_1} (Z_m + C_m)}{(Z_m + C_s)(C_5 - 1) - C_1 C_2 e^{-sT_1} e^{-sT_2}} \quad (72)$$

$$g_{22} = \frac{-(1 - C_5)(1 - C_6) + C_3 e^{-sT_1} e^{-sT_2}}{(Z_m + C_s)(C_5 - 1) - C_1 C_2 e^{-sT_1} e^{-sT_2}} \quad (73)$$

For the PF-P and F-PF architectures the hybrid matrices and for the P-PF and PF-F architectures inverse hybrid matrices will be utilized in this paper to take causality into account. Figure 4 has the magnitude frequency responses of hybrid matrices for PF-P and F-PF architectures and Figure 5 has the frequency responses for the PF-F and P-PF architectures under 1s time delays between each robot. Both the conventional and modified controllers are utilized. For the conventional controllers the parameters used are $k_p = 900, k_v = 60, b_m = b_s = 0, g = 0, Z_m = Z_s = 0.4/s$. and in the modified control architectures the controller parameters have been selected as in Table 1.

For the PF-P and F-PF architectures the hybrid matrices and for the P-PF and PF-F architectures inverse hybrid matrices will be utilized in this paper to take causality into account. Figure 4 has the magnitude frequency responses of hybrid matrices for PF-P and F-PF architectures and Figure 5 has the frequency responses for the PF-F and P-PF architectures under 1s time delays between each robot. Both the conventional and modified controllers are utilized. For the conventional controllers the parameters used are $k_p = 900, k_v = 60, b_m = b_s = 0, g = 0, Z_m = Z_s = 0.4/s$. and in the modified control architectures the controller parameters have been selected as in Table 1.

Table 1. Modified controller parameters in the transparency analysis

Architecture	k_p	k_v	b_m	b_s	C_f	g
P-PF	900	60	10	150	0.1	0
PF-P	900	60	150	10	0.1	0
F-PF	900	60	150	150	0.1	0.1
PF-F	900	60	150	150	0.1	0.1

Without stability modifications it can be seen from Figure 4 that PF-P architecture guarantees the transparency conditions for H_{12} , H_{22} for all frequencies and for H_{21} within the controller bandwidth. This means that this architecture can guarantee good position and force tracking within the controller bandwidth. However H_{11} response which represents operability, shows large magnitudes and variations at low frequencies and a mass like first order system response for high frequencies. The H_{11} response is ideal for high frequencies but for low frequencies the magnitude is much larger than that of a mass. This implies that during free motion at low frequencies the perceived impedance of the teleoperation system will not be like a mass and the operator will feel a large damping. Introduction of stability modifications in the form of extra damping injection and lowered force control gain mainly affects the H_{11} term, and increases the magnitude at low frequencies and the operability even more. The conventional F-PF architecture on the other hand, has ideal responses in H_{11} , H_{12} , H_{21} and an almost ideal response in H_{22} . While the magnitude in H_{22} is not zero it can be considered ideal as the magnitude is negligible. H_{11} on the other hand, is an ideal mass-like first order response. When the modifications in the form of damping injection and force filters are applied, again the only deterioration is seen in the H_{11} . The low

frequency magnitude is increased more uniformly but the resulting magnitude is still much smaller than the PF-P architecture at low frequencies, meaning that the operability of the F-PF architecture would be much less and the system would feel lighter and faster to the operator. Increasing the damping injection terms and high pass filter cutoff frequency improves the H_{22} response leading to better position tracking. However, since the PF-P architecture has an ideal H_{22} response this would imply that the PF-P architecture would have an improved position tracking over the F-PF architecture.

Figure 5 shows the inverse hybrid matrix responses for P-PF and PF-F architectures. Since there is a symmetry between hybrid and inverse hybrid matrices, when the corresponding $G_{11} - H_{22}$, $G_{12} - H_{21}$, $G_{21} - H_{12}$, $G_{22} - H_{11}$ magnitude responses are compared, P-PF and PF-P architectures are very similar and F-PF and PF-F architectures are very similar in terms of performance. As the port variables in equations (61),(64) are inverted, the phase relationship between the responses will also be inverted, meaning that if the master position is leading and master force is lagging in F-PF architecture, for the PF-F architectures, the master position would be lagging and master force would be leading.

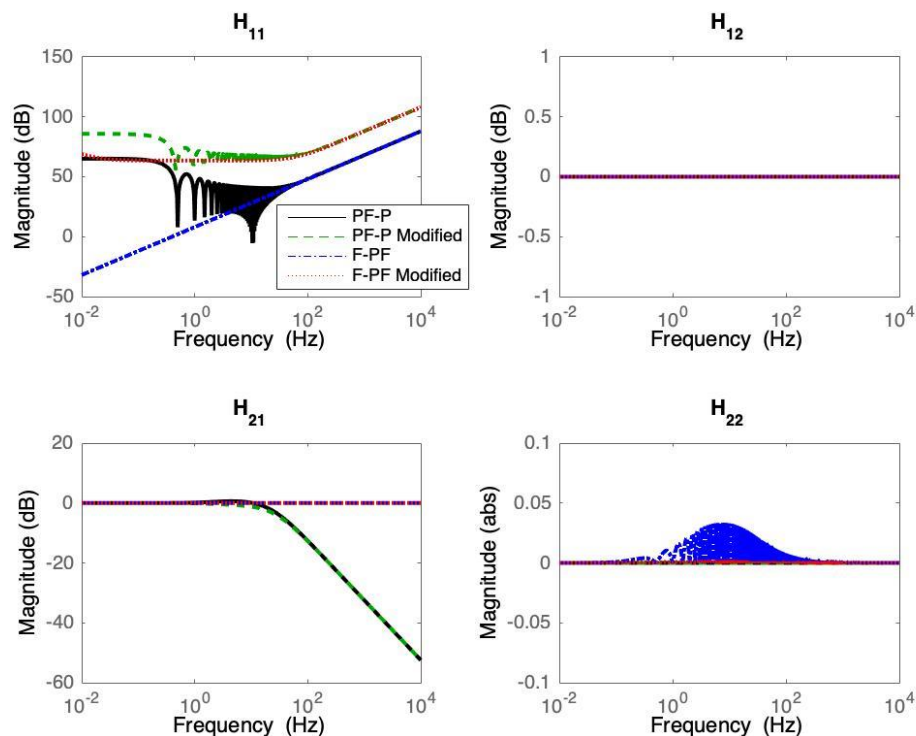


Figure 4. Frequency Responses of the Hybrid Matrix Elements for Three Channel PF-P and F-PF Architectures

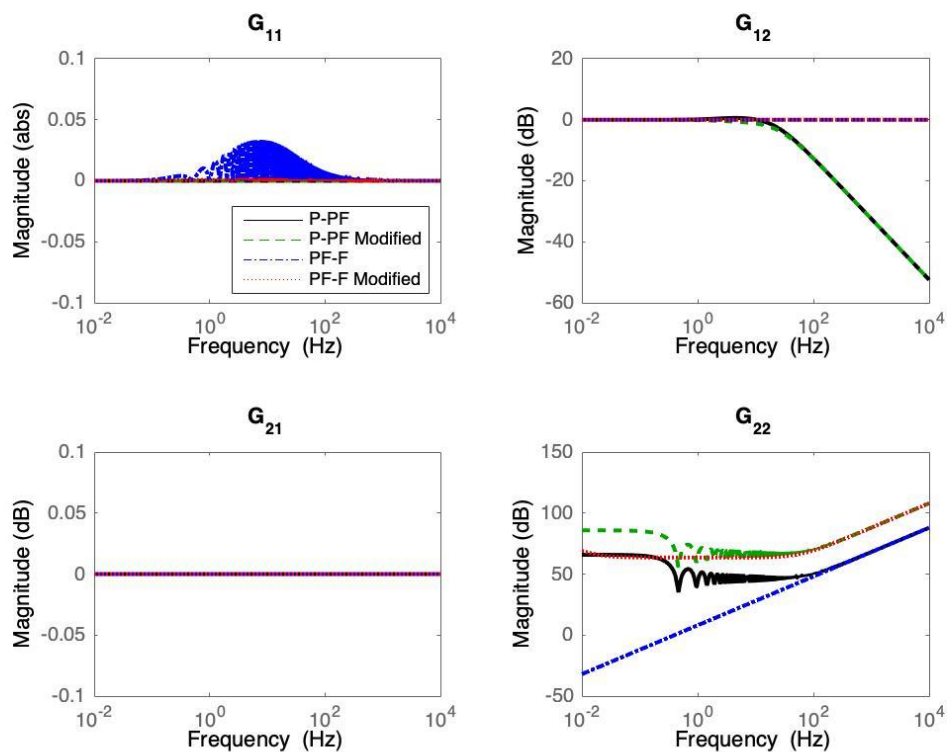


Figure 5. Frequency Responses of the Inverse Hybrid Matrix Elements for Three Channel P-PF and PF-F Architectures

Figures 4-5 together show that there is a trade-off between stability and the operability of the teleoperation system. Increasing the damping injection terms, high pass filter cut-off frequency, and decreasing force controller gain for robustness increases the operability of the system, meaning that it deteriorates performance. Since the transparency of the architectures with same parameters are similar, the environment and operator impedance assumptions in a given teleoperation setup would actually be critical in the selection of the control architecture. Previous section introduced the stability criteria for different architectures, and these criteria require different control parameter selections for the same environment/operator impedance pairs. As a result, these different controller parameters would result in different transparency characteristics under the same experiment settings. Certain impedance-environment pairs would favor certain architectures, for instance if the environment has a stiffness less than the operator, F-PF and PF-P architectures would be more favorable as the required damping terms would be less, resulting in better transparency. However, if the environment is stiffer than the operator, than the PF-F and P-PF architectures would be more favorable. Experiments have been conducted to verify the validity of both the stability and

transparency analyses provided so far and the results will be presented in the next section.

V. EXPERIMENT RESULTS

Experiments were conducted on a bilateral teleoperation setup consisting of two linear motors connected through a computer. The motors used in the experiments are Dunkermotoren STA1116 with high precision encoders for position measurement. An NI PCI-6321 DAQ card was used to interface the motors with the computer and the controller runs on Matlab Simulink with a sampling time of 1ms. Communication among the motors take place in the same control program and time delays were also created in the controller environment. In the experiments an operator holds one of the motor shafts and moves the shaft back and forth. The slave motion is constrained by a wooden block at a certain location and when the slave contacts this wooden block it is desirable that the master also comes to a stop and transmits the environmental force back to the master. The goal is for both of the robots to follow the same trajectory at all times and have the same measured force in the opposite directions during contact. The force measurements from the motors are obtained through reaction force observers as described in [20]. The experiment setup can be seen in Figure 6.

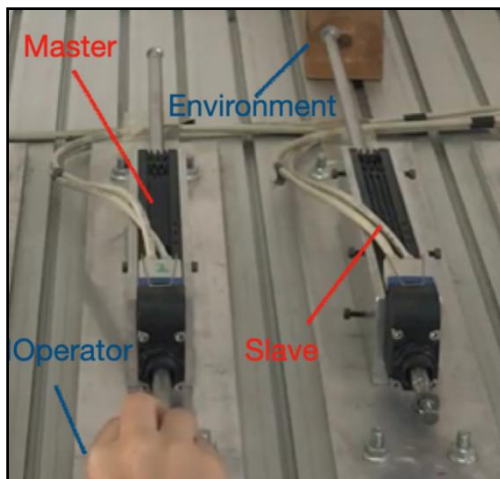


Figure 6. Bilateral Teleoperation Experiment Setup

In the experiment, both free motion and contact scenarios were tested and as a result this provides two different environments in the same experiment. During free motion, environment stiffness is zero and during contact with wood the environment stiffness can be very large: $K > 70000 \text{ N/m}$ [21]. By performing system identification using Matlab System Identification Toolbox the maximum human impedance parameters were obtained as $m_h = 2$, $b_h = 25$, $k_h = 90$. The large difference in the magnitudes of the stiffness values between the human and environment creates an asymmetry between the different three channel control architectures due to the constraints on the minimum values controller parameters can take. The existence of a high a stiffness environment means that for PF-P architecture the minimum proportional control term should be $k_p > 3500$, which is a very high controller gain resulting in high operability, amplification of measurement noise and actuator saturation. Similarly for the F-PF architecture, the stability condition of $b_m g > 10000 C_f$ would mean a very large master damping or low force controller gain and high pass cut off frequency, again resulting in a very high operability and actuator saturation. For the PF-F architecture the same condition $k_p > 3500$ is valid for the master, but since the L2 gain of the slave system can easily be made much smaller, according to small gain theorem, the closed loop system can be made stable for smaller k_p values. For P-PF architecture such constraints are much less conservative with $k_p > 45$, and as a result this is the most robust control architecture. Since the gains for all controllers could not be selected as high as the stability conditions suggest in the current experiment setup due to actuator saturation and noise amplification, the same set of controller parameters were used to compare the performances of the controllers under the same circumstances. The controller parameters were selected as in transparency section, Table 1. Time delays between the systems were selected significantly large: 0.2s single-way and 0.4s round-trip. Figures 7-10 show the experiment results for each architecture.

Figure 7 shows the position and force measurements from each system when the F-PF architecture is used. In the experiment, the operator starts moving the master backwards and then forwards and at about 7s contacts the environment, keeping contact until 15s, and then retreats the master robot and then again contacts the environment between 18s-27s. Blue lines show master position and force, red lines show slave position and force, and the yellow lines show the tracking errors. The delay shifted position and force signals are also in the plots. While the free motion performance of the control system is very good, with perfect position tracking and low operational forces, during contact it is difficult to keep the slave in contact with the environment by applying a constant force due to the violation of stability condition (53). The operator has to increase their arm stiffness to keep the robot in stable contact as environment pushes the master back. During first contact stable contact can be achieved, and good force reflection is realized, however in the second contact due to large force reflection undesirable loss of contact occurs and both position and force tracking performance deteriorates. Also the master position leads the slave position and the slave force leads the master force in this architecture.

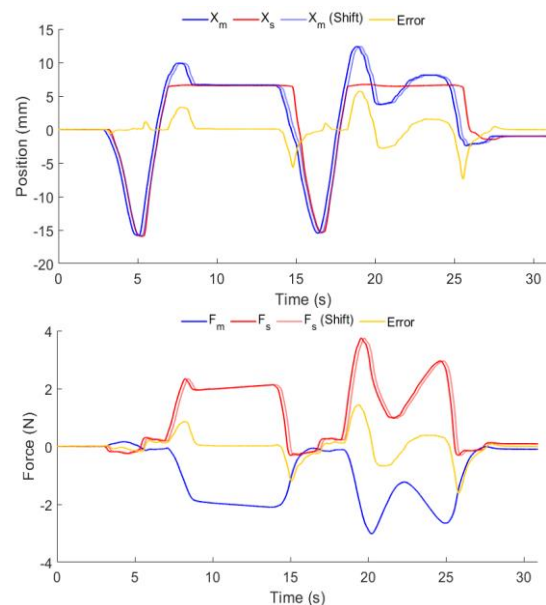


Figure 7. Position and Force responses of F-PF Architecture with 0.2s Time Delays

Figure 8 shows the experiment results when the same procedure is repeated with the PF-P architecture. Again during free motion the position tracking is good but the operational forces are higher as can be seen from the force response. This makes the system feel heavier to the operator and the same operation takes longer to complete. However just as in the previous case it is difficult to keep the robot in contact with a stiff environment and oscillations take place due to the violation of the stability condition (48), also resulting in large force errors. The shift between the robot responses is also comparatively less with this architecture.

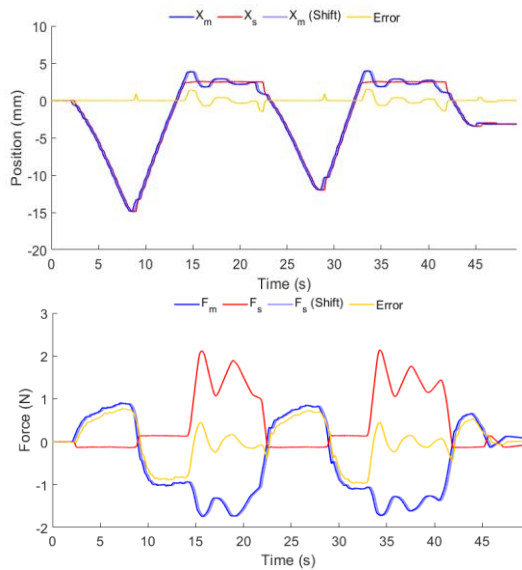


Figure 8. Position and Force responses of PF-P Architecture with 0.2s Time Delays

Figure 9 shows the experiment results when the same procedure is repeated with the PF-F architecture. With this architecture, stability can be more easily guaranteed both in free motion and contact. Just like the F-PF architecture, the free motion position tracking is very good with a delay shift between the robots, but this time the slave position leads the master position. During contact the system is more easily stabilized than PF-P architecture but some overshoot occurs during contact due to the master feeling the environment feedback with delay. However after the transient period is over perfect force reflection is achieved during contact. The force of the master leads the slave force in this architecture.

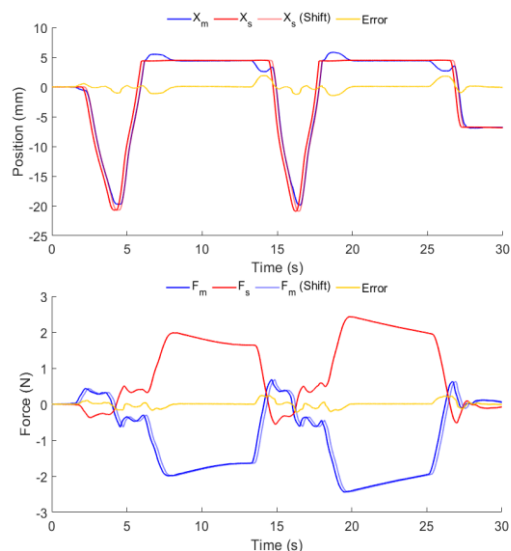


Figure 9. Position and Force responses of PF-F Architecture with 0.2s Time Delays

Figure 10 shows the experiment results when the same procedure is repeated with the P-PF architecture. This architecture is the most robust and there is no overshoot in position and force tracking. The tracking results are close to perfect. However this architecture also has

larger operational forces during free motion and this makes the system heavier and slower than the other architectures. Delay shift between the robots is also limited in this architecture.

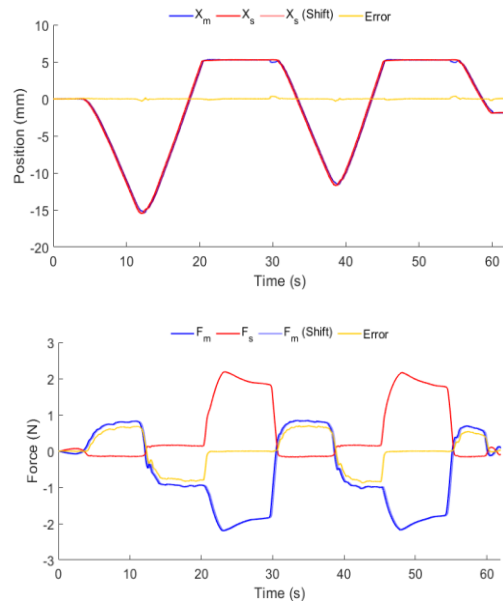


Figure 10. Position and Force responses of P-PF Architecture with 0.2s Time Delays

The experiment results confirm the stability and transparency analyses provided in the previous sections. It is demonstrated that in the presence of stiff environments P-PF and PF-F architectures have advantages over PF-P and F-PF architectures in terms of stability and transparency. P-PF architecture is the most robust architecture and has the best position and force tracking performance closely followed by the PF-F architecture, however the PF-F architecture has much smaller operability and this results in a faster and lighter teleoperation system. This is achieved by asynchronous tracking among the robots as there are shifts in the position and force responses. If a fast teleoperation system is desirable the PF-F architecture would be preferable, but if precision and synchronicity is required the P-PF architecture would be the better option. In the case of soft environment similar performances can be expected from F-PF and PF-P architectures but the delay shifts would be inverted. These architectures could be preferred if the application requires the master position to lead the slave position and if the master impedance is much greater than the environment, these architectures would be less conservative in terms of stability guarantees and therefore could be better in terms of operability.

VI. CONCLUSIONS

This paper has presented comprehensive transparency and stability analyses for three channel architectures that are commonly used in bilateral teleoperation applications. Controller modifications were proposed for guaranteeing delay independent stability for each architecture for the first time, and the effect of these

modifications on transparency was also discussed. The analyses were verified with experiment results. Each architecture have their own merits and could be utilized for different applications. But it can be suggested that the PF-F and P-PF architectures are more robust with a wide range of environments. PF-F architecture can be selected for fast and light systems and P-PF architecture can be selected for operations requiring greater precision and care. Future works involve extending these analyses to other Lawrence architectures, and using robust control techniques to account for model uncertainties and nonlinearities.

REFERENCES

- [1] Anderson, R. J., & Spong, M. W. (1988, August). Bilateral control of teleoperators with time delay. In *Proceedings of the 1988 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics* (Vol. 1, pp. 131-138). IEEE.
- [2] Niemeyer, G., & Slotine, J. J. (1997, April). Using wave variables for system analysis and robot control. In *Proceedings of International Conference on Robotics and Automation* (Vol. 2, pp. 1619-1625). IEEE.
- [3] Ryu, J. H., Kwon, D. S., & Hannaford, B. (2004). Stable teleoperation with time-domain passivity control. *IEEE Transactions on robotics and automation*, 20(2), 365-373.
- [4] Nuño, E., Basañez, L., & Ortega, R. (2011). Passivity-based control for bilateral teleoperation: A tutorial. *Automatica*, 47(3), 485-495.
- [5] Lee, D., & Spong, M. W. (2006). Passive bilateral teleoperation with constant time delay. *IEEE transactions on robotics*, 22(2), 269-281.
- [6] Hannaford, B. (1989). A design framework for teleoperators with kinesthetic feedback. *IEEE transactions on Robotics and Automation*, 5(4), 426-434.
- [7] Lawrence, D. A. (1993). Stability and transparency in bilateral teleoperation. *IEEE transactions on robotics and automation*, 9(5), 624-637.
- [8] Yokokohji, Y., & Yoshikawa, T. (1994). Bilateral control of master-slave manipulators for ideal kinesthetic coupling-formulation and experiment. *IEEE transactions on robotics and automation*, 10(5), 605-620.
- [9] Hastrudi-Zaad, K., & Salcudean, S. E. (1999, May). On the use of local force feedback for transparent teleoperation. In *Proceedings 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 99CH36288C)* (Vol. 3, pp. 1863-1869). IEEE.
- [10] Hashtrudi-Zaad, K., & Salcudean, S. E. (2002). Transparency in time-delayed systems and the effect of local force feedback for transparent teleoperation. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 18(1), 108-114.
- [11] Kubo, R., Iiyama, N., Natori, K., Ohnishi, K., & Furukawa, H. (2007). Performance analysis of a three-channel control architecture for bilateral teleoperation with time delay. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 127(12), 1224-1230.
- [12] Tumerdem, U. (2019). Three-channel control architecture for multilateral teleoperation under time delay. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 27(1), 120-138.
- [13] Albakri, A., Liu, C., & Poignet, P. (2013, November). Stability and performance analysis of three-channel teleoperation control architectures for medical applications. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (pp. 456-462). IEEE.
- [14] Tumerdem, U., & Ohnishi, K. (2009, April). Robust four channel teleoperation under time delay by damping injection. In *2009 IEEE International Conference on Mechatronics* (pp. 1-6). IEEE.
- [15] Tumerdem, U., & Ohnishi, K. (2010). Delay-Independent L2 Stability of Four-Channel Bilateral Teleoperators with Damping Injection. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 130(8), 953-964.
- [16] Naerum, E., & Hannaford, B. (2009, May). Global transparency analysis of the lawrence teleoperator architecture. In *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (pp. 4344-4349). IEEE.
- [17] Van der Schaft, A. J., & Van Der Schaft, A. J. (2000). *L2-gain and passivity techniques in nonlinear control* (Vol. 2). London: Springer.
- [18] Hashtrudi-Zaad, K., & Salcudean, S. E. (2000, April). Analysis and evaluation of stability and performance robustness for teleoperation control architectures. In *Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No. 00CH37065)* (Vol. 4, pp. 3107-3113). IEEE.
- [19] Iida, W., & Ohnishi, K. (2004, March). Reproducibility and operationality in bilateral teleoperation. In *The 8th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, 2004. AMC'04.* (pp. 217-222). IEEE.
- [20] Murakami, T., Yu, F., & Ohnishi, K. (1993). Torque sensorless control in multidegree-of-freedom manipulator. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 40(2), 259-265..
- [21] Kuchenbecker, K. J., Fiene, J., & Niemeyer, G. (2006). Improving contact realism through event-based haptic feedback. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 12(2), 219-230.

Sınıf Öğretmenlerinin İş Sağlığı ve Güvenliği Öz Yeterliği (İğdır İli Örneği)

The Self-Efficacy of Primary Teachers on Occupational Health and Safety: (İğdır Province Example)

Celal TAŞDEMİR¹ , Bahri GÜR² 

¹ İğdır Milli Eğitim Müdürlüğü, 76000, İğdır, Türkiye

² İğdır Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Biyokimya Bölümü, 76300, İğdır, Türkiye

Öz

Bu çalışmanın amacı; İğdır ilinde görev yapan sınıf öğretmenlerinin İş Sağlığı ve Güvenliği öz yeterlik algılarını tespit etmektir. Bu araştırmanın seçilmesinde, 2020 yılına kadar İğdır ilinde görev yapan sınıf öğretmenlerinin İş Sağlığı ve Güvenliği öz yeterlik algılarına yönelik akademik bir çalışmaya rastlanmaması önemli bir etken olmuştur. Ölçek geliştirme çalışmaları araştırılarak araştırma için anket formu oluşturulmuştur. Uzman görüşü, yazım ve imla kontrollerinden sonra geliştirilen taslak anket ilk önce 110 sınıf öğretmenine uygulanmış daha sonra faktör analizine geçilmiştir. Güvenirlik hesaplama aşaması da tamamlandıktan sonra anketin son hali ortaya çıkmıştır. Araştırmanın evrenini İğdır ilinde görev yapan 708 sınıf öğretmeni oluşturmaktadır. Araştırma kapsamında örnekleme gidilmemiş, gönüllülük esasına göre araştırmacı tarafından bütün evrene ulaşılmaya çalışılmıştır. Araştırmaya gönüllü olarak katılan 366 sınıf öğretmeni araştırmanın nihai örneklemini oluşturmaktadır. Araştırmanın bağımsız değişkenleri; sınıf öğretmenlerinin İş Sağlığı ve Güvenliği bilgi düzeyleri, hizmet süreleri, çalışma durumları ve daha önce almış oldukları İSG eğitimi oluşturmaktadır. Araştırmanın bağımlı değişkeni ise; sınıf öğretmenlerinin İş Sağlığı ve Güvenliği öz yeterlik algısına ilişkin ifadeleri oluşturmaktadır. Araştırmadan elde edilen veriler istatistiksel olarak analiz edilerek yorumlanmıştır. Bunun için SPSS (*Sosyal Bilimler İçin İstatistik Paketi*) programı kullanılmıştır. Verilerin çözümlenmesinde frekans, aritmetik ortalama, standart sapma, yüzde gibi betimsel istatistiklerden yararlanılmıştır. Fark analizlerinde iki bağımsız değişken için bağımsız örneklem t-Testi, bağımsız değişkenin ikiden fazla düzeyi olduğunda Varyans analizi kullanıldı. Araştırma sonucunda; Sınıf Öğretmenlerinin İş Sağlığı ve Güvenliği bilgi düzeyinin yüksek olduğu, öz yeterlik algılarının hizmet süresine ve çalışma durumuna göre anlamlı farklılık gösterdiği ve daha önce iş sağlığı ve güvenliği eğitimi almaları durumuna göre anlamlı bir fark olmadığı sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler: Güvenlik Kültürü, Ölçek Geliştirme, İş Güvenliği, İş Sağlığı, Öz Yeterlik

Abstract

The present study aims to determine the occupational health and safety (OHS) self-efficacy perceptions of primary teachers working in İğdır, Turkey. A significant trigger for conducting this study was the lack of an academic study into the OHS self-efficacy perceptions of primary teachers in this city. A questionnaire form was prepared by investigating and analyzing the studies into how to develop scales. The draft questionnaire was first given to 110 teachers before a factor analysis could be achieved. Following the reliability calculation phase, the final version of the questionnaire was produced. The population of this study first consisted of 708 primary teachers. Given that no samplings were made within the research scope, all the participants were determined on a voluntary basis. Thus, the final number of those participating in this study was determined to be 366. The OHS knowledge levels of teachers, service durations, working conditions, and previous OHS training were the independent variables while the expressions of the teachers in regards to the perception of OHS self-efficacy formed the dependent variables of this study. The data obtained was analyzed and interpreted statistically thanks to the SPSS program, for which such descriptive statistics as frequency, arithmetic mean, standard deviation, and percentage were used. While the t-Test was used if the number of the independent variables was two, the Variance analysis was used if this number was bigger than two. As a result, it was concluded that the OHS knowledge levels of elementary school teachers were high and that their self-efficacy perceptions differed significantly depending on the number of years spent teaching and working conditions while no significant difference was present in regards to whether they had been trained about occupational health and safety earlier or not.

Keywords: Scale Development, Occupational Health, Safety Culture, Self-Efficacy

I. GİRİŞ

Nüfus yoğunluğunun oldukça fazla olduğu eğitim sektöründe okul paydaşlarının sağlıklı ve güvenli bir şekilde eğitim öğretimlerini sürdürebilmeleri için İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG) konusuna önem verilmesi önem arz etmektedir. Alanyazın incelendiğinde İSG kavramlarıyla ilgili daha çok inşaat, maden ve sağlık alanlarında çalışmalar yapıldığı, eğitim kurumlarına yönelik ise yapılan çalışmaların çok az olduğu anlaşılmıştır. Okullar,

düzenli bir eğitim öğretim kurumu olmasına rağmen İSG ile ilgili olarak bazen istenilmeyen durumlarla karşılaşılması kaçınılmaz olmaktadır. Öğrenciler gerek ders saatlerinde gerekse ders saatleri dışında bazı tehlikeli durumlara maruz kalabilmektedirler [1]. Yaşanan kazaların %98'i insanların dikkatsizliğinden, tedbirsizliğinden, kullanılan araç gereçlerin kullanımına ilişkin bilgisizliğinden ve kurallara uyulmamasından kaynaklanmaktadır. Bu durumun da en büyük sebebinin eğitimsizlik olduğu bilinmektedir [2,3]. İşyerinde güvenlik önlemleri, çalışma stilleri ve üretim yöntemleri; işçilerin sağlık ve güvenlik

açısından koruma düzeyini artırabilmeli ve işyerinin idari yapısının herhangi bir seviyesinde uygulanabilmelidir [4]. Eğitim sistemimizde okul-aile-çevre arasında yeteri kadar iş birliği ve koordinasyon sağlandığı söylenemez. Bunun sonucunda; akademik başarının düşmesi, öğrencilerin zararlı alışkanlıklarla daha küçük yaşlarda tanışmaları, okullardaki bazı problemler olarak karşımıza çıkmaktadır [5].

T.C. Millî Eğitim Bakanlığı Strateji Geliştirme Başkanlığı 2018/2019 Eğitim Öğretim Yılı Örgün Eğitim İstatistikleri Tablo 1'de gösterildiği gibidir.

Tablo 1. 2018/2019 Eğitim öğretim yılı örgün eğitim istatistikleri [6]

Okul Türü	Öğretmen Sayısı	Öğrenci Sayısı	Toplam
Okul Öncesi	93.302	1.564.813	1.658.115
İlkokul	300.732	5.267.378	5.568.110
Ortaokul	354.198	5.627.075	5.981.273
Ortaöğretim	371.234	5.649.594	6.020.828
Toplam	1.119.466	18.108.860	19.228.326

222 Sayılı İlköğretim ve Eğitim Kanununun 3. maddesine göre Mecburi ilköğretim çağı, 6-14 yaş grubundaki çocukları kapsamaktadır. Bunun 6-10 yaş grubunu ilkokullar oluşturmaktadır. Bu çocukların sağlıklı olarak eğitimlerini sürdürebilmeleri için güvenli ortamlara ihtiyaçları vardır.

Millî Eğitim Bakanlığı Bilişim Sistemleri (*MEBBİS*) platformunda İş Yeri Sağlık ve Güvenlik Modülü mevcuttur. Bu modülde duyurular, kurum işlemleri, risk değerlendirme işlemleri, acil durum işlemleri ve periyodik kontrol işlemleri yer almaktadır. Kurum işlemlerinde kurumla ilgili genel bilgiler bulunmaktadır. Kurum risk değerlendirme işlemlerinde değerlendirme ekibi, kurum risk değerlendirme ve ödenek girişi yapılmaktadır. Acil durum işlemlerinde ekip bilgi girişi, acil durumlar, tatbikat raporları ve tahliye planları bulunmaktadır. Son olarak kurum periyodik kontrol işlemlerinde ise tesisat, jeneratör, kalorifer, topraklama, yangın sistemleri ve paratoner kontrolleri yapılmaktadır. Bu modüldeki verilerin kontrolünden ve güncellemesinden okul yönetimi sorumludur. 30.06.2012 tarihli Resmî Gazetede yayımlanan 6331 Sayılı İSG Kanunu'nun amacı; işyerlerinde İSG ilkelerinin uygulanması ve var olan sağlık ve güvenlik unsurlarının düzenlenmesi amacıyla işverenlerin ve çalışanların görevlerini, yetkilerini, sorumluluklarını, haklarını ve yükümlülüklerini tanzim etmektir. 6331 Sayılı İSG Kanunu göz önünde bulundurularak MEB bünyesinde görev yapanlara yönelik "Çalışanların Temel İSG Eğitimi" periyodik dönemler halinde verilmektedir. Bu eğitimlerin MEB bünyesinde görev yapan iş güvenliği uzmanlığı belgesine sahip eğitimciler tarafından verilmesi amaçlanmıştır [7].

İSG konusuna okullarda gereken ilginin az olması ülkemizdeki akademik çalışmalara da yansımıştır. Yapılan literatür taramalarında, 6331 Sayılı İSG Kanunu ile ilgili diğer kurumlarda yeterince çalışma yapılmasına rağmen eğitim kurumlarına yönelik çalışmaların az olması ve okullarda İSG mevzuatlarına uyulduğu sonuçlarının tespit edilmesi düşündürücüdür [8,9].

Dünya Sağlık Örgütü (*WHO*) ve Uluslararası Çalışma Örgütü (*ILO*) İSG'nin tanımını, çalışanların tamamının bedensel, psikolojik, sosyolojik sağlık ve huzurlarının ideal seviyeye çıkarılması ve bu seviyenin korunması, iş yeri şartlarının, yakın çevrenin ve üretilen ürünlerin sonucunda sağlığa zarar verebilecek unsurların minimize edilmesi, çalışanların hayatını tehlikeye atabilecek her türlü risk unsurlarının ortadan kaldırılması, yine çalışanların yeterliklerine göre işlere yerleştirilmesi ve bu yeterliklere uygun iş ortamlarının sağlanması olarak tanımlamaktadır [10].

Bir iş yerinde İSG ile ilgili yönetim sistemi oluşturmak için hem işverenin hem de çalışanların sorumlulukları bulunmaktadır. 6331 sayılı İSG Kanununda çalışan kavramı kullanılarak işçi memur ayırımı kaldırılmıştır [11]. Bu kanun kapsamında düzenlenen tüm yükümlülükler, aynı zamanda çalışanların haklarıdır [12].

Risk değerlendirmesine dayalı önleyici (*proaktif*) bir anlayışın hukuk kurallarına uygun bir şekilde uygulanabilmesi için ISO 45001 İSG Yönetim Sistemi kurum ve kuruluşlara büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Risk değerlendirmesi ve yönetimi kavramı ISO 45001'in asıl amacını oluşturmaktadır. Alınacak tedbirler risk değerlendirmesi sonucu ortaya çıkan sonuçlara göre yapılmaktadır. ISO 45001 İş Sağlığı ve Yönetim Sistemi kurum ve kuruluşlarda; ortaya çıkabilecek her türlü riske karşı hazırlıklı olmaları, iş gücü ve iş günü kayıplarının ve bu sebepten ötürü meydana gelen yüksek maliyetlerin minimize edilmesi, çalışanların ve müşterilerin memnuniyeti, üretim maliyetlerini en aza indirilmesi, yangın, patlama, makine arızaları ve devre dışı kalmalar gibi acil durumlara karşı hazırlıklı olmaları, resmi kurumlara karşı hukuki ceza riskini ortadan kaldırması, diğer kalite birimleriyle uyumlu, verimli ve üretim artışı gibi hususlarda avantajlar sağlamaktadır. [13].

İSG kavramının çalışanların, iş yerlerinin ve üretimin korunması amaçları etrafında şekillendiğini söylemek mümkündür [14,15,16]. İSG çalışanların iş kazası geçirmelerini ve işleriyle ilgili meslek hastalıklarına yakalanmalarını önlemek, bu amaçlar doğrultusunda çalışanları işleriyle ilgili her türlü riskten koruyarak, sağlıklı ve güvenli bir iş ortamı oluşturmak amacıyla alınması gereken önlemler ve yerine getirilmesi gereken işleyişler olarak tanımlanmıştır [17]. Bir diğer tanıma göre İSG, ruhsal, bedensel, maddi ve manevi her türlü riskten uzak ve bu risklerin kontrol altına alınmasıyla çalışanların güvenliğinin sağlanmasıdır [18]. İSG etkinliklerinin kurum ve kuruluşların genel hedefleri ile uyumlu olarak sistematik bir şekilde ele alınıp sürekli iyileştirme yaklaşımı çerçevesinde analiz edilmesi iyi bir iş güvenliği sağlanabilmesi için zorunludur [19].

Bir görevi yapabilmek için gerekli bilgi, beceri ve tutumlara sahip olmaya yeterlik denir [20]. Öz yeterlik ise bireylerin becerilerinin bir işlevi değil, becerilerini kullanarak yapabildiklerine ilişkin yargılarının bir ürünüdür [21]. Öz yeterlik kavramı öğretmenlerin görev ve sorumlulukları ile ilgili davranışlarını tahmin etmek ve eğitim alanında öğretmen etkinliklerindeki bireysel farklılıkları açıklamak amacıyla kullanılmaktadır [22]. Öz yeterlik, öz değerlendirme adıyla tanımlanan ölçme araçları ile ölçülebilmektedir. Alanyazında kullanılan ölçme araçları genellikle likert tipi ölçeklerdir. Açık uçlu sorularla ve eksik cümleleri tamamlama ölçekleri ile de öz yeterlik ölçülmektedir.

24 Haziran 1973 tarihli Resmî Gazetede yayımlanan 1739 sayılı Millî Eğitim Temel Kanunu'nun 43. maddesinde öğretmenlik mesleği, "devletin eğitim, öğretim ve bununla ilgili yönetim görevlerini üzerine alan özel bir ihtisas mesleği" şeklinde tanımlanmaktadır [23]. Sınıf Öğretmeni ilköğretim 1-4. sınıf öğrencilerinin eğitimlerini ve öğretimlerini yürüten kişilerdir. Nitelikli bir eğitim ve öğretim kuşkusuz donanımlı öğretmenlerin ellerinde amacına ulaşacaktır. Dolayısıyla öğretmen, eğitim ve öğretimin öznesidir [24]. Bir eğitim kurumunun akademik yeterliliğini veya yetersizliğini belirleyen, öğrenenlerin kişisel becerilerini geliştirmelerini, kendilerine ve toplumlarına faydalı bilgi, beceri ve değerlerle yetişmelerini sağlayan en önemli güç öğretmendir [25].

Öğretmenler eğitim sürecinde işleriyle ilgili kararlar alabilmeli, güvenilir bir ortamda yenilikçi fikirleri dile getirip uygulayabilmelidir. Okullar geleceği inşa etmeli hem ona yön vermeli hem de bireyleri buna hazırlamalıdır [26].

Çocuklar okul servislerinde, okul bahçesinde, sınıflarda, koridorlarda, laboratuvarlarda, oyun ve spor alanlarında, lavabolarda ve okul çıkışlarında kaza ve yaralanma ile sonuçlanabilecek çok sayıda tehlike kaynağı ile karşı karşıyadırlar [27]. Bu tehlikelere karşı alınabilecek önlemler öncelikle tehlikelerin doğru ve

eksiksiz tanımlanması, tehlikelere bağlı olarak çıkabilecek risklerin doğru ve kapsamlı bir şekilde belirlenmesi ve risklerin değerlendirilmesi olarak sıralanmıştır [4,28].

Bu çalışmanın amacı Iğdır ilinde görev yapan sınıf öğretmenlerinin İSG öz yeterlik algılarını tespit etmek ve eksik oldukları konular hakkında önerilerde bulunmaktır. Bu amaç doğrultusunda aşağıdaki sorulara cevap aranmıştır.

- Sınıf öğretmenlerinin İSG bilgisi ne düzeydedir?
- Sınıf öğretmenlerinin İSG öz yeterlik algıları hizmet süresine göre anlamlı farklılık göstermekte midir?
- Sınıf öğretmenlerinin İSG öz yeterlik algıları çalışma durumuna göre anlamlı farklılık göstermekte midir?
- Sınıf öğretmenlerinin İSG öz yeterlik algıları ile daha önce İSG eğitimi almalarına göre farklılık göstermekte midir?

Bu çalışma ile eğitim kurumlarının başta ilköğretim bölümünde görev yapan öğretmenler olmak üzere diğer birimlerinde de görev yapan öğretmenlerin İSG'ye ilişkin öz yeterlikleri hakkında hem alanyazına katkı sağlaması hem de bundan sonraki araştırmacılara yol göstermesi bakımından önemlidir.

II. MATERYAL ve YÖNTEM

2.1. Araştırmanın Modeli

Bu araştırma, nicel araştırma yöntemlerinden hem tarama hem de karşılaştırma modelinde tasarlanmıştır. Nicel veri analizi, verilerin toplanması, işlenmesi ve anlamlı sonuçlar çıkarılması sürecidir [29]. Nicel araştırmalar, verilerin toplanmasını ve analiz edilmesini gerektirmektedir. Bu verilere ulaşmak için gözlem, anket, ölçek gibi soruşturma stratejileri kullanılır. Nicel araştırma yöntemleri bilimsel çalışma yapılırken, verilere ulaşmak ve ulaşılan bu sonuçları bilimsel temele dayandırmak için kullanılır. Veriler gözlemlenebilir, sayısal ve ölçülebilir şekilde ifade edilir [30].

Tarama modeli, bir durumu geçmişte ya da halen var olan şekliyle betimlemeyi amaçlayan bir araştırma türüdür. Araştırmaya konu olan olay, birey ya da nesne, kendi koşulları içinde ve olduğu gibi tanımlanmaya çalışılır. Var olan durumu herhangi bir şekilde değiştirme, etkileme söz konusu değildir [31]. Tarama modelinde, veri taramasının sistematikleşmesi için gerekli ölçüm parametreleri, bağımlı ve bağımsız değişkenler ve son olarak da veri yapılandırıcı ölçekler belirlenir [32]. Tarama modelinin tercih edilmesinin sebebi de, bu araştırmanın alan-yazında sınıf öğretmenlerinin İSG öz yeterlikleri ile ilgili öncü çalışmalardan biri olmasıdır.

Karşılaştırma yöntemi ise iki veya daha çok değişken arasındaki ilişkiyi ortaya koyan bir araştırma türüdür. Bu modelde ilişkilerin karşılaştırılması yolu ile belli bir sonucun oluşma nedenleri teke indirgenmeye çalışılır

[31]. Karşılaştırma yönteminde hiçbir zaman kesin bir ifade ile bir değişkenin diğer değişkenin sebebi ya da sonucu olduğu sonucuna varılamaz. Ancak iki değişken arasında bir neden sonuç ilişkisinin olabileceğine ilişkin deliller elde edilebilir [33].

2.2. Evren-Örneklem/Çalışma Grubu

Tablo 2. Iğdır ilindeki ilkokul sayısı [34]

Sıra No	Yerleşim Merkezi	Sayı
1	Iğdır Merkez	61
2	Tuzluca İlçesi	32
3	Aralık İlçesi	22
4	Karakoyunlu İlçesi	18
TOPLAM		133

Iğdır ili genelinde bulunan ilkokul sayısı Tablo 2'de gösterilmiştir.

Araştırma Iğdır ilinde 11.05.2020 ile 29.05.2020 tarihleri arasında il sınırları içerisinde bulunan toplam 133 ilkokulun tamamında gerçekleştirilmiştir. Herhangi bir örneklem seçimi yapılmadan araştırmanın evreni olan 708 sınıf öğretmeninin tamamına ulaşılmak istenmiş ancak 366 sınıf öğretmeni ankete katılmıştır. Ankete katılanlar araştırma evreninin %51,69'unu oluşturmaktadır.

Tablo 3. Iğdır ilinde görev yapan sınıf öğretmenlerinin dağılımı [35]

Yerleşim Merkezi	Kadrolu	Sözleşmeli	Ücretli	TOPLAM
Iğdır Merkez	324	56	75	455
Tuzluca İlçesi	35	48	20	103
Aralık İlçesi	31	50	7	88
Karakoyunlu İlçesi	24	29	9	62
TOPLAM	414	183	111	708

Öğretmenlerin çalışma durumları ve merkezlere göre dağılımları Tablo 3'te gösterilmiştir.

2.3. Veri Toplama Araçları

Araştırma kapsamında iki bölümden oluşan bir ölçek hazırlanmıştır. Birinci bölümde kişisel bilgilerin elde edilmesi amacıyla 9 soru, ikinci bölümde ise İSG Öz Yeterlik Algılarını tespit etmek amacıyla hazırlanan 32 soru bulunmaktadır. Anket formu ile sınıf öğretmenlerinin demografik özellikleri ve İSG öz yeterlik algı düzeyleri beşli likert ölçeği ile ölçülmüştür.

Tablo 4. Ölçeğe verilen cevapların puan aralıkları ve yorumlaması

Seçenek	Puan	Yorum
Kesinlikle Katılmıyorum	1.00 - 1.79	Çok Düşük
Katılmıyorum	1.80 - 2.59	Düşük
Kararsızım	2.60 - 3.39	Orta
Katılıyorum	3.40 - 4.19	Yüksek
Kesinlikle Katılıyorum	4.20 - 5.00	Çok Yüksek

Tablo 4'te de görüleceği gibi maddelere verilen cevapların ortalaması 1.00 - 1.79 arasında olması durumunda sınıf öğretmenlerinin o maddeye hiç katılmadığı (*çok düşük*), 1.80 - 2.59 arasında olması durumunda katılmadığı (*düşük*), 2.60 - 3.39 arasında olması durumunda kararsız olduğu (*orta*), 3.40 - 4.19 arasında olması durumunda katıldığı (*yüksek*) ve 4.20 - 5.00 arasında olması durumunda kesinlikle katıldığı (*çok yüksek*) yorumunu yapmak mümkündür [35].

2.4. Veri Toplama Araçlarının Geçerliliği ve Güvenirliği

Literatür incelemesinde ölçek geliştirme çalışmaları araştırılarak [36,37,38,39,40,41] aşağıdaki basamaklar doğrultusunda ölçek geliştirilmiştir. Bir çalışmada ölçek geliştirebilmek için bazı basamaklardan geçilerek sonuca varılmalıdır. Bu basamaklar;

- 1) Madde Havuzu Oluşturma Basamağı
- 2) Uzman Görüşüne Başvurma Basamağı
- 3) Ön Deneme Basamağı
- 4) Faktör Analizi Basamağı
- 5) Güvenirlik Hesaplama Basamağı [42,31,43].

Literatür taraması yapılarak, ilgili mevzuatlar incelenerek ve sınıf öğretmenlerinin de görüşleri alınarak bu araştırma için araştırmacı tarafından 64 sorudan oluşan madde havuzu oluşturulmuştur. Uzman görüşüne başvurularak 60 maddeden oluşan taslak ölçek oluşturulmuştur. Sınıf öğretmenlerinde İSG farkındalığı oluşturacak ve onların İSG bilgi düzeylerini ölçen sorulardan oluşmaktadır. Uzman görüşü anket çalışmalarında anketin kapsam geçerliğini gösteren bir yoldur [30].

Yazım ve imla kontrolleri Türkçe öğretmenleri tarafından yapıldıktan sonra 110 sınıf öğretmenine taslak ölçek uygulanmıştır. Uygulanan ölçek sonuçlarına göre faktör analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda aynı anlamı taşıyan maddeler ile faktör analizi sonucunda güvenilirlikleri düşük olan maddeler taslak ölçekten çıkarılarak 32 maddeden oluşan anket oluşturulmuştur. Faktör analizi, geliştirilen ölçeğin yapı geçerliğini ortaya koymak ve ölçekte bulunan maddelerin faktör yüklerinin belirlenerek sınıflandırılması amacıyla yapılmıştır. Ölçeğin yapı geçerliğine ilişkin bilgi toplamak amacıyla "Döndürülmüş Temel Bileşenler Analizi" kullanılmıştır. Verilerin temel bileşenler analizine uygunluğu *Kaiser-Meyer Olkin (KMO)* katsayısı ve *Barlett Testi (Bartlett's Test of Sphericity)* ile incelenmiştir. KMO katsayısının 0,927, *Bartlett's*

Sphericity testinin sonucunun 8100,811 ve $p < 0.05$ olduğu görülmüştür. Bu bulgular, verilerin faktör analizine uygunluğunu göstermektedir [44].

Faktörlerin güvenilirlik hesaplamaları için *Cronbach Alpha* katsayıları hesaplanmıştır.

Tablo 5. Döndürme sonucunda elde edilen faktör yükleri

Faktör 1	Faktör 2	Faktör 3	Faktör 4	Faktör 5	Faktör 6	Faktör 7
M61 ,823	M46 ,767	M11 ,839	M40 ,730	M53 ,871	M56 ,906	M6 ,677
M62 ,813	M47 ,748	M12 ,821	M38 ,699	M52 ,736	M57 ,864	M8 ,660
M64 ,774	M48 ,736	M10 ,771	M41 ,676	M51 ,677		M9 ,645
M63 ,772	M17 ,666	M43 ,614	M39 ,674	M55 ,674		
M60 ,772	M28 ,637	M14 ,606	M42 ,653			
M59 ,572	M54 ,628		M35 ,568			

Tablo 5 incelendiğinde, ölçekte yer alan 32 maddeye ilişkin faktör yükleri 0.90 ile 0.56 arasındadır. Yapılan istatistik analiz sonucunda ölçekte yer alan maddelerin 6'sı birinci faktörde, 6'sı ikinci faktörde, 5'i üçüncü faktörde, 6'sı dördüncü faktörde, 4'ü beşinci faktörde, 2'si altıncı faktörde ve 3'ü yedinci faktörde toplanmıştır. Birinci faktörde toplanan maddeler genellikle bilgi düzeyini ortaya çıkarmaya yönelik olduğu için bu faktöre "Genel Bilgi Düzeyi" ismi verilmesi uygun görülmüştür. İkinci faktörde bulunan maddelere bakıldığında, bu maddeler okullardaki mevcut bazı uygulamaların sağlıklı bir şekilde devam etmesi için yapılması gereken ifadelerden oluşmaktadır. Bundan dolayı bu faktöre "Bakım ve Onarım" ismi verilmesi uygun görülmüştür. Üçüncü faktörde toplanan maddelerin, okullarda acil durumlarda kargaşa ve izdihamı önlemeye yönelik ifadelerden oluştuğu için bu faktöre "Acil Durum" ismi verilmesi uygun görülmüştür. Dördüncü faktörde bulunan maddelere bakıldığında tamamının düşme, kayma ve çarpma ile ilgili ifadelerden oluştuğu görülmektedir. Bu nedenden dolayı bu faktöre "Düşme ve Kayma" adının verilmesi uygun görülmüştür. Beşinci faktörde bulunan maddelere bakıldığında ise genellikle okullarda olası bir yangını algılama ve uyardırmaya yönelik ifadelerden oluştuğu görülmektedir. Bundan dolayı bu faktöre de "Yangın" adı verilmesi uygun görülmüştür. Altıncı faktörde toplanan maddeler okullardaki paratonerlerle ilgili ifadelerden oluştuğu için bu faktöre "Topraklama" adı verilmesi uygun görülmüştür. Son olarak yedinci faktördeki ifadelerin tamamı yasal süreçlerle ilgili ifadelerden oluştuğu için bu faktöre de "Mevzuat" adı verilmesi uygun görülmüştür.

Ölçeğin faktörleri ve geneli için güvenilirlik katsayısı hesaplanmış ve Tablo 6'da verilmiştir. Tablo 6'da görüldüğü gibi hesaplanan güvenilirlik katsayıları ,938 ile ,805 arasında değişmektedir. Ölçeğin genel güvenilirlik katsayısı (*Cronbach Alpha*) $\alpha = ,882$ olarak hesaplanmıştır.

Tablo 6'da görüldüğü gibi ölçeğin faktörleri ve geneli için hesaplanan güvenilirlik katsayıları ,938 ile ,805 arasında değişmektedir. Ölçeğin genel güvenilirlik katsayısı (*Cronbach Alpha*) $\alpha = ,882$ olarak hesaplanmıştır.

Araştırmadan elde edilen veriler istatistiksel olarak analiz edilerek yorumlanmıştır. Bunun için SPSS (*Sosyal Bilimler İçin İstatistik Paketi*) for Windows 21.0 programı kullanılmıştır. Verilerin çözümlenmesinde frekans, aritmetik ortalama, standart sapma, yüzde gibi betimsel istatistiklerden yararlanıldı. Fark analizlerinde iki bağımsız değişken için t-Testi, ikiden fazla bağımsız değişken için Varyans analizi (*ANOVA*) kullanıldı. Verilerin normal dağılım gösterip göstermediği belirlemek için *Skewness* (*çarpıklık*) ve *Kurtosis* (*basıklık*) değerlerine bakılmıştır. *Skewness* değeri -1,461 ile ,488 arasında *Kurtosis* değeri ise -1,651 ile 2,172 arasında değiştiği belirlenmiştir. *Kurtosis* ve *Skewness* değerleri -2 ile +2 olduğu zaman normal dağılım olduğu kabul edilmektedir [45]. Etki büyüklüğü için Tablo 7'deki veri aralıkları kullanılmıştır [46].

Etki büyüklüğü anlamlı farklılığın ortaya konması için ilgilenilen sonuç değişkenine göre iki ortalama ya da iki oran arasındaki beklenen farklılık olarak ifade edilebilir [47,48].

Tablo 6. Faktörlere ait güvenilirlik katsayıları

Faktör Adı	<i>Cronbach's Alpha</i>
Genel Bilgi Düzeyi	,938
Bakım ve Onarım	,902
Acil Durum	,909
Düşme ve Kayma	,860
Yangın	,858
Topraklama	,905
Mevzuat	,805
GENEL ORTALAMA	,882

Tablo 7. Etki büyüklüğü ve yorumlaması

Puan	Yorum
0,01	Küçük
0,059	Orta
0,138	Büyük

Etki büyüklüğü anlamlı farklılığın ortaya konması için ilgilenilen sonuç değişkenine göre iki ortalama ya da iki oran arasındaki beklenen farklılık olarak ifade edilebilir [47,48].

III. BULGULAR ve TARTIŞMA

Ölçek maddelerine uygulanan çalışanların değişkenleri Tablo 8'de gösterilmiştir.

Tablo 8. Araştırmaya katılanların bazı demografik özellikleri

Değişken	Grup	Frekans	Yüzde
Cinsiyet	Kadın	224	61,2
	Erkek	142	38,8
Yaş	18-24	14	3,8
	25-31	175	47,8
	32-38	95	26,0
	39-45	37	10,1
	46 ve Üzeri	45	12,3
Mezuniyet Durumu	Eğitim Fakültesi	312	85,2
	Fen Edebiyat Fakültesi	19	5,2
	Eğitim Enstitüsü	7	1,9
	Lisansüstü	12	3,3
	Diğer	16	4,4
Hizmet Süresi	1-5 Yıl	159	43,4
	6-10 Yıl	67	18,3
	11-15 Yıl	66	18,0
	16-20 Yıl	24	6,6
	21 Yıl ve Üzeri	50	13,7
Çalışma Durumu	Kadrolu	264	72,1
	Sözleşmeli	67	18,3
	Ücretli	35	9,6
İSG Eğitimi	Evet	306	83,6
	Hayır	60	16,4
Yangın Eğitimi	Evet	201	54,9
	Hayır	165	45,1
Arama-Kurtarma Eğitimi	Evet	95	26,0
	Hayır	271	74,0
İlkyardım Eğitimi	Evet	258	70,5
	Hayır	108	29,5

Tablo 8'de görüldüğü gibi katılımcıların %61,2'si kadın, %38,8'i erkektir. Katılımcıların yaş aralığına bakıldığında en fazla katılımın 25 - 31 yaş (%47,8), en az katılımın ise 18 - 24 yaş (%3,8) aralığında olduğu anlaşılmaktadır. Katılımcıların mezuniyet alanına bakıldığında en fazla katılımın eğitim fakültesi mezunlarının oluşturduğu (%85,2), en az katılımı ise Tablo 9'daki Faktörlerin istatistiksel değerleri Tablo 4'teki veri aralıklarına göre yorumlanmıştır.

Tablo 9'da faktörlerin ortalaması incelendiğinde Acil Durum ($\bar{X}=4,071$), Düşme ve Kayma ($\bar{X}=3,732$) ve Genel Bilgi Düzeyi ($\bar{X}=3,587$) faktörlerinin ortalamalarının yüksek olduğu görülmektedir. Bakım

eğitim enstitüsü mezunları (%1,9) oluşturduğu anlaşılmaktadır. %3,3'ünün lisansüstü mezunu olduğu anlaşılmaktadır. Hizmet sürelerine bakıldığında %43,4 ile en fazla katılımın 1 - 5 yıl hizmet süresi olanlar, en az katılımın da 16 - 20 yıl (%6,6) hizmeti olanlar oluşturmaktadır. 21 yıl ve üzeri hizmeti olanların oranı ise %13,7'dir. Katılımcıların çalışma durumuna bakıldığında en fazla katılımı %72,1'le kadrolu öğretmenler oluşturmaktadır. Bunu %18,3'le sözleşmeli ve %9,6 ile de ücretli öğretmenlerin takip ettiği anlaşılmaktadır. Daha önce İSG Eğitimi alanların oran %83,6 iken bu eğitimi almayanların oranı %16,4 olduğu görülmektedir. Katılımcıların %54,9'unun daha önce Yangınla Mücadele Eğitimi aldığı, %45,1'inin bu eğitimi almadığı görülmektedir. Daha önce Arama ve Kurtarma Eğitimi alanların oranının %26, bu eğitimi almayanların oranının ise %74 olduğu görülmektedir. Katılımcıların %70,4'i daha önce İlkyardım Eğitimi aldığı %29,5'inin bu eğitimi almadığı anlaşılmaktadır.

Araştırmanın birinci sorusu; Sınıf Öğretmenlerinin İSG bilgisi ne düzeydedir? şeklinde düzenlenmiştir.

Faktörlerin istatistiksel değerleri hesaplanarak Tablo 9'da verilmiştir.

Tablo 9. Faktörlerin istatistiksel değerleri

Değişkenler	N	\bar{X}	SS	Yorum
Genel Bilgi				
Düzeyi	366	3,587	,878	Yüksek
Faktörü				
Bakım ve				
Onarım	366	3,321	1,044	Orta
Faktörü				
Acil Durum				
Faktörü	366	4,071	,927	Yüksek
Düşme ve				
Kayma	366	3,732	1,118	Yüksek
Faktörü				
Yangın				
Faktörü	366	3,074	1,240	Orta
Topraklama				
Faktörü	366	2,614	1,371	Orta
Mevzuat				
Faktörü	366	3,260	1,223	Orta
Genel				
Ortalama	366	3,485	,818	Yüksek

ve onarım ($\bar{X}=3,321$), Mevzuat ($\bar{X}=3,260$), Yangın ($\bar{X}=3,074$) ve Topraklama ($\bar{X}=2,614$) faktörlerinin de orta olduğu görülmektedir. Ölçeğin Genel ortalamasının da ($\bar{X}=3,485$) yüksek olduğu görülmektedir. Bu sonuçlardan Sınıf Öğretmenlerinin İSG bilgi düzeyinin ve Öz Yeterliklerinin yüksek olduğu görülmektedir.

Tablo 10. Sınıf öğretmenlerinin İSG öz yeterlik algılarının hizmet süresine göre ANOVA sonuçları

Değişkenler	N	\bar{X}	SS	F	p	Anlamlı Fark	η^2
1-5 Yıl	159	3,255	,766	9,095	,000*	21 Yıl ve Üzeri ile 1-5 Yıl, 1-5 Yıl < 21 Yıl ve Üzeri, 1-5 Yıl < 11-15 Yıl, 6-10 Yıl < 21 Yıl ve Üzeri	,092
6-10 Yıl	67	3,417	,853				
11-15 Yıl	66	3,706	,798				
16-20 Yıl	24	3,671	,564				
21 Yıl ve Üzeri	50	3,923	,813				

*p<0,05

Araştırmanın ikinci sorusu; Sınıf öğretmenlerinin İSG öz yeterlik algıları hizmet süresine göre anlamlı farklılık göstermekte midir? Şeklinde düzenlenmiştir.

Tablo 10'da sınıf öğretmenlerinin İSG öz yeterlik algıları hizmet süreleri ile karşılaştırıldığında, en yüksek ortalamanın 21 yıl ve üzeri hizmet süresi olanlarda ($\bar{X}=3,923$) görüldüğü anlaşılmaktadır. Bunu 11-15 yıl hizmet süresi olanlar ($\bar{X}=3,706$), 16-20 yıl hizmet süresi olanlar ($\bar{X}=3,671$), 6-10 yıl hizmet süresi olanlar ($\bar{X}=3,417$) ve 1-5 yıl hizmet süresi olanlar ($\bar{X}=3,255$) izlemektedir. Etki büyüklüğü ($\eta^2=0,092$) orta düzeydedir.

Sınıf öğretmenlerinin İSG öz yeterlik algıları ile hizmet süreleri arasında anova testine göre p<0,05 önem seviyesinde anlamlı bir farklılık ortaya çıkmıştır ($F(4,361)=9,095$; $p=,000$). Post Hoc karşılaştırılmasında kullanılan Tukey HSD Testine göre mesleki kıdemi 21 yıl ve üzeri ile 1-5 yıl olan gruplar arasında anlamlı farklılık hesaplanmıştır. Hizmet süresi 11-15 yıl ile 21 yıl ve üzeri olanların İSG öz yeterlik algılarının diğer kıdemdeki öğretmenlere göre daha yüksek olduğu görülmüştür.

Araştırmanın üçüncü sorusu; Sınıf öğretmenlerinin İSG öz yeterlik algıları çalışma durumuna göre anlamlı farklılık göstermekte midir? şeklinde düzenlenmiştir.

Tablo 11'de sınıf öğretmenlerinin İSG öz yeterlik algıları çalışma durumları ile karşılaştırıldığında, en yüksek ortalamanın kadrolu öğretmenlerde ($\bar{X}=3,553$) görüldüğü anlaşılmaktadır. Bunu ücretli öğretmenler ($\bar{X}=3,526$) ve sözleşmeli öğretmenler ($\bar{X}=3,195$) takip etmektedir. Etki büyüklüğü ($\eta^2=0,028$) küçük düzeydedir.

Sınıf öğretmenlerinin İSG öz yeterlik algılarının ile çalışma durumu arasında ANOVA testine göre p<0,05 önem seviyesinde anlamlı farklılık ortaya çıkmıştır ($F(2,363)=5,286$; $p=0,005$). Post Hoc karşılaştırılmasında kullanılan Tukey HSD Testine göre kadrolu ve sözleşmeli öğretmenler arasında anlamlı farklılık hesaplanmıştır. Kadrolu öğretmenlerin lehine olduğu görülmektedir.

Araştırmanın dördüncü sorusu; Sınıf öğretmenlerinin İSG öz yeterlik algıları ile daha önce İSG eğitimi almaları arasında anlamlı bir fark var mıdır? şeklinde düzenlenmiştir.

Tablo 12'ye bakıldığında t testi sonuçlarına göre Sınıf öğretmenlerinin İSG öz yeterlik algıları ile daha önce İSG eğitimi almaları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olmadığı görülmektedir ($t(364)=1,377$; $p=,169>0,05$). Etki büyüklüğü ($\eta^2=0,005$) küçük düzeydedir.

Tablo 11. Sınıf öğretmenlerinin İSG öz yeterlik algılarının çalışma durumuna göre ANOVA sonuçları

Değişkenler	N	\bar{X}	SS	F	p	η^2
Kadrolu	264	3,553	,813	5,286	,005*	,028
Sözleşmeli	67	3,195	,802			
Ücretli	35	3,526	,797			

*p<0,05

Tablo 12. Sınıf öğretmenlerinin İSG öz yeterlik algıları ile daha önce İSG eğitimi almaları arasındaki ilişkiye göre bağımsız örneklem t Testi sonuçları

		N	\bar{X}	SS	t	p	η^2
İSG Eğitimi	Evet	306	3,511	,810	1,377	,169*	,005
	Hayır	60	3,352	,851			

*p<0,05

IV. SONUÇ ve DEĞERLENDİRMELER

Tablo 9'da ölçeğin genel ortalaması $\bar{X}=3,485$ ve Genel Bilgi Düzeyi Faktörünün ortalaması da $\bar{X}=3,587$ bulunmuştur. Tablo 4'de ölçeğe verilen cevapların puan aralıklarına ve yorumlamasına bakıldığında ortalamaların 3.40 - 4.19 arasında "Yüksek" değer aldığı görülmektedir. Araştırma çalışanların tamamına periyodik aralıklarla verilen Temel İSG Eğitiminin de etkili olduğu düşünülmektedir. Kamu çalışanlarının Temel İSG Eğitim Programı'na ilişkin görüşlerinin incelendiği araştırmada [7] öğretmenlerin bu programa yönelik olumlu ancak eğitim süresinin kısalığı, materyal ve uygulama eksikliği ile ilgili olumsuz görüş bildirdikleri tespit edilmiştir. İSG farkındalıklarının değerlendirilmesi amacıyla sağlık çalışanlarına yönelik yapılan alan araştırmasında [49] sağlık çalışanlarının İSG bilgi düzeyinin zayıf olduğu, eğitim düzeyi arttıkça İSG bilgi düzeyinin de arttığı görülmüştür. Çalışanların İSG konusundaki farkındalığının araştırıldığı başka bir çalışmada [50], çalışanların eğitim seviyesi arttıkça, İSG konusunda bilgi düzeyinin de arttığı görülmüştür. Benzer araştırma [7,49,50,51] sonuçları ile araştırma bulgularımızın birbirini desteklediği görülmektedir.

Sınıf öğretmenlerinin İSG öz yeterlik algılarının hizmet süresine göre anlamlı farklılık gösterdiği istatistiksel olarak hesaplanmıştır. Anlamlı farkın, mesleki kıdemi 21 yıl ve üzeri ile 1-5 yıl olan gruplar arasında olduğu ve mesleki kıdemi 21 yıl ve üzeri ile 11-15 yıl olanların lehine olduğu görülmüştür. Tablo 10'da sınıf öğretmenlerinin İSG öz yeterlik algıları hizmet süreleri ile karşılaştırıldığında, en yüksek ortalamasının 21 yıl ve üzeri hizmet süresi olanlarda ($\bar{X}=3,923$), en düşük ise 1-5 yıl hizmet süresi olanlarda ($\bar{X}=3,255$) görüldüğü anlaşılmaktadır. Öğretmenlerin hizmet süresi arttıkça İSG öz yeterlik algılarının da arttığı görülmektedir. Bu durumun sebebinin öğretmenlerin yaşamış oldukları tecrübelerden kaynaklandığı düşünülebilir. Okul güvenliğine ilişkin yönetici ve öğretmen görüşlerinin araştırıldığı bir çalışmada [52] mesleki kıdem bakımından 21 yıl ve üzeri mesleki kıdeme sahip olanlar okul güvenliği kapsamındaki görüşlere daha çok katıldıkları görülmektedir. İSG Uygulamalarına yönelik yapılan çalışmada [53] eğitim kurumu yöneticilerinin İSG uygulamalarına yönelik görüşlerinin mesleki kıdeme göre anlamlı olumlu yönlü ve düşük düzeyde bir ilişki gösterdiği görülmektedir. İSG Uygulamalarına İlişkin yapılan başka bir çalışmada da [54] kıdem süresi arttıkça İSG

uygulamalarına yönelik puanların da arttığı görülmüştür. Benzer araştırma [52,53,54] sonuçları ile araştırma bulgularımızın birbirini desteklediği görülmektedir. Ortaokullarda İSG'nin Araştırılması çalışmasında ise bizim araştırma sonuçlarımızdan farklı olarak görev yıllarına göre öğretmenlerin İSG uygulamaları konusundaki görüşlerinin değişmediği görülmüştür.

Sınıf öğretmenlerinin İSG öz yeterlik algıları çalışma durumlarına göre anlamlı farklılık gösterdiği istatistiksel olarak hesaplanmıştır. Tablo 11'de en yüksek ortalamasının kadrolu öğretmenlerde ($\bar{X}=3,553$) ve en düşük ortalamasının da sözleşmeli öğretmenlerde ($\bar{X}=3,195$) görüldüğü anlaşılmaktadır. Sınıf öğretmenlerinin İSG öz yeterlik algılarının çalışma durumuna göre istatistiksel olarak anlamlı fark olduğu görülmektedir. Öğretmenlerin İSG algı düzeylerinin araştırıldığı bir çalışmada [55] Meslek ve Teknik öğretmenlerinin İSG farkındalıklarının diğer branş öğretmenlerine göre daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. İSG algı düzeylerinin belirlenmesi amacıyla yapılan başka bir çalışmada [11], kadın çalışanların erkek çalışanlara göre, eğitim seviyesi yüksek olanların eğitim seviyesi düşük olanlara göre daha kaderci olduğu görülmüştür.

Sınıf öğretmenlerinin İSG öz yeterlik algıları ile daha önce İSG eğitimi almaları arasında anlamlı bir fark olup olmadığı istatistiksel olarak hesaplanmıştır. Tablo 12 incelendiğinde sınıf öğretmenlerinin İSG öz yeterlik algıları ile daha önce İSG eğitimi almaları ($t(364)=1,377$; $p=,169>0,05$) arasında, istatistiki olarak anlamlı bir fark olmadığı görülmektedir. Verilen Temel İSG eğitiminin etkili olmadığını göstermektedir. Bunun sebeplerinin eğitim süresinin kısa olması ve iş güvenliği uzman sayısının yetersiz olması olduğu sanılmaktadır.

Araştırmanın birinci sorusunda, araştırmaya katılan sınıf öğretmenlerinin İSG bilgi düzeyleri hesaplanmıştır. Buna göre sınıf öğretmenleri İSG konusunda bilgi düzeyi faktörünün "yüksek" olduğunu değerlendirilmiştir. Hizmet süresi 1-5 yıl olanların "orta" olduğu, 6-10 yıl olanların "yüksek" olduğu, 11-15 yıl olanların "yüksek" olduğu, 16-20 yıl olanların "yüksek" olduğu ve 21 yıl ve üzeri olanların da "yüksek" olduğu değerlendirilmiştir. Ayrıca ölçeğin genel ortalamasının da "yüksek" olduğu

değerlendirilmiştir. Sınıf öğretmenlerinin İSG bilgi düzeyinin yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

Araştırmanın ikinci sorusunda ise araştırmaya katılan sınıf öğretmenlerinin İSG öz yeterlik algılarının hizmet süresine göre farklılığı hesaplanmıştır. Hizmet süresi 1-5 yıl olan sınıf öğretmenlerinin İSG algı düzeylerinin "orta", hizmet süresi 6 yıl ve üzeri olanların "yüksek" olduğu değerlendirilmiştir. Hizmet süresi 11-15 yıl ile 21 yıl ve üzeri olan sınıf öğretmenlerinin İSG öz yeterlik algılarının yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

Araştırmanın üçüncü sorusunda da sınıf öğretmenlerinin İSG öz yeterlik algılarının çalışma durumuna göre farklılığı hesaplanmıştır. Sözleşmeli öğretmenlerin İSG algı düzeylerinin "orta", kadrolu ve ücretli öğretmenlerin ise "yüksek" olduğu değerlendirilmiştir. Kadrolu olarak görev yapan sınıf öğretmenlerinin İSG öz yeterlik algılarının yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

Araştırmanın son sorusunda ise sınıf öğretmenlerinin İSG öz yeterlik algıları ile daha önce İSG eğitimi almaları arasındaki fark hesaplanmıştır. Daha önce İSG eğitimi alan sınıf öğretmenlerinin algı düzeylerinin "yüksek", daha önce İSG eğitimi almamış sınıf öğretmenlerinin algı düzeylerinin ise "orta" olduğu hesaplanmıştır. Sınıf öğretmenlerinin İSG öz yeterlik algıları ile daha önce İSG eğitimi almaları arasında anlamlı fark görülmemiştir.

Yapılan araştırma ve elde edilen bilgiler sonucunda aşağıda belirtilen öneriler üretilmiştir:

1. Az tehlikeli grupta yer alan ilkokullarda öğretmenlere ve diğer çalışanlara 3 yılda bir 8 saat verilen "Çalışanların Temel İSG Eğitimi Kursu" her yıl düzenli olarak verilmelidir.

2. Verilen bu kurslarda yangın, deprem, personel tahliyesi, iş kazası, patlama, sabotaj, sel, fırtına, gıda zehirlenmesi, çığ, pandemi ve kimyasal, biyolojik, radyolojik ve nükleer savunma (KBRN) tatbikatlarına da yer verilmelidir.

3. Yönetici, öğretmen ve diğer çalışanların gerekli durumlarda yangın tüplerini kullanabilmeleri için belirli aralıklarla eğitimler düzenlenip tatbikatlar yaptırılabilir.

4. İl/İlçe Milli Eğitim Müdürlüklerinde yeter sayıda İSG uzmanı kadrosu tahsis edilmelidir.

5. Yönetici ve öğretmenlerin İSG alanında akademik çalışmalara katılmaları desteklenmelidir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, bu çalışmaya desteklerinden dolayı İğdir İl Milli Eğitim Müdürlüğüne ve İğdir Üniversitesine teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- [1] Bayındır, N. (2015). *Sınıf öğretmenlerin okuldaki nöbet görevlerindeki öncelikli davranışları*. Eğitim ve Öğretim Araştırmaları Dergisi, 4(4), 199-205.
- [2] Kılıç, İ., ve Demir, S. (2012). *İşverenin İş Sağlığı ve Güvenliği Eğitimi Verme Yükümlülüğü Üzerine Bir İnceleme*. Çalışma İlişkileri Dergisi, 3(1), 23-47.
- [3] Ceylan, H. (2000). *İmalat Sistemlerindeki İş Kazalarının Tahmini İçin Ağırlıklandırılmış Ortalamalardan Sapma Tekniği* (Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Ankara: Gazi Üniversitesi.
- [4] Gür, B. (2020). *İş Sağlığı ve Güvenliğinin Hukuki Boyutu*. Cihan Önen ve Şakir Parlakyıldız (Ed.). İş Sağlığı ve Güvenliği: Mühendislik, Hukuk, Sağlık ve Temel Bilimler Yaklaşımıyla Çözüm Önerileri (içinde). İzmir: Duvar Yayınları, 141-145.
- [5] Kuyaksil, A. (2010). *İlköğretim Okullarında Okul-Aile Birliğinin Okul Güvenlik Yönetimine Katılması*. 2. Uluslararası Risk Altında ve Korunması Gereken Çocuklar Sempozyumu: Güvenli Çevre-Güvenli Okul, AKKM Dairesi Başkanlığı Dairesi Yayınları, 237-266.
- [6] http://sgb.meb.gov.tr/meb_iys_dosyalar/2019_09/3_0102730_meb_istatistikleri_orgun_egitim_2018_2019.pdf (Erişim Tarihi: 3 Haziran 2020).
- [7] Uygur, M. ve Tanrıseven, I. (2017). *Kamu Çalışanlarının Temel İş Sağlığı ve Güvenliği Eğitim Programına İlişkin Görüşlerinin Stufflebeam'in Cipp Modeline Göre İncelenmesi*. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 9(22), 1-14.
- [8] Bülbül, M. (2016). *İş Sağlığı ve Güvenliği Mevzuatının Okullar Açısından İncelenmesi*. 8. İş Sağlığı ve Güvenliği Konferansı, Haliç Kongre Merkezi, Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, İş sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü, Cilt: 1, Yayın No: 61, İstanbul, 170-179.
- [9] Aslan, İ. (2019). *Bingöl İlindeki Öğretmenlerin İş Sağlığı ve Güvenliği Seviyesinin İncelenmesi*. Uluslararası Afet ve Dirençlilik Kongresi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir. 667-672.
- [10] MEB. (2017). *İş Sağlığı ve Güvenliği*. Ankara: Milli Eğitim Bakanlığı.
- [11] ÇASGEM. (2017). *Çalışma ve Sosyal Güvenlik Eğitimi ve Araştırma Merkezi 2017 Yılı Birim Faaliyet Raporu*. Ankara. 102.
- [12] Baycık, G. (2013). *Çalışanların İş Sağlığı ve Güvenliğine İlişkin Haklarında Yeni Düzenlemeler*. Ankara Barosu Dergisi, 71(3), 103-170.
- [13] Yılmaz, F. (2020). *İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetim Sistemleri*. İstanbul: Açık ve Uzaktan Eğitim Fakültesi, İş Sağlığı ve Güvenliği Bölümü.
- [14] Akıllı, H. ve Aydoğdu, Ö. (2013). *İş Sağlığı ve*

- Güvenliğinin Önemi*. MTA Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni, Sayı: 16, 245-250.
- [15] Yiğit, A. (2011). *İş Güvenliği ve İşçi Sağlığı (2. Basım)*. Bursa: Alfa Aktüel Yayınları.
- [16] Ergin, H. ve Mergen, A. (2017). *Hazır Giyim Mağazacılık Sektöründe İş Kazaları ve Çözüm Önerileri: Örnek Bir Uygulama*. Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Sayı: 1, 29-38.
- [17] Tozkoparan, G., ve Taşoğlu, J. (2011). *İş Sağlığı ve Güvenliği Uygulamaları İle İlgili İş Görenlerin Tutumlarını Belirlemeye Yönelik Bir Araştırma*. Uludağ Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi. 2011, 30(1): 181-209.
- [18] Maurice, P., Lavoie, M., Laflamme, L., Swanström, L., Romer, C., and Anderson, R. (2001). *Safety And Safety Promotion: Definitions For Operational Developments*. Injury Control and Safety Promotion. 2001, 8(4): 237-240.
- [19] Robson, S., L., Clarke, A., J., Cullen, K., Bielecky, A., Severin, C., Bigelow, L., P., Irvin, E., Culyer, A. and Mahood, Q. (2006). *The effectiveness of occupational health and safety management system interventions: A systematic review*. Safety Science, 45(3), 331-332.
- [20] Balcı, A. (2005). *Açıklamalı Eğitim Yönetim Terimleri Sözlüğü*. Ankara: Tek Ağaç Basım Yayım, Dağıtım.
- [21] Gürcan, A. (2005). *Bilgisayar Öz Yeterliği Algısı İle Bilişsel Öğrenme Stratejileri Arasındaki İlişki*. Eğitim Araştırmaları, 19, 179-193.
- [22] Yılmaz, M., Köseoğlu, P., Gerçek, C., ve Soran, H. (2004). *Öğretmen Öz-Yeterlik İnancı. Bilim ve Aklın Aydınlığında Eğitim Dergisi*. 5, (58).
- [23] MEB. (1973). *Milli Eğitim Temel Kanunu*, "1739 Sayılı Kanun", Resmî Gazete, 14574, 24 Haziran, 1973.
- [24] Cüceloğlu, D. ve Erdoğan, İ. (2016). *Öğretmen olmak*. İstanbul: Final Kültür Sanat Yayınları.
- [25] Özcan, M. (2011). *Bilgi Çağında Öğretmen Eğitimi, Nitelikleri ve Gücü: Bir Reform Önerisi* 1. Basım Ankara, Türk Eğitim Derneği İktisadi İşletmesi, 2011: 21-23.
- [26] Yılmaz, E., Çalışkan, M., ve Sulak, S., A. (2016). *21. Yüzyıl Becerileri Kapsamında Dönüşen Okul Paradigması*. Eğitim Bilimlerinden Yansımalar, Çizgi Kitapevi Yayınları, Konya, 5-16.
- [27] Latif, A.,H., Williams, W.,R., and Silbert, J. (2002). *Primary school accident reporting in one education authority*. Arch Dis Child, 86(2), 91-94.
- [28] Uzdil, O. ve Güllüoğlu A. (2020). *Türkiye İnşaat Sektöründe 2016 ve 2017 Yıllarında Meydana Gelen İş Kazalarının İstatistiksel Olarak Karşılaştırılması*. International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences, 32 (2), 137-144.
- [29] Ekiz, D. (2015). *Bilimsel Araştırma Yöntemleri: Yaklaşım, Yöntem ve Teknikler*. Ankara: Anı Yayıncılık.
- [30] Büyüköztürk, Ş., Kılıç, Çakmak, E., Akgün, Ö., E., Karadeniz, Ş. ve Demirel, F. (2018). *Eğitimde Bilimsel Araştırma Yöntemleri (25. Baskı)*. Ankara: Pegem Akademi Yayınevi.
- [31] Karasar, N. (2015). *Bilimsel Araştırma Yöntemi*. İstanbul: Nobel Akademik Yayıncılık.
- [32] Owens, L., K. (2002). *Introduction to Survey Research Design*. SRL Fall Seminar Series, <http://www.srl.vic.edu> (03.06.2020).
- [33] Metin, M. (2014). *Kuramdan Uygulamaya Eğitimde Bilimsel Araştırma Yöntemleri*. Ankara: Pegem Akademi Yayıncılık.
- [34] <http://igdir.meb.gov.tr/www/insan-kaynaklari-subesi-1-atama> (Erişim Tarihi: 3 Haziran 2020).
- [35] Mutlu, O. (2019). *İlköğretim Okulu Yöneticilerinin Bilimsel Araştırma Öz-Yeterlilikleri* (Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Uşak: Uşak Üniversitesi.
- [36] Yeşilyurt, S. ve Gül, Ş. (2007). *Ortaöğretim Öğrencilerinin Biyoloji ve Biyoloji Dersine Yönelik Tutumları (Pilot Uygulama)*. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi, 1(20), 28-47.
- [37] Semerci, Ç. (2004). *İlköğretim Türkçe ve Matematik Ders Kitaplarını Genel Değerlendirme Ölçeği*. C.Ü. Sosyal Bilimler Dergisi, 28(1), 49-54.
- SGK. (2010). *2010 İstatistik Yıllığı*. Ankara: SGK Yayını.
- [38] Ekici, G. (2002). *Biyoloji Öğretmenlerinin Laboratuvar Dersine Yönelik Tutum Ölçeği (BÖLDYTÖ)*. Hacettepe Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi, 22(22), 62-66.
- [39] Afacan, Ö., Aydogdu, M. ve Usak, M. (2006). *Fen Teknoloji Toplum (FTT) Dersi Tutum Ölçeği*. International Journal of Environmental & Science Education, 1(2), 189-202.
- [40] Akkoyunlu, B., Orhan, F., ve Umay, A. (2005). *Bilgisayar Öğretmenleri İçin "Bilgisayar Öğretmenliği Öz-Yeterlik Ölçeği" Geliştirme Çalışması*. Hacettepe Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi, Sayı: 29, 1-8.
- [41] Durmuş, B., Yurtkoru, E., S., ve Çinko, M. (2018). *Sosyal Bilimlerde SPSS'le Veri Analizi*. İstanbul: Beta Basım Yayıncılık.
- [42] Balcı, A. (2015). *Sosyal Bilimlerde Araştırma, Yöntem, Yöntem, Teknik ve İlkeler*. Ankara: Pegem Akademi Yayınevi.
- [43] Tezbaşaran, A., A. (2008). *Likert Tipi Ölçek Hazırlama Kılavuzu*. Mersin Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, Eğitim Bilimleri Bölümü, Eğitimde Ölçme ve Değerlendirme Anabilim Dalı, Mersin, 65.
- [44] Büyüköztürk, Ş. (2018). *Sosyal Bilimler İçin Veri Analizi El Kitabı (24. Baskı)*. Ankara: Pegem Akademi Yayınevi.
- [45] George, D., and Mallery, M. (2010). *SPSS for*

- Windows Step by Step: A Simple Guide and Reference*, 17.0 update (10a ed.). Boston: Pearson.
- [46] Cohen, J. (1988). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. (2nd ed.). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- [47] Dawson, B. Trapp, R.G. (2001). *Reading the medical literature: In Basic&Clinical Biostatistics*. Third Ed. New York. Lange Medical Books/McGraw Hill.
- [48] Hulley, S.B., Cummings, S.R., Browner, W.S., Grady, D., Hearst, N. and Newman, T.B. (2001). *Getting ready to estimate sample size: Hypotheses and Underlying Principles*. In *Designing Clinical Research*, 2nd Ed. Lippincott Williams&Wilkins.
- [49] Bayılmış, Ütük, O. (2013). *İş Sağlığı ve Güvenliği Farkındalık Değerlendirmesi: Sağlık Çalışanlarına Yönelik Alan Araştırması* (Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Yalova: Yalova Üniversitesi.
- [50] Akkaya, N. (2019). *İnşaatlarda Yemek Üretimi Yapan Çalışanların İş Sağlığı ve Güvenliği Konusunda Farkındalığı* (Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi). İstanbul: Üsküdar Üniversitesi.
- [51] Özay, M.E., Yazıcı, A., Rüştü, U. (2021). A Survey on Safety Culture: Fire Fighters. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 33(1), 83-89.
- [52] Şabano, S. (2017). *İlkokul ve Ortaokullarda Okul Güvenliğine İlişkin Yönetici ve Öğretmen Görüşleri (Uşak İli Örneği)* (Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Uşak: Uşak Üniversitesi.
- [53] Kilitci, Z., (2018). *Mesleki ve Teknik Eğitim Kurumlarında İş Sağlığı ve Güvenliği Uygulamalarına İlişkin Yönetici Görüşleri*. Basılmamış Yüksek Lisans Tezi, Uşak Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Uşak. 85.
- [54] Doğdu, S. (2019). *Okul Yöneticilerinin İş Sağlığı ve Güvenliği Uygulamalarına Yönelik Görüşlerinin Değerlendirilmesi* (Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Okan Üniversitesi.
- [55] Guerin, R., J., Toland, M., D., Okun, A., H., Guyler, L., R., Baker, D., S., and Bernard, A., L. (2019). *Using a Modified Theory of Planned Behavior to Examine Teachers' Intention to Implement a Work Safety and Health Curriculum*. *American School Health magazine*, 89(7), 549-559.

Homojen Dolgulu Sıkıştırma Ateşlemeli Bir Motorda Supap Profili Optimizasyonu

Optimization of Valve Profile for a Homogeneous Charge Compression Ignition Engine

Ramazan ŞENER¹ 

¹ Batman Üniversitesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, 72100, Batman, Türkiye

Öz

İçten yanmalı motorların giderek sıkılaştıran emisyon standartları dolayısıyla, farklı konseptlerle yanma gerçekleştirilmesi ve emisyonlarının azaltılması amaçlanmaktadır. Homojen dolgulu sıkıştırma ateşlemeli motorlarda, görece düşük sıcaklıklarda yanma meydana geldiğinden dolayı, çok düşük NO_x ve is emisyonları açığa çıkmaktadır. Ancak yanma prosesi, vuruntusuz ve teklemez olarak gerçekleşebilmesi için motorun iyi bir şekilde kontrol edilmesi ve bütün parametrelerinin optimize edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, homojen dolgulu sıkıştırma ateşlemeli dizel yakıtlı bir motorun, bu yeni nesil yanma stratejisine uygun olarak supap profili bir boyutlu yanma modeli ve genetik algoritma kullanılarak optimize edilmiştir. Supap açılma ve kapanma krank açıları parametrik olarak değiştirilmiştir. Ayrıca, supap profilinin tamamen açıldığı noktaya bekleme eklenmiştir. Böylelikle, volümetrik verim artışı hedeflenmiş ve fren gücü değeri maksimize edilmiştir. Tasarlanan yeni supap profili ile motor fren gücü %28 artarken, özgül yakıt tüketimi değeri %6 azalmıştır.

Anahtar kelimeler: Homojen Dolgulu, sıkıştırma ateşlemeli, optimizasyon, supap profili, genetik algoritma.

Abstract

It is aimed to occur combustion process with different concepts to decrease emissions, due to the increasingly stringent emission standards of internal combustion engines. Since combustion occurs at relatively low temperatures in a homogeneous charged compression ignition (HCCI) engines, NO_x and soot emissions were emitted a very low level. However, in order for the combustion process to be carried out without knock and misfire, the HCCI engine must be well controlled, and all engine parameters must be optimized. In this study, the valve profile of an HCCI diesel engine has been optimized using a one-dimensional combustion model and genetic algorithm in accordance with this combustion strategy. Valve opening and closing timings have been changed parametrically. In addition, the dwell angle has been added to the point where the valve profile is fully opened. Thus, the volumetric efficiency increase was targeted, and brake power was maximized. With this newly implemented valve profile, engine brake power increased by 28%, while brake specific fuel consumption value decreased by 6%.

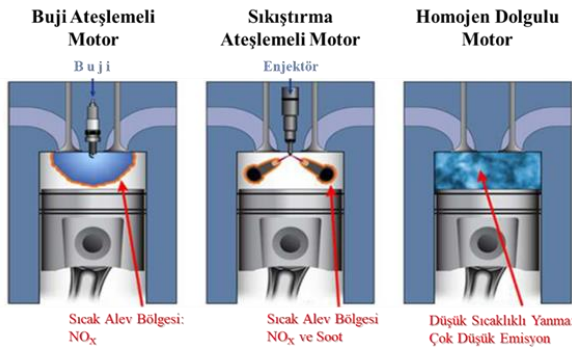
Keywords: Homogeneous charge, compression-ignition engine, optimization, valve profile, genetic algorithm.

I. GİRİŞ

İçten yanmalı motorlar, birçok avantajıyla günümüzde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Yüksek güç yoğunluğuna ve yakıt verimliliğine sahip olmakla birlikte, oldukça olgunlaşmış, güvenilir bir teknolojidir. Ancak gittikçe sıkılaştıran emisyon standartlarından dolayı, emisyon değerleri mümkün olduğunca azaltılması için çalışmalar yapılmaktadır [1–6]. Homojen dolgulu sıkıştırma ateşlemeli motorlar, düşük emisyon değerleri ile ümit vaat etmektedirler [7]. Bu tür motorlarda enjeksiyon emme safhasında yapılı ve yakıt-hava karışımının tutuşması için sıkıştırma sonucu meydana gelen sıcaklık artışı kullanılır. Yani enjeksiyon zamanı benzinli motorlara benzerken, karışımı tutuşturma yöntemi dizel motorlara benzemektedir. Buji ateşlemeli motorlarda, bujinin yakıt-hava karışımını tutuşturması anındaki gibi ani sıcaklık artışı olmaz. Sıkıştırma ateşlemeli motorlardaki üst ölü noktaya yakın, yakıt enjeksiyonuna bağlı olarak, yine ani tutuşma sonucu yüksek sıcaklık artışı olmaz. Dolayısıyla, bu tür motorlarda NO_x ve is emisyonları oldukça düşük miktarda salınmaktadır (şekil 1).

Homojen dolgulu sıkıştırma ateşlemeli motorlar, oldukça yüksek yanma verimi sağlamaktadırlar. Ancak buji ve sıkıştırma sonuna yakın yakıt enjeksiyonu olmamasından dolayı motorun kontrolü zorlaşmaktadır. Motorun vuruntulu çalışması ve tekleme gibi sorunların üstesinden en uygun karışımın teşkili ile gelinebilir. Hava-yakıt oranının en uygun şekilde silindir içine verilmesi gerektiği gibi, supap zamanlamaları da en optimum değerler garanti edilmesi gerekmektedir. Bu tür motorların, en yüksek verimde çalışması için oldukça fazla çalışma yapılmaktadır. Yapılan çalışmalardan bir kısmı aşağı sunulacaktır [6-12];

Fiveland ve Assanis homojen dolgulu sıkıştırma-ateşlemeli (HCCI) dört zamanlı bir motorun yanma ve performans çalışmaları için bir simülasyon geliştirmişlerdir. Yanma, bir kinetik mekanizma ile tanımlanmıştır. CHEMKIN kütüphanesi, gaz değişimi, türbülans ve ısı transferi modellerini içeren, bir motor simülasyonuna entegrasyon için uygun bir kimyasal kinetik çözücü formüle etmek için kullanmışlardır. Çalışmalarında, HCCI motor süreçlerinin fiziksel modellerle birleştirilmesinin önemini göstermektedirler [8]. Tian ve diğ. HCCI motoru daha efektif kullanmak için, çok modlu yanma stratejisini geliştirmişlerdir. Orta ve düşük yükler için HCCI yanma modu kullanılmasını, yüksek yük ve hızlar için buji ateşlemeli modu kullanılmasını önermektedirler. Kam profili buji ateşlemeli mod için supap bindirmesi uygularken, HCCI modda negatif supap bindirmesi uygulamaktadırlar. Gaz keleşi konumunun HCCI yanması üzerindeki etkisini dikkatlice inceleyerek, yanma modu anahtarı bir motor döngüsünde gerçekleştirmişlerdir. Tüm süreçte, vuruntu ve tekleme gibi herhangi bir anormal yanma olmamasını garanti etmek çalışmanın amacını oluşturmaktaydı [9].



Şekil 1. İçten yanmalı motor türleri [10]

Song ve Edwards HCCI motorunun düşük yük çalışma sınırını arttırmak amacıyla negatif supap bindirmesi yöntemini çalışmışlardır. Sıkıştırma oranı, pilot enjeksiyon zamanlaması ve pilot enjeksiyon miktarının optimize edilmesi üzerine deneysel çalışmalar yapmışlardır. Sıkıştırma oranı optimum değeriyle düşük yük çalışma bölgesi genişleyebileceğini tespit etmişlerdir. Daha yüksek sıkıştırma oranı, daha ileri ana yanma zamanlaması ile sonuçlanır ve daha stabil yanma getirir. Pilot enjeksiyon zamanlaması değişimi ise daha iyi kontrol edilebilirlik sağladığını görmüşlerdir. Çalışmalarında, eşdeğerlik oranı 0.95, negatif valf üst üste binmesi sırasında oksijen eksikliğinden kaynaklanan en sınırlı düşük yük operasyonunu gösterirken, 0.85 eşdeğerlik oranı ise test edilen üç eşdeğerlik oranı arasında en geniş düşük yük çalışma aralığını göstermiştir [11]. Çınar ve Uyumaz, benzinli HCCI bir motor için kam tasarımı ve üretimi üzerine çalışmışlardır. HCCI yanma karakteristiğine uygun olarak, 124 derece açık kalma süresi ve 3.5-7.5 arasında kalkma yüksekliğine sahip kamlar tasarlanmışlardır. Kam geometrik modelleri, dairesel yay eğrisi kullanılarak, fourier serisi ile ekstrapole ile

eşitlikler kurularak çıkartılmıştır. Kullandıkları yöntem, klasik spline fonksiyonları ile üretilen kam profiline kıyasla, yüksek supap kalkma miktarlarında bile, kamın iticiye tek noktadan temas özelliğini yitirmediği tespit edilirken, sürtünme ve atalet kuvvetlerinin azaldığı görülmüştür [12]. Ma ve diğ. HCCI motoru için çok amaçlı evrimsel algoritma tabanlı optimizasyon çalışması yürütmüşlerdir. HCCI motorunun optimizasyon performansı, HCCI motoru Simulink modeli ve Pareto Evrimsel Algoritma (SPEA2) yöntemleri ile temsil edilmiştir. Motor, 1500-2250 rpm hızlar ve 3-4.5 arası indike basınçlar ile doğrulanmıştır. Model, HCCI motorunun belirtilen özgül yakıt tüketimini ve HC emisyonlarını iyi bir doğrulukla simüle edebilecek kapasitededir. HCCI motorunun emme supabı açılma zamanlaması, egzoz supabı kapatma zamanlaması ve hava-yakıt oranı motorun aktüatör ayarlarını oluşturur. Yaptıkları deneysel ve simülasyon yöntemleri göstermektedir ki, çok amaçlı evrimsel algoritma HCCI motorun aktüatörünün optimum değerlerini tespit edebilmektedir. Bunu çok hızlı ve yüksek doğrulukta gerçekleştirebilmektedir [13]. Hunicz ve diğ. değişken supap zamanlaması ve değişken supap bindirmesiyle yakıt verimliliği sağlayan, bir HCCI motor geliştirmeyi amaçlamışlardır. Tasarlanan motorun, yüksek yük aralıklarında çalışabileceği ön görülmüştür. Araştırmalarında, motorda egzoz supap zamanlaması geciktirmesi, dolgu basıncı ayarlaması ve kullanılan yakıtın azaltılması yöntemlerini denemişlerdir. Supap zamanlamasının geciktirilmesi iyi bir çözüm olduğunu rapor etmişlerdir. Yakıtın %50 yandığı hacim ve yanma süresi iki kritik değişken olarak, kontrol için kullanılacak parametreler olduğunu tespit etmişlerdir [14].

Yukarıda sunulan literatür çalışmasından da anlaşılacağı üzere, HCCI motorlar yüksek verimleri ve düşük emisyon değerleri dolayısıyla büyük gelecek vaat etmektedirler. Ancak bu tür motorların hava-yakıt oranı ve supap zamanlamaları iyi bir şekilde kontrol edilmelidir ki; vuruntu, gürültü ve tekleme gibi olumsuz durumlar olmadan motor stabil olarak çalışabilmelidirler. Bunun için, bir boyutlu yanma modelleri kullanılarak, motorun bütünsel, gerçekçi modelini oluşturularak, çok amaçlı genetik algoritma yöntemiyle HCCI motor parametreleri optimize edilmelidir. Bu yöntem ile deneysel çalışma ile çok mümkün olamayacak, yüzlerce farklı kombinasyon üretilip, simüle edilerek, sonuçlar arasından en uygun sonuç seçilebilecektir.

II. MATERYAL VE METOT

Test motoru olarak, Caterpillar® SCOTE 3401 motoru kullanılmıştır. Test motoru, tek silindirli ve 2.44 litre hacme sahiptir (Tablo 1). Homojen dolgulu sıkıştırma ateşlemeli prensibi ile çalışarak, yakıt olarak dizel kullanılmaktadır. Bu motor bütün parametreleri ile, supaplar, enjektör ve silindirle beraber bir boyutlu olarak, GT-Suite programı kullanılarak modellenmiştir

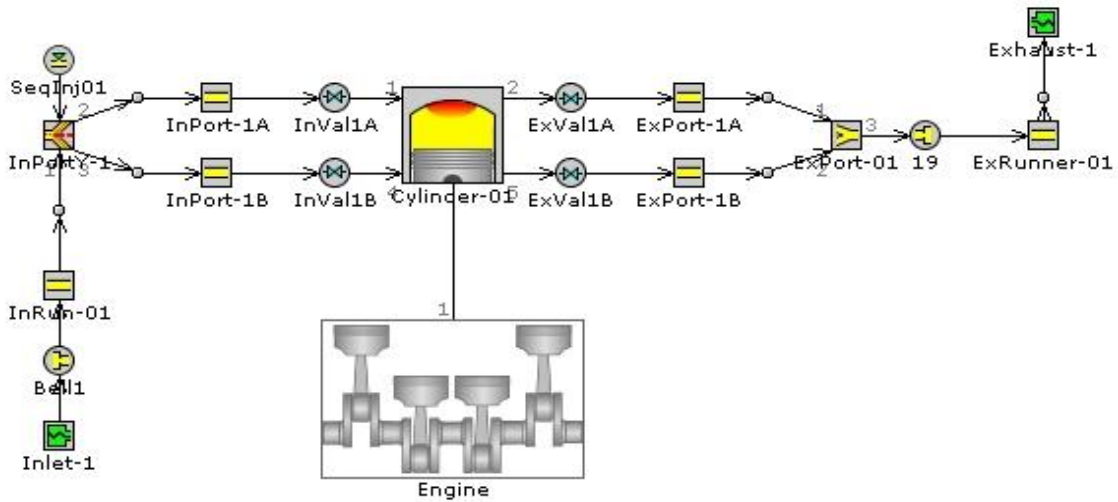
[15]. Yakıt enjeksiyonu, emme safhası sırasında, port enjeksiyon olarak çalışmaktadır (şekil 2). Motorda 2 emme ve 2 egzoz olmak üzere, 4 supap bulunmaktadır. Modelde, HCCI yanma için geliştirilen, reaksiyon mekanizması, silindir içi yanmayı modellemek için kullanılmıştır [16]. Kullanılan reaksiyon mekanizması 29 tür ve 52 reaksiyon içermektedir ve deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır.

Test motorunun kurulan gerçekçi bir boyutlu modeliyle, optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Optimize edilmesi amaçlanan egzoz ve emme supap profilleri, HCCI yanma için en iyi duruma getirilecektir. Bunun için, en gelişmiş ve güçlü yöntem olan genetik algoritma yöntemi tercih edilmiştir. Birçok bağımsız değişkenden, bir veya birden fazla kısıtlamanın varlığından ve doğrusal olmayan özelliklerden kaynaklanabilecek, orta ve yüksek karmaşıklığa sahip tüm problemler için tavsiye edilen bir yöntemdir. Java bazlı çoklu amaçlı evrimsel algoritma çerçevesinde NSGA-III genetik algoritma yöntemi çalışmanın optimizasyon kısmında

kullanılmıştır [17,18]. Şekil 3 yöntemin çalışmasını şematik olarak göstermektedir.

Tablo 1. Test motorunun özellikleri

Çap / Strok [mm]	137.2 / 165.1
Biyel kolu uzunluğu [mm]	261.6
Silindir hacmi [l]	2.44
Silindir sayısı	1
Sıkıştırma oranı	16.1
Emme supabı kapanma [° KA]	-115
Egzoz supabı açılma [° KA]	+139
Emme supabı açılma [° KA]	+342
Egzoz supabı kapanma [° KA]	+400

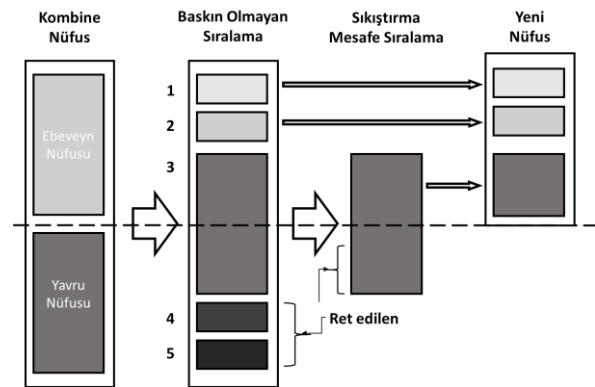


Şekil 2. Homojen dolgu sıkıştırma ateşlemeli motorun bir boyutlu GT-Suite modeli

Motorun emme supabı açılma zamanlaması, egzoz supabı açılma zamanlaması, egzoz supabı bekleme süresi, emme supabı bekleme süresi, volümetrik verimi ve fren gücünü maksimize etmek üzere optimize edilmiştir. Emme supabı açılma zamanlaması için 190 derece ile 250 derece arasında, egzoz supabı açılma zamanlaması için ise 90 derece ile 160 derece arasında oldukça geniş aralıkta en uygun zaman tespit edilmeye çalışılmıştır. Ayrıca egzoz ve emme supabı bekleme süresi olarak 1 derece ile 10 derece arası bir aralık taranmıştır. Değişkenler birbirine bağımlı olarak düşünülmüştür.

Genetik algoritma yönteminde, popülasyon sayısı 20 ve nesil sayısı 16 olarak belirlenmiştir. Sonuca ulaşmak için toplamda 320 iterasyon yapılmıştır. İterasyonlar ilerlerken ortalama indike basınç (OİB), silindir içi maksimum basınç, verim, yakıtın yanma süresi, özgül

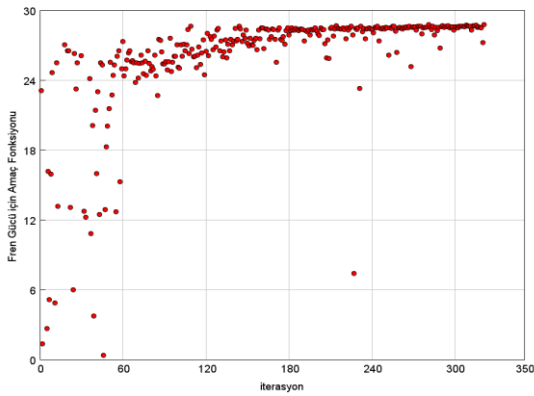
yakıt tüketimi (ÖYT), tork ve güç gibi motor parametreleri kontrol edilmiştir.



Şekil 3. NSGA Genetik algoritma yönteminin şematik gösterimi

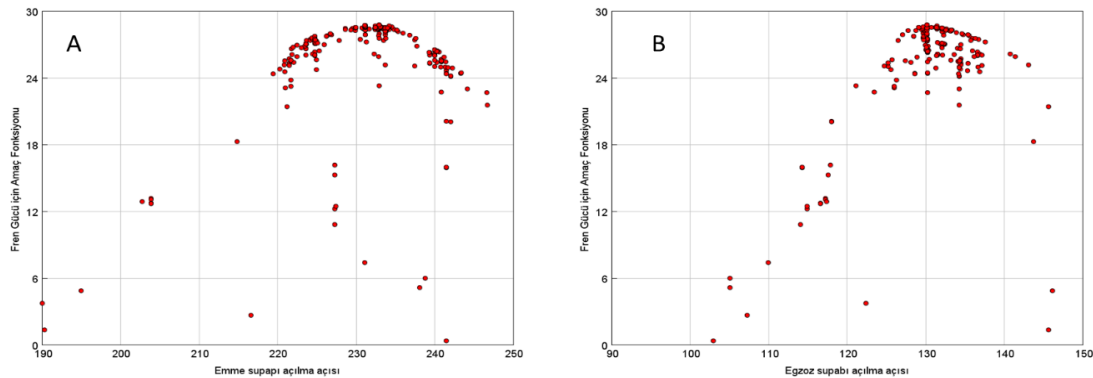
III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Homojen dolgulu sıkıştırma ateşlemeli motorlarda yanmanın kontrol edilmesi kritik önem taşımaktadır. Bunun için en uygun karışım teşkili supapların en doğru zamanlarda açılıp kapanması ve eğrinin karakteristiğine bağlıdır. Çünkü yakıt enjeksiyonu emme zamanında gerçekleşerek, supaplar vasıtasıyla karışım silindir içine alınmaktadır. Dolayısıyla en yüksek volümetrik verim elde etmek ve en yüksek güç değerini ve en düşük ÖYT değerini elde etmek için optimizasyon çalışması yürütülmüştür. Bu çalışmalarda toplam 321 farklı durum genetik algoritma yöntemi ile türetilmiş ve model ile çözülmüştür. Çözülen iterasyonlara bağlı fren gücü amaç fonksiyonunun değişimi şekil 4'te görülmektedir. İterasyonlar ilerlerken, farklı parametreler denenerek, yaklaşık 180 civarı iterasyonda maksimum gücü verecek parametreler elde edildiği görülmektedir.



Şekil 4. Fren gücü amaç fonksiyonunun iterasyonlara bağlı değişimi

Fren gücü amaç fonksiyonunun emme supabı açılma açısı, egzoz supabı açılma açısı, emme supabı bekleme zamanı, egzoz supabı bekleme zamanı değişimine bağlı olarak aldığı değerler şekil 5 ve 6'da verilmiştir. Fren gücü amaç fonksiyonunun en yüksek olduğu aralık değeri, emme supabı açılma açısı 220 ile 240 derece arasında olduğu değerde meydana gelirken, egzoz supabı açılma açısı 125 ile 135 derece arasında meydana gelmektedir (şekil 5). Ayrıca emme supabı bekleme zamanı 1 ile 5 arasında ve egzoz supabı bekleme zamanı 5 ile 8 derece arasında fren gücü amaç



Şekil 5. Fren gücü amaç fonksiyonunun a) emme supabı b) egzoz supabı açılma zamanına bağlı değişimi

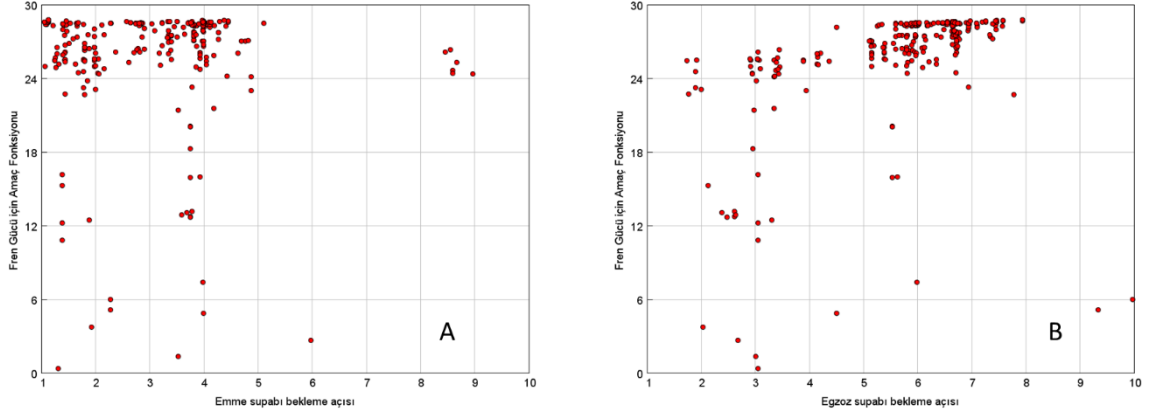
fonksiyonu maksimize olmaktadır (şekil 6). Genetik algoritma bu aralıklarda çözümleri sıkılaştırarak, daha hassas sonuç vermiştir.

Esasen volümetrik verime bağlı olarak güç artışı gerçekleşmiştir. Buna göre şekil 7 ve 8'deki değerler motor gücü ile doğru orantılıdır. Emme supabı 230 derece açılma açısı civarında ve egzoz supabı 130 derece civarında, volümetrik verim %85'in üzerine çıkmaktadır.

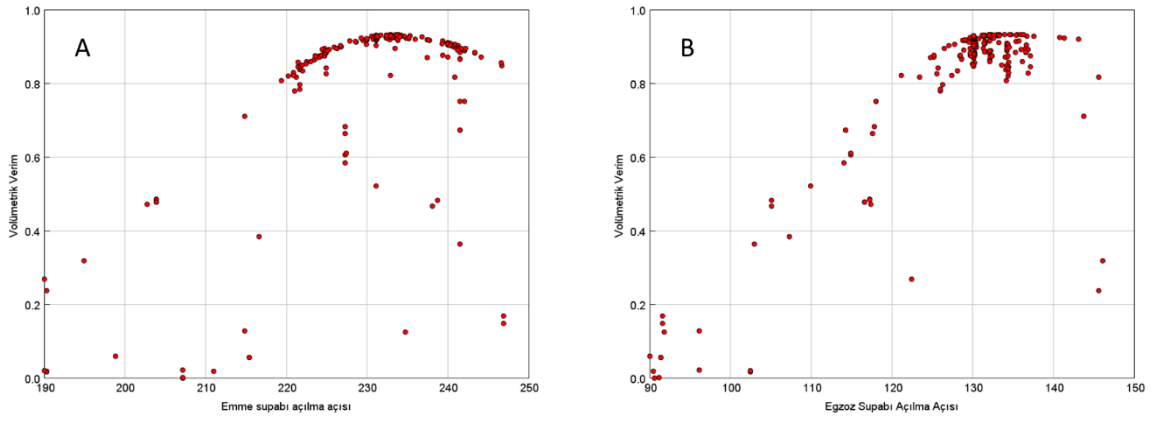
Volümetrik verim, emme supabı bekleme zamanı 1 ile 4 derece arasında ve egzoz supabı bekleme zamanı 5 ile 8 derece arasında maksimum değeri almaktadır (şekil 8). Bu kritik değer üstünde volümetrik verim oldukça düşmektedir. Aynı zamanda bekleme zamanları ile emme ve egzoz açılma kapanma zamanları da genetik algoritma tarafından değiştirildiğinden, birbirlerine bağlı etkileri de görülmektedir. Dolayısıyla, bekleme açıları supap bindirmesini uzatabilmektedir ve alınan taze havanın egzozdan atılması meydana gelebilir. Böylelikle optimum değer bütün değerlerin kombinasyonu olarak seçilmektedir. Kullanılan yöntem buna izin vermektedir.

HCCI yanma stratejisinde, emme supabı daha az bekleme zamanına ihtiyaç duyarken, egzoz supabı için bu değer daha uzun olması volümetrik verimi maksimize etmektedir. Optimum değer seçilirken egzoz supabına daha uzun bekleme süresi eklenmiştir.

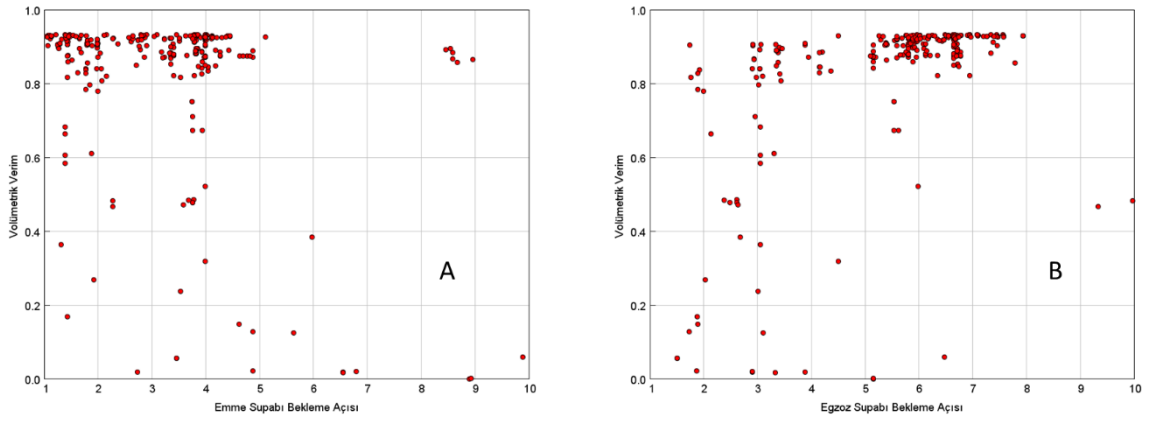
Volümetrik verim artışı ve fren gücü artışı ile özgül yakıt tüketimi değeri minimize olmaktadır (şekil 9 ve 10). Emme supabı açılma açısı, egzoz supabı açılma açısı, emme supabı bekleme zamanı, egzoz supabı bekleme zamanı volümetrik verimin ve fren gücünün maksimize olduğu aralıkta ÖYT değeri minimize olmaktadır. Benzer durum motor tork değeri için de geçerlidir. Tork değeri güç ile orantılı olarak, girilen parametrelere bağlı olarak maksimum değeri almaktadır (şekil 11 ve 12). Bu durum parametre seçim işimizi kolaylaştırmaktadır. Amacımızı oluşturan, güç, tork ve volümetrik verimin maksimize edilmesi, ÖYT değerinin minimize edilmesi; benzer girdi parametreleri ile sağlanmaktadır.



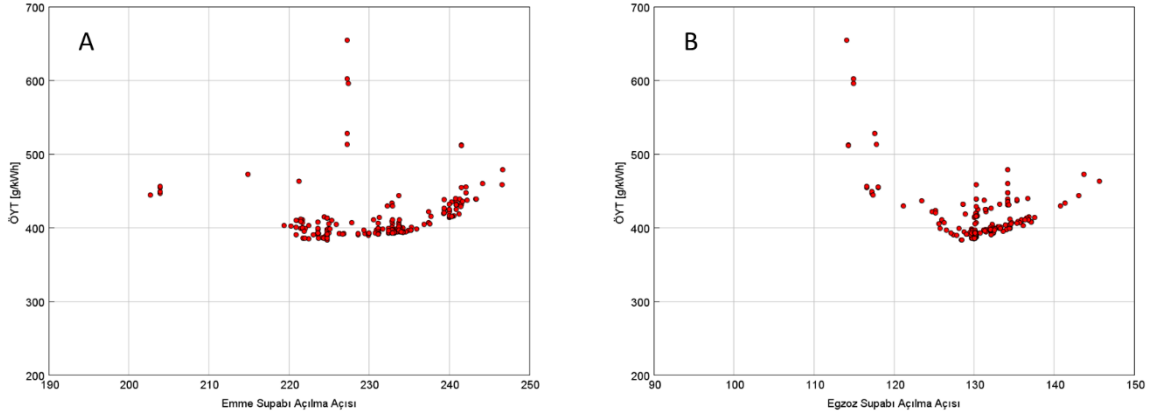
Şekil 6. Fren gücü amaç fonksiyonunun a) emme supabı b) egzoz supabı bekleme açısına bağlı değişimi



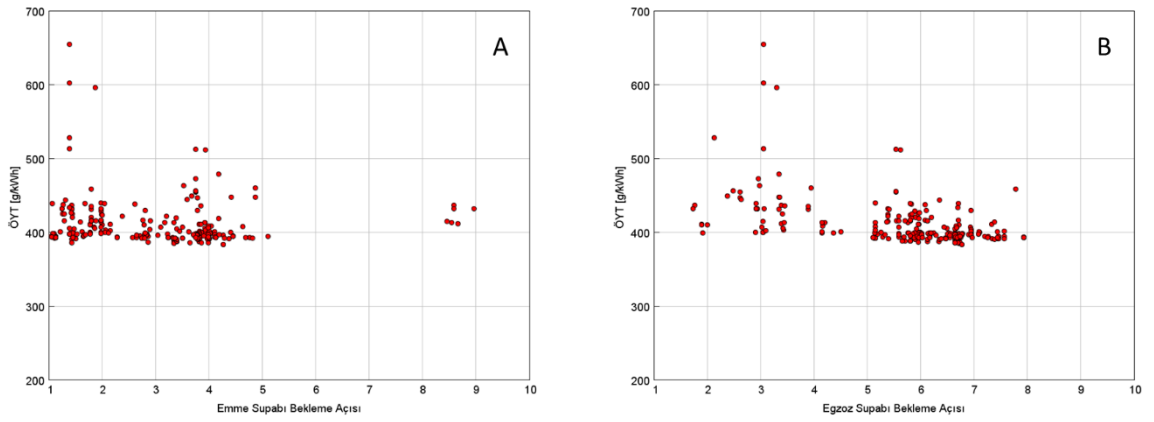
Şekil 7. Volümetrik verimin a) emme supabı b) egzoz supabı açılma zamanına bağlı değişimi



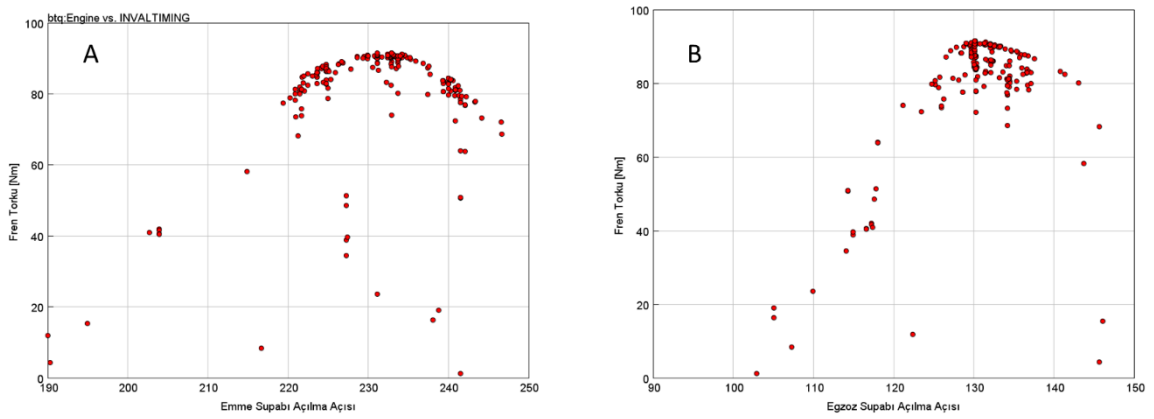
Şekil 8. Volümetrik verimin a) emme supabı b) egzoz supabı bekleme açısına bağlı değişimi



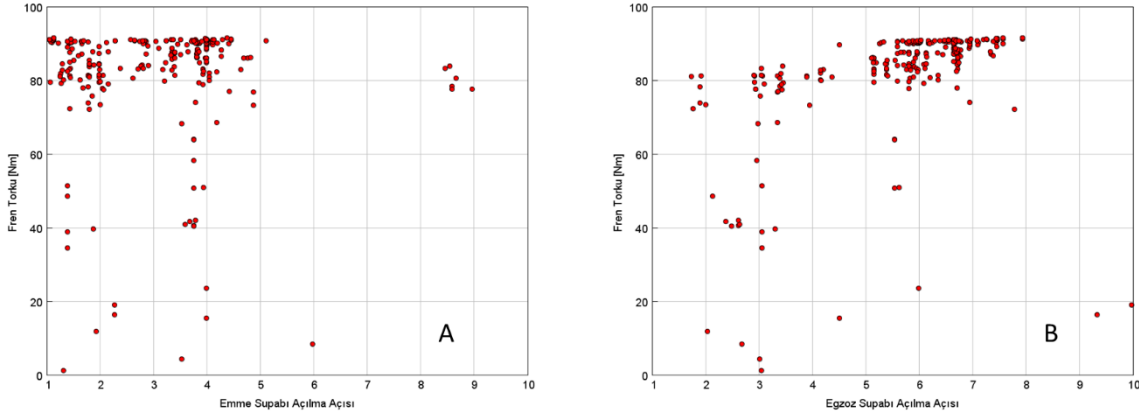
Şekil 9. ÖYT değerinin a) emme supabı b) egzoz supabı açılma zamanına bağlı değişimi



Şekil 10. ÖYT değerinin a) emme supabı b) egzoz supabı bekleme açısına bağlı değişimi

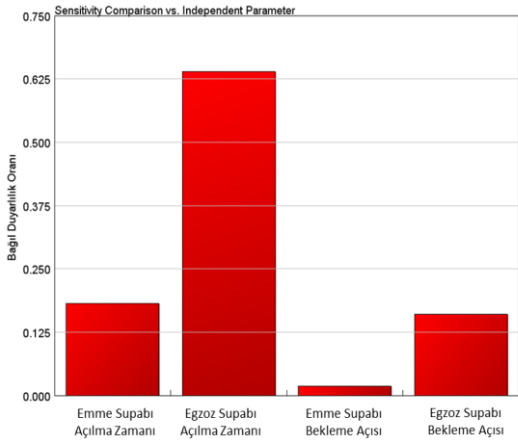


Şekil 11. Fren tork değerinin a) emme supabı b) egzoz supabı açılma zamanına bağlı değişimi



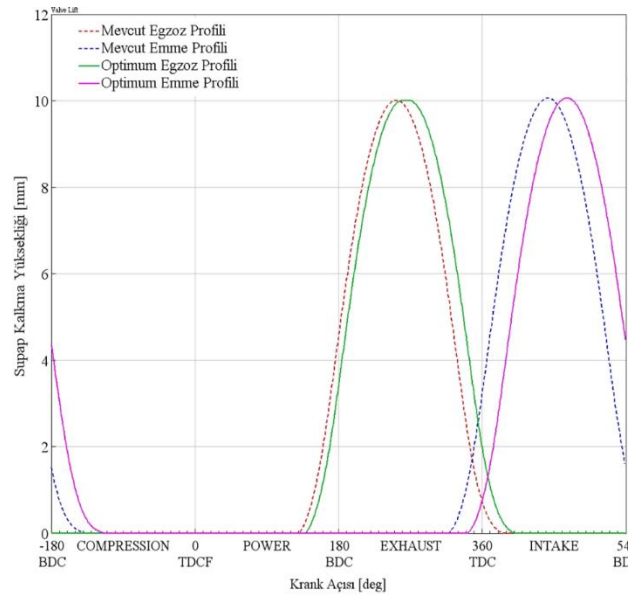
Şekil 12. Fren tork değerinin a) emme supabı b) egzoz supabı bekleme açısına bağlı değişimi

Optimizasyon için seçilen emme supabı açılma açısı, egzoz supabı açılma açısı, emme supabı bekleme zamanı, egzoz supabı bekleme zamanı parametreleri farklı duyarlılık oranı ile amaç fonksiyonuna etki etmektedir (şekil 13). Egzoz supabı açılma açısı, %63 gibi bir oranla amaç fonksiyonuna büyük oranda etki eden parametreyken, emme supabı bekleme zamanı amaç fonksiyonuna %2'lik gibi az bir oranda etki etmektedir.



Şekil 13. Optimizasyon parametrelerinin bağlı duyarlılık oranı

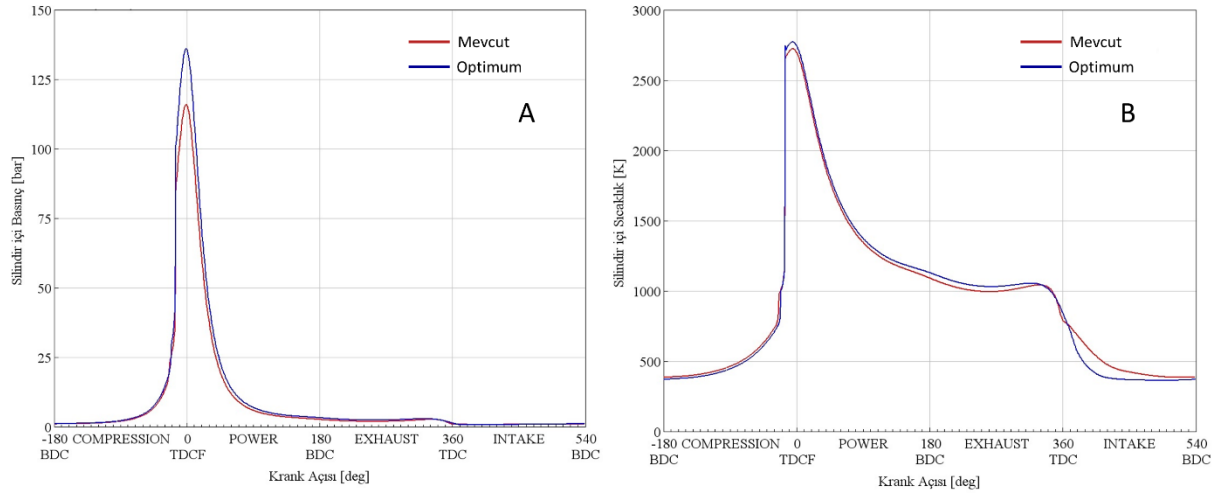
Gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasıyla, optimum emme ve egzoz profili ortaya çıkmıştır. Emme supabı açılma açısı 221 derece, egzoz supabı açılma açısı 130 derece, emme supabı bekleme zamanı 1 derece, egzoz supabı bekleme zamanı 8 derece olarak seçilmiştir. Buna göre oluşan optimum emme ve egzoz supap profili, mevcutla mukayeseli olarak şekil 14'te verilmiştir. Kesikli çizgiler mevcut supap zamanlarını gösterirken, kesintisiz çizgiler optimize edilmiş supap profilini göstermektedir. Optimum durumda supap açık kalma süreleri uzamıştır ve açılma-kapanma zamanları grafikte sağa kaymıştır. Ayrıca optimum durumda supap bindirmesi daha azdır.



Şekil 14. Mevcut ve Optimum durumda supap profilleri

Mevcut ve Optimum durumda silindir içi basınç ve sıcaklık değerleri şekil 15'te gösterilmektedir. Optimum supap profiliyle oluşan silindir içi basınç ve sıcaklık yükselmektedir. Bu durum istenilen bir durum olmamakla birlikte, hava-yakıt oranı kontrolüyle bu değerler düşürülebilir. Ayrıca optimum durumdaki %28.4 değerindeki güç artışı çok önemli bir sonuçtur. Aynı gücü verecek şekilde hava-yakıt karışımı ayarlanırsa silindir içi basınç ve sıcaklık da düşecektir.

Optimum supap profili ile güç ve tork değerinde %28.4'lük artış gerçekleşmiştir, fren gücü 28.9 kW'a çıkarken, Fren torku 92.1 Nm'ye yükselmiştir. Ayrıca ÖYT değeri %6 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Yeni supap profili, hava dolgusunu oldukça verimli gerçekleştirdiği, %21.2'lik volümetrik artışla görülmektedir (Tablo 2).



Şekil 15. Mevcut ve Optimum durumda silindir içi a) basınç ve b) sıcaklık değerleri

Tablo 2. Optimizasyon sonrası motor performans değerlerindeki değişim

	Mevcut	Optimum	Yüzde değişim
Fren Gücü [kW]	22.5	28.9	28.4%
Fren Torku [Nm]	71.7	92.1	28.4%
OEB [bar]	6.17	7.34	19.0%
ÖYT [g/kWsa]	414.3	389.5	-6.0%
Volümetrik verim [%]	71.2	86.3	21.2%
Hava-yakıt oranı	19.6	19.6	0.0%
Fren verimi [%]	19.3	20.6	6.7%
Emme basıncı [bar]	1.005	1.001	-0.4%
Emme sıcaklığı [K]	362	322	-11.0%
Egzoz basıncı [bar]	1.185	1.278	7.8%
Egzoz sıcaklığı [K]	989	1009	2.0%

IV. SONUÇ VE ÖNERİLER

Homojen dolgu sıkıştırma ateşlemeli motorlar yüksek verimi ve düşük egzoz emisyonlarıyla içten yanmalı motorların kullanımına önemli bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Bu tür motorların geniş devir ve yük aralığında çalışması için motor parametrelerinin optimize edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada HCCI türü motorlar için, en uygun profilin tasarlanması ve uygun metodolojinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Motorun gerçekçi bir modeli oluşturularak, değişen supap parametrelerine göre, performans değerlerindeki değişim gözlemlenmiştir. NSGA-III genetik algoritma kodu ile 320 farklı parametre kombinasyonu oluşturularak ve GT-Suite modeliyle simüle edilerek, amaç fonksiyonunu maksimize eden, en uygun parametreler elde edilmiştir. Uygun supap profiliyle %20'den fazla volümetrik verim artışı gözlemlenmektedir. Güç, tork değerleri de %28 civarında artarak, ÖYT değerinde %6 azalma gözlemlenmiştir. Dolayısıyla bu tür motorların daha

verimli ve sorunsuz çalışabilmesi için en uygun profilin oluşturulması kritik öneme sahiptir.

Gelecek çalışmalarda, bulunan en uygun supap profili kullanılarak, farklı devir ve yük aralığında çalışmalar yapılacaktır. Farklı devir ve yükler için, supap profili optimizasyonu yapılarak geniş çalışma aralığında değişken supap profilleriyle maksimum verimle çalışma sağlanacaktır. Ayrıca sıkıştırma oranı gibi motor parametreleri için optimum değerler bulunmalıdır. Sadece verimi arttırmak için değil aynı zamanda vuruntusuz ve gürültüsüz çalışması da önemlidir. Bunun için optimum sonuçlar için basınç artış oranı ve maksimum basıncın olduğu krank açıları da göz önüne alınmalıdır. Bu sonuçlar, CFD ve deneysel yöntemlerle tekrar gözden geçirilerek, HCCI motorun geniş bir aralıkta optimum çalışma şartlarında çalışması garanti edilmelidir. Böylelikle HCCI stratejisinden en yüksek verimle faydalanılabilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] Nilsen CW., Biles DE., & Mueller CJ., (2019). Using Ducted Fuel Injection to Attenuate Soot Formation in a Mixing-Controlled Compression Ignition Engine. *SAE International Journal of Engines*, 12(3), 309–322.
- [2] Sener R., Yangaz MU., & Gul MZ., (2020). Effects of injection strategy and combustion chamber modification on a single-cylinder diesel engine. *Fuel*, 266, 117122.
- [3] Chen Y., Li X., Li X., Zhao W., & Liu F., (2019). The wall-flow-guided and interferential interactions of the lateral swirl combustion system for improving the fuel/air mixing and combustion performance in DI diesel engines. *Energy*, 166(1), 690–700.
- [4] Chaudhari VD., & Deshmukh D., (2020). Diesel and diesel-gasoline fuelled premixed low temperature combustion (LTC) engine mode for clean combustion. *Fuel*, 266, 116982.
- [5] Koten H., & Gül Z., (2014). Multidimensional Modeling of Compressed Biogas Engine for Ultra Low Emission. *Marmara Fen Bilimleri Dergisi*, 26(2), 41–49.
- [6] Sayın C., Şenbahçe A., & Temür M., (2014). Alkol Yakıtların Buji Ateşlemeli Motorlarda Kullanımının Performans ve Emisyonlara Etkisinin İncelenmesi. *Marmara Fen Bilimleri Dergisi*, 26(1), 20–29.
- [7] Anarghya A., Rao N., Nayak N., Tirpude AR., Harshith DN., & Samarth BR., (2018). Optimized ANN-GA and experimental analysis of the performance and combustion characteristics of HCCI engine. *Applied Thermal Engineering*, 132(1), 841–868.
- [8] Fiveland SB., & Assanis DN., (2000). A four-stroke homogeneous charge compression ignition engine simulation for combustion and performance studies. *SAE transactions*, 109(3), 452–468.
- [9] Tian G., Wang Z., Ge Q., Wang J., & Shuai S., (2007). Mode switch of SI-HCCI combustion on a GDI engine. *SAE Technical Paper*, 195(1).
- [10] Hairuddin AA., Wandel AP., & Yusaf T., (2014). An Introduction to a Homogeneous Charge Compression Ignition Engine. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 7(1), 1042–1052.
- [11] Song HH., & Edwards CF., (2008). Optimization of recompression reaction for low-load operation of residual-effected HCCI. *SAE Technical Papers*, 16(1), 776–790.
- [12] Çinar C., & Uyumaz A., (2014). Homojen Dolgulu Sıkıştırma ile Ateşlemeli Bir Benzin Motoru için Kam Tasarımı ve İmalatı. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 29(1), 15–22.
- [13] Ma H., Xu H., Wang J., Schnier T., Neaves B., & Tan C., (2015). Model-Based Multiobjective Evolutionary Algorithm Optimization for HCCI Engines. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 64(9), 4326–4331.
- [14] Hunicz J., Mikulski M., Geca MS., & Rybak A., (2020). An applicable approach to mitigate pressure rise rate in an HCCI engine with negative valve overlap. *Applied Energy*, 257(1), 1–14.
- [15] Gamma Technologies. (2016) GT-Suite Engine Performance Application Manual. Westmont, USA: Gamma Technologies.
- [16] Patel A., Kong SC., & Reitz RD., (2004). Development and validation of a reduced reaction mechanism for HCCI engine simulations. *SAE Technical Paper*, 558(1).
- [17] Hadka D., & Reed P., (2015). Large-scale parallelization of the Borg multiobjective evolutionary algorithm to enhance the management of complex environmental systems. *Environmental Modelling & Software*, 69(1), 353–369.
- [18] Deb K., & Jain H., (2014). An Evolutionary Many-Objective Optimization Algorithm Using Reference-Point-Based Nondominated Sorting Approach, Part I: Solving Problems with Box Constraints. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 18(1), 577–601.

Bitki Doku Kùltürlerinde Sekonder Metabolit Miktarını Arttırmaya Yönelik Uygulamalar

Applications for Improving Secondary Metabolite Production in Plant Tissue Cultures

Neşe ERAY VURAN¹ , Musa TÜRKER² 

¹ Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Fakültesi, Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümü, Van, Türkiye.

² Yıldız Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomühendislik Bölümü, İstanbul, Türkiye.

Öz

Doku kùltürü teknikleri, 1900'lü yılların başında uygulanmaya başlanmış ve bu oldukça ümit verici bulunmuştur. Bitkiden alınan tek bir parçadan yeni bitkilerin çok kısa sürede, arzu edilen sayıda, dış şartlara bağımlı olmaksızın üretilebileceği fikri bilim adamlarını heyecanlandırmıştır. Ancak yapılan çalışmalarda her bitki türü için sistemin optimizasyona gerek duyması, bazı genotiplerin doku kùltüründe iyi cevap verirken bazılarının gelişimlerinin oldukça kısır kalması, yüksek yapılı bitkilerde ise başarının sağlanamaması bilim adamlarını doku kùltürünü farklı amaçlarla kullanma yoluna sevk etmiştir. Bu yollardan biri ve belki de en önemlisi değerli fitokimyasalların doku kùltüründe üretimidir. Doku kùltüründe gelişen bitkiler çevresel şartlarla sınırlandırılmaz ve uygun bir kùltür ortamı sağlanmasıyla istenilen bileşiklerin biyosentezi yapılabilir ve bu bileşiklerin miktarı artırılabilir. Sekonder metabolitlerin doku kùltürü ortamında üretilmesiyle arz talep dengesine dayanan, çevresel etkilerden bağımsız üretim sağlanabilir. Sabit kararlılıkta, belli bir standardı olan maddeler üretilebilir. Doğa tahribatı en aza indirilip, daha az arazi kullanımının gerçekleşmesi sağlanabilir. Yeni sekonder metabolitlerin eldesi mümkün olabilir. Nesli tükenme tehlikesi altındaki türler korunabilir. Bileşenlerin biyosentez yollarının aydınlatılmasında, değiştirilmesinde, sekonder metabolitlerin üretimi ve çeşitli etkenlerle miktar artırılmasında, iyi ürün veren türlerin seleksiyonunda bitki doku kùltürleri umut vaat etmektedir.

Anahtar Kelimeler: Bitki doku kùltürü, Fitokimyasal, Tıbbi bitki, Üretim.

Abstract

Tissue culture techniques which started in the early 1900s were found to be very promising. Scientists were excited about the idea that new plants could be produced from a single piece taken from the plant in a very short time, in the desired number, regardless of external conditions. However, the system needs optimization for each plant species and some genotypes respond well in tissue culture, while the development of some other can be quite slow. Also, the failure to achieve success in higher plants has prompted scientists to use tissue culture for different purposes. One of these ways, and perhaps the most important, is the production of valuable phytochemicals in tissue culture. Plants growing in tissue culture are not limited by environmental conditions, the desired compounds can be biosynthesized, the amount of these compounds can be increased by providing a suitable culture environment. Production based on supply-demand balance and independent of environmental effects can be achieved by tissue culture environment. Substances with constant stability and a certain standard can be produced. Natural destruction can be minimized and less land use can be achieved. It may be possible to obtain new secondary products. The production amount of herbal chemicals whose biosynthesis mechanism and intermediate products are known can be increased. Endangered species can be protected. Plant tissue cultures are promising in the elucidation of the biosynthesis pathways of the components, the production of secondary metabolites and increasing the amount of them by various factors.

Keywords: Plant tissue culture, Secondary metabolite, Medicinal plant, Production.

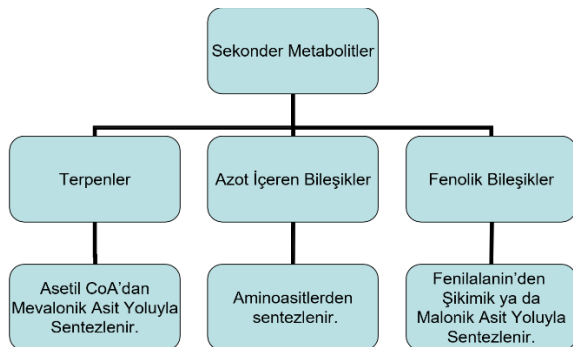
I. GİRİŞ

Modern kimya ve biyolojinin 200 yılında primer metabolitlerin bölünme, büyüme, üretim, depolama, solunum gibi hayati fonksiyonlardaki rolleri aydınlatılmaya çalışılmıştır [1]. Biyoloji bilimine sekonder metabolit konsepti Kossel tarafından kazandırılmıştır [2]. Kossel bu metabolitleri primer metabolitlerin karşıtları olarak betimlemiştir. 30 yıl sonra bu konuda önemli bir adım Czapek tarafından atılmıştır. Czapek bütün çalışmalarını bitki biyokimyası ve özellikle son ürün anlamına gelen "endprodukt" adını verdiği kimyasallarla yürütmüştür. [1]. Czapek 'e göre bu ürünler, deaminasyon gibi sekonder modifikasyonların yapılabildiği nitrojen metabolizmasının ürünleriydi [3]. Ana moleküllere oranla sekonder ürünler sıklıkla toplam karbonun %1'inden az olmak üzere bitkide oldukça düşük oranda bulunmaları ve belli doku ve organlarda üretilmeleriyle karakterize edilirler. 20. yüzyılın ortalarında kromatografi gibi analitik tekniklerin yaygınlaşması ile sürekli yeni kimyasallar tanımlanmış, bu durum bitki biyokimyası disiplininin temellerinin atılmasını sağlamıştır [1].

İnsanlar çağlardan beri bitkileri çeşitli amaçlarla kullanmaktadır. Karbonhidrat, protein, yağ gibi primer metabolit ihtiyaçları bitkilerden karşılanmaktadır. İnsanlar için büyük önemi olan bu primer metabolitlerin yanında, bitkide transport, enerji, büyüme ve farklılaşma olaylarında doğrudan rolü olmayan, ancak bulunduğu bitkinin sosyal iletişimini sağlayan birtakım maddeler bulunur. Bu maddelere sekonder metabolit denir. Sekonder metabolitler bitkinin bulunduğu çevreye uyum sağlamasını, çevresinin farkında olmasını sağlayan kimyasallardır. Bitkilerde sekonder metabolitlerin, kuraklık, tuzluluk, UV gibi çevresel stres faktörlerine karşı koyma, herbivorlara, mikroorganizmalara karşı bitkiyi koruma, polinasyon ve tohum dağılımı gibi önemli ekolojik işlevleri vardır [4].

Biyokimyasal tekniklerdeki ve moleküler biyolojideki gelişmeler sayesinde, açık şekilde gösterilmiştir ki, sekonder metabolitlerin bitkilerin buldukları çevreye adaptasyonunda hayati rolleri vardır. Bitkinin bulunduğu ekosistemiyle etkileşimi bu bileşiklerce sağlanır. Sekonder metabolitler, antibakteriyel, antiviral antifungal etkileri gösterilmiş bileşiklerdir ve bu onların buldukları bitkiyi de patojenlere karşı koruduğunun kanıtıdır. Bazen bu kimyasallar çimlenmeyi engelleyici, toksik etki göstererek diğer bitkilerin gelişimleri üzerine allelopatik etkiler de gösterebilirler [1]. Aynı zamanda, bu kimyasalların UV absorpsiyonu yapan çeşitleri vardır ki; yaprakları ışığın zararlı etkilerine karşı korurlar [5].

Bitki sekonder metabolit genellikle biyosentetik üretim yollarına göre sınıflandırılırlar [6]. Bu yollara göre sekonder metabolitler; fenolik bileşikler, terpenler ve alkaloidler olmak üzere üç ana aile içinde sınıflandırılırlar (Şekil 1). En geniş grup fenolik bileşiklerdir. Alkaloidler bitkiler aleminde fenolliklere göre daha seyrek bulunurlar. Bitkilerde miktar ve kompozisyon açısından farklılık gösteren bu kimyasallar, kimyasal taksonomi, kimyasal ekoloji disiplinlerinin doğmasını sağlamıştır [1].



Şekil 1. Bitki sekonder metabolitlerinin sınıflandırılması

Bitki sekonder metabolitlerinin insanlar için önemi, bitkiler için öneminden az değildir. Bu bileşikler insanlar tarafından çeşitli amaçlar için

kullanılmaktadır. Gıda, kozmetik, ziraat, tıp alanlarında bu metabolitlerin çok önemli yararları vardır. Bu alanlardan belki de en önemlisi, insan sağlığı açısından çok önemli olması nedeniyle, tıpta sekonder metabolit kullanımınıdır [4].

İlaç etken maddelerinin elde edildiği bitkilere tıbbi bitkiler denir. Tıbbi bitkilerin birçoğunda farmasötik olarak oldukça aktif sekonder bileşikler mevcuttur. *Betula lenta* L. bitkisi kan seyreltici ve kalp krizine karşı koruma sağlaması sebebiyle tavsiye edilen aspirinin kaynağıdır, *Hypericum perforatum* L. hiperisin, pseudohiperisin, perforin, adiperforin aktif bileşiklerinin kaynağı olan ve antidepresan etki gösteren bir tıbbi bitkidir [1]. Bu bileşiklerin kimyası bilinmeden, varlıkları ortaya konmadan önce insanlar çeşitli hastalıkları tedavi etmede bitkileri kullanmaya başlamıştır. Bu tercih fitoterapi uygulamalarına temel oluşturmuştur [4].

Günümüzde sentetik ürünler insanoğlunu kuşatmış durumdadır. Sentetik maddelerin yan etkilerinin bulunması, bozunma parçalanma sürelerinin uzun olması, bozunma ürünlerinin zehirli olması gibi nedenlerle doğal bitkisel ürünlere talep artmaktadır [4]. Bu yüzden gelişmiş ülkelerde tıbbi bitkilerin tüketimi yaygınlaşmaktadır.

Tıbbi bitki tüketiminin yaygınlaşması başka bir problemi beraberinde getirmektedir. Tıbbi bitkileri yetiştikleri doğal ortamdan toplamak, buldukları habitata zarar vermekte ve genetik çeşitliliği olumsuz etkilemektedir. Bu bitkilerin kültüre alınması gerekmektedir. Büyük ticari şirketler tarım arazilerinin yetersiz oluşu, iş gücünün pahalı olması gibi tamamen ekonomik sebeplerle tıbbi bitkileri izinsiz, kaçak ve kanunsuz olarak doğadan toplama yoluna gitmektedir. Çiftçiler ise ürün verimini bilmediği, ürününü satma garantisi olmadığı, yetiştirme koşulları konusunda yetersiz olduğu tıbbi bitkileri tercih etmektense, kolayca üretilip pazarlayabileceği kültür bitkilerini tercih etmektedir [4]. Bu problem bitki doku kültüründe bu bitkilerin devamlı ve yüksek kaliteli kültürlerinin mikro çoğaltımı ile çözülebilir [7]. Bu noktada bitki doku kültürü çalışmaları, tıbbi bitkilerin soylarının tükenmesinin önlenmesinde ve habitat tahribatının azaltılmasında büyük önem arz etmektedir.

II. BİTKİ DOKU KÜLTÜRLERİNDE SEKONDER METABOLİT MİKTARINI ARTTIRMAYA YÖNELİK UYGULAMALAR

Bitkilerin sahip olduğu biyoüretim kapasiteleri yardımıyla, bitki hücre ve dokularının, mikrobiyal hücrelerdeki fermentasyon işlemine benzer şekilde kullanılabilirliği düşünülmüştür. Bitkilerin sekonder metabolit üretiminin geliştirilmesi için en önemli gereklilik, üretilecek sekonder metabolitlerin biyosentez yollarını anlamaktır. Metabolik yollar hakkında gereken bilgi hala oldukça sınırlıdır.

Metabolik yolaklar hakkındaki bu sınırlı bilgi ticari üretimin önündeki ilk bariyeri oluşturmaktadır. Mikrobiyal hücrelere göre çok büyük olma, kümelenme davranışı gösterme, düşük büyüme oranına sahip olma, karıştırma stresine duyarlı olma gibi bitki hücrelerine ait karakteristik özellikler, kitlesel üretimin yolunu tıkayan bir diğer bariyerdir [8].

Biyologların ve kimya mühendislerinin katkılarıyla, bitki organ ve hücre kültürleri bitkisel ürünlerin geniş ölçekte üretilmelerine imkân sağlamıştır. Biyoreaktörler üzerine yapılan çalışmalar, sürekli bir

şekilde belli kalitede ürün elde edilmesinin önünü açmıştır. Moleküler biyoloji alanındaki çalışmalar sayesinde, hasat edilen ürün oranı arttırılmış, farklı ürünlerin ortaya çıkması sağlanmış, ürün verimi arttırılmıştır. Dahası, yan etkisiz, güvenli ilaçlara olan talep, güvenli olduğu test edilmiş doğal bileşenlerin kullanımını arttırmıştır. Bütün bu faktörler, bitkilerden farmasötiklerin ve besin katkı maddelerinin eldesinin, hem kalite hem miktar anlamında iyileştirilmesi için yeni biyoteknolojik metotların kullanımı üzerinde yoğunlaşılmasını sağlamıştır [9]. Tablo 1.'de bazı önemli fitofarmasötikler gösterilmiştir.

Tablo 1. Bazı önemi bitkisel kaynaklı farmasötikler [9]

Ürün	Kullanım	Bitki türü	Maliyet (US\$)
Ajmalicine	Antihipertansif	<i>Catharanthus roseus</i>	37
Artemisinin	Antimalaryal	<i>Artemisia annua</i>	400
Ajmaline	–	<i>Rauwolfia serpentina</i>	75
Acinitine	–	<i>Aconitum</i> spp.	n/a*
Berberine	Bağırsak rahatsızlığı	<i>Coptis japonica</i>	3250
Camptothecin	Antitümör	<i>Camptotheca acuminata</i>	432
Capsaicin	Kontrairritan	<i>Capsicum frutescens</i>	750
Castanospermine	Glikozid inhibitörü	<i>Castanospermum australe</i>	n/a*
Codeine	Yatıştırıcı	<i>Papaver somniferum</i>	17
Colchicine	Antitümör	<i>Colchium autumnale</i>	35
Digoxin	Kalp uyarıcı	<i>Digitalis lanata</i>	3000
Diosgenin	Steroidal öncü	<i>Dioscorea deltoidea</i>	1000
Ellipticine	Antitümör	<i>Orchrosia elliptica</i>	240
Emetine	–	<i>Cephaelis ipecacuanha</i>	1500
Forskolin	Bronşiyal astım	<i>Coleus forskolii</i>	n/a*
Ginsenosides	Sağlık tonik	<i>Panax ginseng</i>	n/a*
Morphine	Yatıştırıcı	<i>Papaver somniferum</i>	340
Podophyllotoxin	Antitümör	<i>Podophyllum petalum</i>	n/a*
Quinine	Antimalaryal	<i>Cinchona ledgeriana</i>	500
Sanguinarine	Antioplak	<i>Sanguinaria canadensis</i> <i>Papaver somniferum</i>	4,8
Shikonin	Antibakteriyel	<i>Lithospermum erythrorhizon</i>	4500
Taxol	Antikanser	<i>Taxus brevifolia</i>	600
Vincristine	Antilösemik	<i>C. roseus</i>	2,000,000
Vinblastine	Antilösemik	<i>C. roseus</i>	1,000,000

*n/a: Mevcut değil

2.1. Üretici Gücü Yüksek Hatların Taranması ve Seçilmesi

Bu aşama, kitlesel üretim yapılabilmesi için, istenen kimyasalı yüksek miktarda üreten bitkilerin seçimi ile başlar. Yüksek oranda istenen bileşimi üreten çeşitli hücre klonları belirlenir. Bu sayede verimli hücre toplulukları elde edilebilir [9].

Bitki hücre popülasyonlarında biyokimyasal aktivite bakımından var olan heterojenlik yüksek verimli hücreler elde etmeyi sağlayabilir [10]. Klonal seleksiyon ile antosiyanin miktarının artırılması *Daucus carota* L.'da gösterilmiştir [11]. HPLC ve RIA yöntemleri yüksek kapasiteli hücre ırklarının seçiminde kullanılabilir [12, 13]. *Nothapodytes nimmoniana* bitkisinde yaprak, gövde ve kök sırasıyla 0.081, 0.23 ve 0.33–0.77 % kuru ağırlık karnotekin içermektedir [14]. Bu nedenle uygun türün ve tür içinde uygun organın seçimi sekonder metabolit üretiminde oldukça önemlidir.

Mutasyon stratejisi de yüksek verimli hücre hatlarının seçiminde kullanılmıştır. Bu yöntemde, hücrelerin büyük bir çoğunluğu sitotoksik bir maddeye ya da çevresel bir stres etmenine maruz bırakılır. Sadece bu etkene dayanıklı olanlar yaşamını sürdürür [9]. Fanilalaninin bir analogu olan p-florofenilalanin (PFP) fenolik bileşik bakımından yüksek verimli hücre hatlarının taranmasında sıklıkla kullanılır [15]. *Capsicum annuum* L. bitkisinde PFP yardımıyla kapsaisin maddesinin miktarı artırılmıştır [16].

2.2. Ortamın Kimyasal Bileşiminin Düzenlenmesi

Birçok sekonder metabolit yolağı besin miktarı, stres faktörleri, ışık, büyüme düzenleyiciler gibi dış faktörler ile değiştirilebilir. Bu yüzden kültürün kimyasal bileşiminin değiştirilmesi ürün miktarında artışla sonuçlanabilir.

2.2.1. Karbon Kaynağı

Bitki hücre kültürlerinde basit şekerlerin karbon kaynağı ve ozmotik düzenleyici olarak görevleri vardır. *Eschscholzia californica* (Acem Lalesi)'nin süspansiyon kültürlerinde, sukroz konsantrasyonunun %8 oranında artırılması ile benzofenantridin verimi 10 kat artmıştır [17]. Sukrozun farklı konsantrasyonlarda kullanımı ile yaratılan ozmotik stresin, *Vitis vinifera* (Üzüm)'nin süspansiyon kültüründe antosiyanin üretimini etkilediği belirtilmiştir [18]. Sukroz, glikoz ve fruktozun *Artemisia annua* bitkisinin tüylü kök fenotipi oluşturulmuş kültürlerinde artemisin üretimi üzerine etkisi araştırılmış ve glikozun diğer iki şekere göre artemisin üretimini daha çok uyardığı tespit edilmiştir [19].

2.2.2. Nitrat Kaynağı

Nitrojen konsantrasyonu, hücre süspansiyon kültüründe protein yapılı maddelerin ve aminoasitlerin miktarını etkiler. MS, B5 gibi bitki büyüme ortamlarında hem amonyum hem de nitrat nitrojen

kaynağı olarak kullanılır. Bunların birbirine oranları sekonder metabolit miktarını etkileyebilir [9]. *Tanacetum cinerariifolium* L. (Krizantem) bitkisinin kallus kültüründe nitrat stresi uygulamasının, piretrin miktarını iki haftada iki kat arttırdığı tespit edilmiştir. [20].

2.2.3. Fosfat Kaynağı

Fosfat konsantrasyonu kültür ortamında sekonder metabolit üretimini etkileyen bir diğer unsurdur. Fosfatın hücre büyümesini uyardığı ve bu nedenle sekonder metabolit üretiminde olumsuz etkisinin olduğu belirtilmiştir [9]. Azaltılmış fosfat oranının *Catharanthus roseus* (Karanfil) bitkisinde aymalisin, Peganum harmala (Üzerlik) bitkisinde harman alkaloidlerinin üretimini uyardığı gösterilmiştir [21]. Öte yandan, fosfat miktarı MS ortamında iki katına çıkarıldığında *Gymnema sylvestre* hücre kültüründe ginnemik asit miktarında önemli bir artış elde edilmiştir [22].

2.2.4. Büyüme Düzenleyiciler

Bitki büyüme düzenleyicilerin türleri, birbirlerine olan oranları hem büyümeyi hem de bitki hücrelerinin üretkenliğini önemli oranda etkiler [23]. 2,4-D'nin sekonder metabolit üretimini olumsuz etkilediği pek çok çalışma ile gösterilmiştir. 2,4-D'nin ortamdaki alınması ya da NAA ve IAA gibi farklı bir oksin türüyle değiştirilmesi sonucu, *Daucus carota*'nın süspansiyon kültüründe antosiyanin miktarı, *Morinda citrifolia* bitkisinde atrakinonların miktarı artırılmıştır [24, 25]. Bununla birlikte *Daucus carota*'da karotenoid biosentezinin 2,4-D ile uyarıldığı da gösterilmiştir [26]. Sitokininlerin ise sekonder metabolit üretimine etkileri, kullanılan sitokininin çeşidine ve çalışılan bitkiye göre değişmektedir. *Xanthisma gracile* L. bitkisinde kinetin antosiyanin üretimini uyarırken, *Populus* kültüründe antosiyanin üretimini baskılamıştır [26, 27]. 2-izopentiladenin(2-iP) ise *A. annua* bitkisinde artemisin üretimini uyarmıştır [28].

2.2.5. Öncül İlavesi

Bitki hücrelerinde üretilen herhangi bir kimyasalın yolağı net olarak biliniyorsa, bu yolda yer alan bir ara ürünün kültür ortamına verilmesi enzimsel reaksiyonları uyarabilir ve böylece istenilen bileşimin üretimi sağlanabilir. *Vanilla planifolia* kallus kültüründe 1 mM ferulik asitin öncül madde olarak kültürde kullanımı ile vanilin konsantrasyonu 1,7 kat artmıştır [29]. *Nicotiana tabacum* bitkisinde fenilalanin öncül madde olarak kullanılmış ve polifenol miktarı artırılmıştır [30].

2.3. Ortamın Fiziksel Çevresinin Düzenlenmesi

Işık, sıcaklık, pH, oksijen seviyesi gibi çevresel koşullar kültür ortamında gerçekleşen reaksiyonları değiştirebilir ve bu yolla sekonder üretimini etkileyebilirler.

2.3.1. Sıcaklık

Doku kùltürlerinde ortam sıcaklığı genellikle 18- 26°C arasında seçilir, ancak her bitkinin optimum gelişim gösterdiği bir sıcaklık değeri bulunabilir. Tütün hücre kùltürlerinde ubikinon veriminin 32°C 'de optimum olduğu belirtilmiştir [31]. Kùltür sıcaklığını düşürmenin yağ asitlerinin oranında bir artışa sebep olduğu bildirilmiştir [32]. Ginseng'in tüylü kök fenotipi oluşturulmuş kùltürlerinde farklı sıcaklıkların biyokütle üzerine etkisi araştırılmış ve 20-13°C sıcaklıkta en yüksek biyokütleyle ulaşılmıştır [33].

2.3.2. Işık

Işık kalitesi, şiddeti ve periyodu doku kùltüründe kimyasal madde sentezini etkilemektedir. Marticaria chamomilla'nın kallus kùltüründe ışık seskuiterpen üretimini etkilediği rapor edilmiştir [34]. UV ve kızılötesi ışınlar da bir tür ışık kaynağı olarak kullanılabilirler ve yine sekonder metabolit üretimini etkilerler. UV ışığının Vitis vinifera'nın kallus kùltüründe resveratrol bileşiğinin üretimini uyardığı rapor edilmiştir [35]. Melastoma malabathricum bitkisinde ışık antosiyanin üretimi üzerine etkisi araştırılmıştır. 300-600 lx ışık yoğunluğunda antosiyanin birikiminde artış olmuştur, 10 günlük sürekli karanlık sonucu ise pigment miktarı en az bulunmuştur [36].

2.3.3. Ph

Bitki büyüme ortamlarının ph'sı genellikle 5-6 arasında seçilir. Çoğunlukla 5,8 pH kullanılır. Kùltürün gelişimiyle birlikte hidrojen konsantrasyonu değişir. Ipomea hücre kùltüründe triptofanın indol metabolitine dönüşümü ph 6,3'te iki katına çıkmıştır [37]. Withania somnifera tüylü kök fenotipi oluşturulan kùltürlerinde pH 6 iken vitanol üretimi optimum olmuştur [38].

2.3.4. Havalandırma ve Çalkalama

Üretim biyoreaktörler vasıtasıyla geniş ölçekte yapılıyorsa havalandırma ve çalkalamanın kùltür ortamı için önemi büyüktür. Yüksek havalandırma oranının alkaloid üretimini düşürdüğü bildirilmiştir [39]. Kùltür atmosferindeki karbondioksitin monotermen üretimini uyardığı rapor edilmiştir [40]. Bazı durumlarda yüksek oksijen oranının hücreler için toksik olabileceği ve metabolizmayı düşürebileceği belirtilmiştir [41].

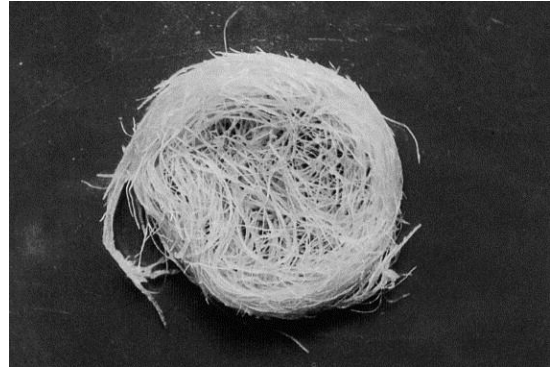
2.4. Kùltür Çeşitleri

Bitki doku kùltürü; aseptik şartlarda, yapay bir besin ortamında bütün bir bitki, hücre, doku veya organ gibi bitki kısımlarından yeni doku bitki veya bitkisel ürünlerin üretilmesidir. Bu amaçla kullanılan bitki parçasına eksplant denir. Eksplant, kök, gövde, yaprak, yaprak sapı, nod, internod olabileceği gibi polen, sepal, petal, ovaryum, anter gibi özel bitki kısımları da olabilir. Teorik olarak bitkide arzu edilen kimyasalı en çok bulunduran organdan eksplant alınıp doku kùltürüne başlanması, sekonder metabolit miktarının artırılmasında başarılı sonuçlar verebilir. Farklılaşmış

kùltür kök, sürgün, embriyo kùltürleridir. Farklılaşmamış kùltürler ise kallus ve hücre süspansiyon kùltürleridir [4].

2.4.1. Kök Kùltürleri

İstenilen bileşik en çok kök organında üretiliyorsa, kökten alınan eksplant ile kùltür başlatılabilir. Kök kùltürlerinin Rhizobium rhizogenes türü toprak grubu bakterileriyle inoküle edilmesi sonucu tüylü kök fenotipi ortaya çıkmaktadır (Şekil 2). Transforme olmuş kökler biyoreaktöre alınıp büyük ölçekte üretim yapılabilir. Tüylü kök fenotipi genetik olarak kararlıdır, hızlı büyüme gösterir, bazı durumlarda dışarıdan oksin ilavesi olmaksızın kùltür devamlılığı sağlanabilir, çoğu zaman inkübasyon ortamında ışığa ihtiyaç duymazlar [9]. Bu avantajlar nedeniyle sekonder metabolit üretiminde transforme kök kùltürleri sıklıkla kullanılmıştır. Solanaceae familyası üyelerinde özellikle Nicotiana ve Datura'da tüylü kök fenotipi ile piridin (nikotin, anatabin) ve tropan (atropin, hiyosiyamin, scopolamin) alkaloidlerinin yüksek oranda üretimi sağlanmıştır [42]. Morinda citrifolia bitkisinin yan kök kùltüründe antrakinin üretimi doğadaki örneklerine göre birkaç kat fazla bulunmuştur [43]. Withania somnifera bitkisinin yaprak eksplantından tüylü kök fenotipleri oluşturulmuş ve vitanol miktarına hem bu kùltür çeşidinin hem de metil jasmonat ve salisilik asit elisitorlerinin etkisi çalışılmıştır [44].



Şekil 2. Cichorium intybus tüylü kök fenotipi

2.4.2. Sürgün Kùltürleri

Doku kùltüründe bitkinin gövdesinden alınan eksplant ile de başlanabilir. Sürgünler köklerde olduğu gibi Rhizobium rhizogenes ile transforme edilebilirler. Mentha piperita bitkisinin Rhizobium rhizogenes ile gen aktarımı yapılmış kùltürlerinde monotermen üretimi araştırılmıştır. Kùltürden gelişen sürgünlerde yaprak üzerinde yağ bezleri tespit edilmiştir [45]. Bacopa monnieri bitkisinin gövde kùltürlerinden rejenere edilen bitkilerin, doğada yetişen örneklerle göre 3 kat daha fazla bakosin A içerdiği gösterilmiştir [46]. Nothapodytes nimmoniana bitkisinin gövde kùltüründen rejenere edilen bitkilerde kampotekin miktarı tarlada yetişen örneklerden daha fazla bulunmuştur [47].

2.4.3. Embriyo Kùltürleri

Embriyoda gelişen ve burada depolanan bir metabolitin üretimi için embriyo kùltürleri kullanılabilir. Somatik embriyogenez ile üretilen embriyolardan sekonder metabolit üretimi yapılabilir. Somatik embriyo kùltürü özellikle lipit gibi depo kimyasallarının üretiminde kullanılır [4]. Haşhaşın embriyo kùltüründe depo lipitleri ve triaçil gliserol birikimi gözlenmiştir [48].

2.4.4. Kallus Kùltürleri

Ana bitkiden alınan eksplant bitki büyüme düzenleyici taşıyan ortamda bir dizi bölünmeler sonucu morfolojik olarak farklılaşmamış hücre grupları meydana getirir. Kallus dokusu her şey olmaya hazır bir dokudur. Devamlılığı alt kùltüre alınmasına bağlıdır. Kitlesel üretim için de uygundur. Kallus dokularının en önemli dezavantajı kùltür süresince genetik kararlılık gösterememeleridir. Kùltürlerde somaklonal varyasyonlar görülebilir ve bu durum metabolit üretimini olumsuz etkileyebilir. Kallusta sekonder metabolit üretiminin rapor edildiği çalışmalar vardır, ancak önemli miktarda metabolit oluşumu herhangi bir organ oluşturmak üzere farklılaşmış kallus dokularında görülmektedir. Farklılaşma ortadan kalkınca sekonder metabolit verimi de önemli oranda düşmektedir [4]. Datura ve Atropa gibi Solanaceae familyası üyelerinde kök oluşturmak üzere farklılaşan kallus kùltürlerinde tropan alkaloidlerinin miktarı artmıştır [42]. Erciş üzüm çeşitleriyle yapılan çalışmada üzüm bitkisinden elde edilen kalluslarda resveratrol üretimi gerçekleştirilmiştir [35].

2.4.5. Hücre Süspansiyon Kùltürleri

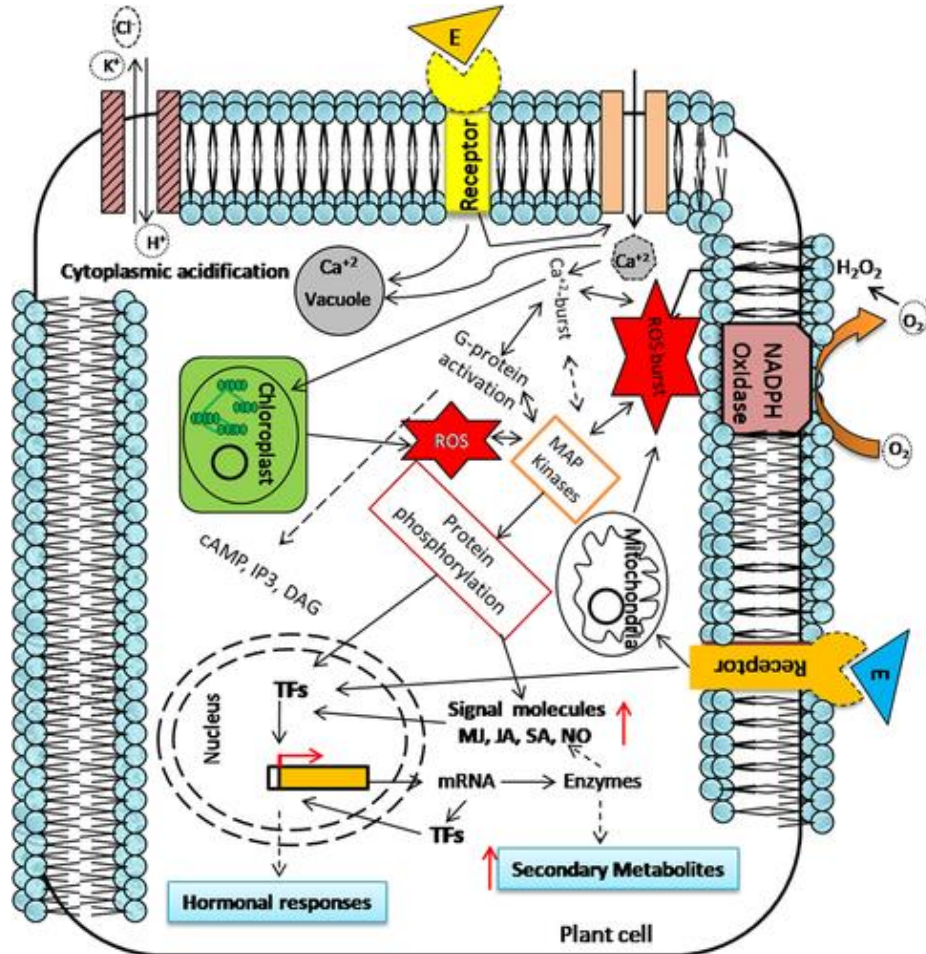
Tek hücrenin ya da küçük hücre gruplarının sıvı kùltürüne hücre süspansiyon kùltürü denir. Hücre süspansiyon kùltürlerinin verimleri sekonder metabolit açısından düşüktür, ancak homojen yapıları, hızlıca üremeleri, biyoreaktör kullanımına uygun olmaları, alt kùltürde değişime uğrama oranlarının düşük olması gibi sebeplerle tercih edilirler. Kùltüre eğer kallustan elde edilen tek hücreyle başlanırsa kùltürün başarı şansı artar [4]. Taxus wallichiana bitkisinde taksol üretimi hücre süspansiyon kùltürlerinde sağlanmıştır [49]. Bazı bitkilerde hücre süspansiyon kùltürlerinde sekonder metabolit ana bitkiye göre daha fazla üretilmiştir. Bunun örneği C. roseus'ta aymalisin ve serpentin birikimidir [50].

2.5. Elisitör Uygulama

Bitki sekonder metabolitleri, stres koşullarına karşı doğal bir savunma mekanizmasının sonucu üretilir.

Bitkiler patojenlerin ürettiği maddelere karşı yeni bileşikler üretirler. Sekonder metabolizmayı uyarıcı maddelere elisitör denir. Elisitörler sinyalleri tetikler ve bu da savunma sistemi bileşiklerinin, yani bizim çeşitli amaçlarla kullandığımız kimyasal bileşiklerin üretimine sebep olur. Elisitörler hücre içinde ya da hücre dışında oluşabilirler. Orijinlerine göre biyotik ya da abiyotik olarak sınıflandırılabilirler [8]. Doku kùltüründe sekonder metabolit üretimi biyotik ve abiyotik stres faktörlerinin etkisi altındadır [51]. Elisitörlerin sinyal yolları aydınlatıldıkça, istenilen sekonder bileşiğin üretimi mümkün hale gelebilecektir. Teoride, bitki sekonder bileşikleri çeşitli stres koşullarına bir reaksiyon olarak üretiliyorsa, bu koşulları sağlandığı yapay bir ortamda da istenilen bileşiği üretmesi gerekmektedir. Elisitör konsantrasyonu, uygulama süresi, hangi aşamada ve hangi kùltür zamanında uygulanacağı sekonder metabolit üretimini başarılı bir şekilde yürütmek için dikkate alınması gereken özelliklerden bazılarıdır [52]. Hypericum hirsutum ve Hypericum maculatum bitkilerinde salisik asit ve jasmonik asit elisitörleri kullanılarak hiperisin üretimi artırılmaya çalışılmıştır. Sonuçta, salisilik asitin jasmonik asite göre hiperisin oluşumunu daha çok uyardığı tespit edilmiştir [53]. Hypericum adenotrichum bitkisinin in vitro yetiştirilen sürgünlerinde mannan ve pektin elisitörlerinin hiperisin üretimine etkisi araştırılmış ve pektinin hiperisin üretimini 2,7 kat, pseudohiperisin üretimini 4,8 kat artırdığı, mannannın hiperisin üretimini 1,7 kat, pseudohiperisin üretimini 2,8 kat artırdığı tespit edilmiştir [54].

Elisitör etkisi haberci Ca²⁺ kanallarının açılması, hücre zarı bütünlüğünü etkileyen faktörler, hücre içi yolların inhibisyonu/aktivasyonu ve ozmotik stresteki değişikliklerle kendini gösterir. Elisitör uygulaması bitkide, hücre dışı ortamdan ya da hücre içi depolardan stoplazmaya Ca²⁺ akışı, protein fosforilasyon mekanizmasında değişiklikler, protein kinaz aktivitesinde artış, mitojenle aktive olan protein kinaz uyarımı, G-protein aktivasyonu H⁺-ATPaz inaktivasyonunun neden olduğu sitoplazma asidifikasyonu, membran polarizasyonundaki azalma ve hücre dışı pH artışı, reaktif oksijen türlerinin oluşumu gibi fizyolojik değişiklikler yaratır (Şekil 3). Sinyal yollarının uyarımı bitkide farklı sekonder metabolitlerin üretimini sağlar. Elisitörlerin hücredeki bu uyarı mekanizmaları birbiriyle bağlantılı ve oldukça kompleks reaksiyonlardır ve halen araştırılmaktadır [55].



Şekil 3. Bitki hücresindeki elisitörün etki mekanizmasının şematik gösterimi [55]

2.6. Geçirgenlik

Çoğu durumda, bitki hücrelerinde üretilen ürünler vakuollerde depolanır. Üretilen maddelerin vakuollerden dışarı salınabilmesi için plazma membranı ve tonoplast olmak üzere iki katlı membran sisteminin aşılması gerekmektedir [9]. Hücre geçirgenliği tek ya da daha fazla membran sisteminde por oluşumuyla mümkündür. Bu porlar vasıtasıyla moleküllerin hücre içinde girişi ya da hücre dışına çıkışı sağlanmış olur. Hücreler arası üretilmiş kimyasalın hücre dışına çıkışı, kitlesel üretim adına belki de en belirgin zorluk olmuştur. Geçirgenlik arttırmak için kullanılan kimyasallar genelde hücre canlılığı üzerine olumsuz etki yapmaktadırlar [8]. İzopropanol, dimetilsülfoksit, kitosan gibi organik maddeler, elektroporasyon, ultrasonikasyon, yüksek basınç gibi yöntemler hücre geçirgenliğini arttırmak için kullanılmıştır. *Taxus wallichiana* L. bitkisinde taksolun hücre dışına salınımını arttırmak için heksadekan, dekanol, dibütilfitalat kullanılmıştır [56].

2.7. İmmobilizasyon

Tutuklama mikroorganizmalarda uzun zamandır kullanılan bir tekniktir. Bu teknikte amaç, katalitik olarak aktif enzim ya da hücrelerin sabit fazda tutunmalarını sağlayıp, likit faza geçişlerinin engellenmesidir. Bitki hücrelerinin bir araya gelme

eğilimlerini bir noktaya kadar karşılayan bu sistemde, ürün hücre dışına salınıyorsa, hasat da büyük ölçüde kolaylaşır. Hücrelerin büyümeleri yavaştır ve bu da sekonder metabolit üretimini uyaran başka bir etmenddir. Ortam koşullarını sağlamak daha kolaydır, biyokütleyi arttırmak daha kolaydır [4]. Bu sistem, biyoreaktörlerde hücre kümelenmesi ve karıştırma stresine karşı geliştirilmiştir [8]. *Morinda citrifolia* bitkisinde aljinat matrikte antraknon üretimi sağlanmışır [57]. *Capsicum* spp. bitkisinde ferulik asit öncülü kullanılarak aljinat matrikste kapsaisin üretimi sağlanmışır [58].

2.8. Biyodönüşüm

Biyodönüşüm, bir bileşiğin fonksiyonel gruplarının yaşayan organizmalar, tutuklanmış enzim ya da hücreler yoluyla başka bir kimyasal ürüne dönüşümüdür [9]. Bu amaçla gerçekleşen reaksiyonlar hidroksilasyon, glikozilasyon, oksidoredüksiyon, hidrojenasyon, hidroliz, metilasyon, asetilasyon, izomerizasyon ve çeşitli esterleşme tepkimeleridir [58]. Çeşitli sebeplerle kurulan kùltürlerde reaksiyonlar durabilir. Bu durumda dışarıdan verilen substrat istenilen maddeye dönüştürülebilir. Kullanılacak substrat sentetik ya da doğal olabilir. *Capsicum annum* L. bitkisinde substrat olarak djitoksin kullanılmış ve digoksin ile purpureaglikosidaz A

üretiştir [60]. Kùltüre alınan Ginseng hücre ve kökleri ile, paenol maddesi radikal süpürücü etkisi olan glikozitlere dönüştürülmüştür [61].

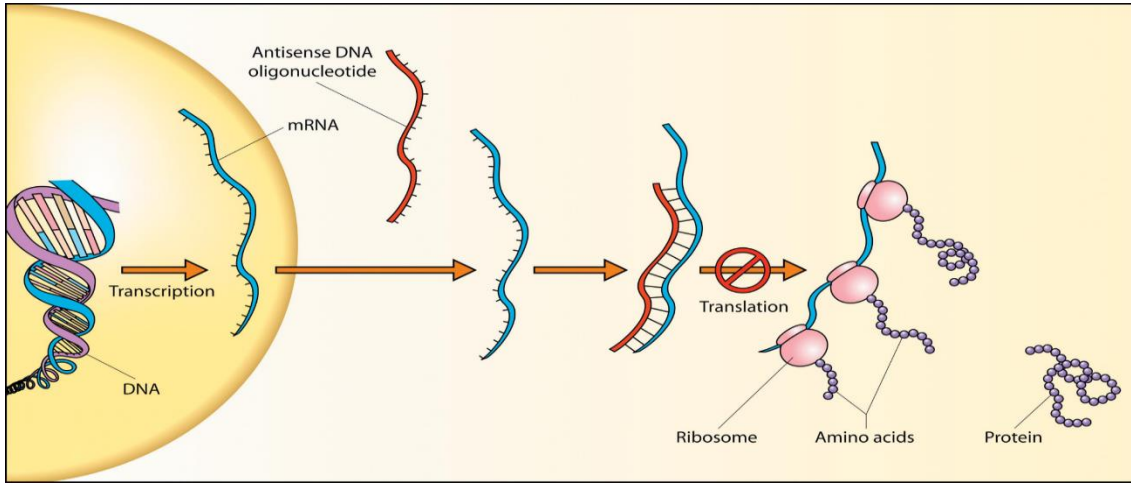
2.9. Biyoreaktör

Bitki hücrelerinin benzersiz fitofarmasötiklere ev sahipliği yapıyor olduğu gerçeğinin ortaya çıkması, bu kimyasalların endüstriyel anlamda geniş ölçekte üretiminin yapılmasını gerektirmiştir. Süspansiyon kùltürleriyle en fazla 1 litrelik üretim hacmi söz konusuken, biyoreaktörlerde birkaç bin litreye ulaşan üretim söz konusu olabilir. Özellikle ekonomik açıdan önem arzeden kimyasallara sahip ve nadir bulunan bitkilerin biyoreaktör sistemlerine adaptasyonu hayati önem taşımaktadır. Biyoreaktörlerde üretilecek ürünün maliyeti doğada yetişen bitkiden alınacak ürün maliyetinden fazla olmamalıdır. Mikroorganizmalar uzun zamandır biyoreaktör sistemlerde kullanılmaktadır. Bitki hücrelerinin biyoreaktör sistemlerinde kullanılmaları mikroorganizmalardan farklı olmaktadır. Bitki hücrelerinin boyutlarının fazla olması, şekillerinin homojen olmaması, kümelenme davranışı sergilemeleri, düşük büyüme hızına sahip olmaları, karıştırmaya duyarlı olmaları, biyoreaktörde kullanılmaları açısından aşılması gereken sorunlardır. Catharanthus roseus bitkisindeki serpentin kimyasalları 100 lt hacimli biyoreaktörlerde üretilmiştir [62]. Capsicum spp. bitkisinden kapsaisin kimyasalın üretimi için biyoreaktör sistem kurulmuştur [9].

2.10. Genetik Mühendisliği, Metabolik Mühendislik

Genetik mühendisliği ile yabancı genlerin bitkiye transferi ve bu genlerin bitkide ifadesi sağlanabilir, ancak görece bitkiye gen aktarmak kolayken, aktarım sonrası genetik kararlılığı sağlamak oldukça zordur. Kararlı bir transformasyon birkaç faktöre bağlıdır. En önemlileri, transformasyon için uygun türü seçmek ve uygun aktarım protokolü geliştirmektir. Rhizobium radiobacter dikotiledonlarda, elektroporasyon monokotiledonlarda sıklıkla kullanılan gen aktarım yöntemleridir [63]. Yine promotör aktarımı gen ifadesinin düzenlenmesine yönelik kullanılan bir diğer yöntemdir. Gen ifadesinin kontrolü için uyarılabilir promotör transferi yapılır. Bu yöntem özellikle karmaşık biyokimyasal bir yolda aktarımı yapılan genin ifadesinin etkilerini araştırmak için oldukça kullanışlıdır [64].

1990'lı yılların başında metabolik mühendislik disiplini doğmuştur. Metabolik mühendislik rekombinant DNA teknolojisi kullanılarak hücrelerin enzimatik, transport ve düzenleyici fonksiyonlarının değiştirilmesi ile hücresel aktivitede artış sağlanması olarak tanımlanabilir [65]. Bu teknoloji metabolit haritalama ve başarılı yola elisidasyonu sonrası sınırlı enzim aktivitesinin belirlenmesine dayanır. Bu sınırlı enzim aktivitesi, uygun bir genetik aktarım ile iyileştirilebilir. Bazı organizmalardan gen izolasyonu, promotör transferi, istenen özelliğın eldesi için antisens ve co-supressör yöntemler uygulanmıştır [1].



Şekil 4. Antisens RNA teknolojisi [66]

Genetik mühendisliği, izolasyon, karakterizasyon, aktarım yapılan organizmada genetik materyalin yeniden düzenlenmesi basamaklarını içerir. Genetik manipölasyonlara başvurulmasında temel iki sebep vardır. Bunlar; farklı bitki ya da hücrelerde bulunan istenilen özellikleri tek bir organizmada toplamak, aktif ve spesifik regölasyon mekanizmalarını birleştirmektir [8]. Domates genetik olarak modifiye edilip, tüketime sunulan ilk bitkidir. Domatesin erken çürümesini engellemek için, poligalakturonazı kodlayan gen antisens RNA teknolojisi ile baskılanmıştır [67].

Gen aktarımı yapılmış tütün bitkisinin tüylü kök fenotipi oluşturulmuş kùltürlerinde, tam uzunlukta IgG1 monoklonal antikoru üretilmiştir [68].

Bitki hücre kùltürlerinin farmasötik amaçlarla kullanılmaları ancak istenilen kimyasalın doğadaki bitkilere göre daha fazla üretimi söz konusuysa ya da yeni bileşikler elde edilebiliyorsa göze anılır. Bu durumlar, rutin hücre hattı seçimiyle ya da büyüme gibi diğer parametrelere bakılarak anlaşılabilir. Bu nedenle, metabolik yollar üzerine çalışmalara ve bu yolları kontrol eden genlerin ekspresyonlarının artırılması ya

da sınırlayıcı basamağın belirlenip bu basamakta görevli enzimlerin ifadelerinin düzenlenmesine yönelik çalışmalarla ihtiyaç vardır. Mikroorganizmalarla bitkilere doğrudan gen aktarılabileceğinin gösterilmesi, yabancı genlerle bitki hücrelerinin tanıştırılmasına imkân sağlamıştır ve belki de bu yolla bitki hücreleri ‘‘yeşil biyoreaktör’’ olarak endüstriyel anlamda kullanılabileceklerdir [69].

Genetik manipülasyon süreci;

1. İstenilen özellikleri kodlayan genlerin elde edilme kabiliyeti
2. İfade edilen genin istenilen ürünü vermesi ve bu ürünün taşınmasının yapılabilmesi
3. Başarılı transformasyon ve transgenik bitkinin tekrar tekrar üretilebilmesi
4. Genin uygun bölgeye integrasyonu
5. Değişen metabolik yolların değerlendirilmesine bağlıdır [9].

Genetik manipülasyon ile sekonder metabolit miktarını arttırmaya yönelik stratejiler;

- Sekonder metabolit öncüllerinin aşırı üretimi
- Özel bir yolağı sınırlandıran bir gen ürününün aşırı ifadelenmesi
- Mevcut metabolik yoldan başka bir yolağı kaymanın sağlanması
- Antisens yöntemlerle ifadenin azaltılması (Şekil 4)
- Regülatör genlerde manipülasyon
- Hedef ürünün üretiminde, spesifik promotörlerle dokuya ya da organa özgü ifade artışının sağlanması şeklinde sıralanabilir [9].

Triptofan dekarboksilaz, triptofanı triptamine dönüştüren enzimdir. Triptamin ise sitrikosidin sentazın substratıdır [70]. *C. roseus* bitkisinden triptofan dekarboksilazı kodlayan cDNA klonunun tütün bitkisinde ifadesi sağlanmış ve triptamin ve tiramin seviyesinde artış sağlanmıştır [71]. Bu deney, *Brassica napus* bitkisine de uygulanmıştır ki bu bitkide triptofan genellikle glukosinolata dönüştürülmektedir. Glukosinolat ise sığırların bitkiyi tatsız bulup yemeyi reddetmelerini sağlayan bir kimyasaldır. Bu deney sonucunda glukosinolat üretimi azalmış ve bitkiyi sığırların tüketmesi kolaylaşmıştır [72].

C. roseus bitkisinde sitrikosidin sentaz geni tütün bitkisinde ifade edilmiştir [73]. Sitrikosidin sentaz, indol aklaloidlerinin üretiminde önemli bir enzimdir.

Polifenol oksidaz yüksek yapılı bitkilerde önemli bir enzimdir ve bu enzimin regülasyonu birçok avantaj sağlar. PPO'nun az ifadelenmesi, bitki mahsulünün kalitesini artırırken, aşırı ifadesi zararlı tehlikesine karşı bitkinin direncini artırır. Yüksek ve düşük PPO seviyesine sahip transgenik tütün ve domates bitkilerinde fenotipik etki görülmemiştir [74].

III. SONUÇ VE ÖNERİLER

Sonuç olarak, bitki doku kültürü tekniğı ve bu tekniğı gelişen teknolojiyle getirilen yeni yaklaşımlar, çok

değerli metabolitlerin üretimine imkân tanımaktadır, ancak geniş ölçekte üretim birkaç metabolit ile sınırlı kalmıştır. Antikanser, antiviral, anti-epileptik, antibakteriyel özelliğı olan kimyasalların geniş ölçekte üretilmeleri, bitki biyokimyası hakkında daha fazla bilginin elde edilmesine, sekonder metabolit yollarının aydınlatılmasına, yollarında üretimi sınırlayan basamaktaki substrat ve enzimi kodlayan genler üzerinde çalışılmasına, yabancı genlerin bitki hücrelerine aktarılmasına bağlıdır. Bütün bu yaklaşımlar bir yapbozun eksik parçasını tamamlamakta ve bu sayede ortaya çıkan resim gelecekte yeşil fabrikaların kurulması adına umut vaat etmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Bourgaud, F., Grivot, A., Milesi, S. ve Gontier, E. (2001). Production of plant secondary metabolites: a historical perspective. *Plant science*, 161(5), 839-851.
- [2] Kossel, A. (1891). Ueber die chemische Zusammensetzung der Zelle. *Du Bois-Reymond's Archiv/Arch Anat Physiol Physiol Abt*, 278, 181-186.
- [3] Czapek, F. (1921). *Spezielle Biochemie*, Biochemie der Pflanzen, vol. 3, G. Fischer Jena, 369.
- [4] Babaoğlu, M., Gürel, E. ve Özcan, S. (2001). Bitki biyoteknolojisi, doku kültürü ve uygulamaları. Selçuk Üniversitesi Yayınları, Konya.
- [5] Li, J., Ou-Lee, T. M., Raba, R., Amundson, R. G. ve Last, R. L. (1993). Arabidopsis flavonoid mutants are hypersensitive to UV-B irradiation. *The Plant Cell*, 5(2), 171-179.
- [6] Harborne, J. B. (1999). Classes and functions of secondary products from plants. *Chemicals from plants*, 1-25.
- [7] Murch, S. J., Choffe, K. L., Victor, J. M. R., Slimmon, T. Y., Krishnaraj, S. ve Saxena, P. K. (2000). Thidiazuron-induced plant regeneration from hypocotyl cultures of *St. John's wort* (*Hypericum perforatum*. cv'Anthos'). *Plant Cell Reports*, 19(6), 576-581.
- [8] Dörnenburg, H. ve Knorr, D. (1995). Strategies for the improvement of secondary metabolite production in plant cell cultures. *Enzyme and microbial technology*, 17(8), 674-684.
- [9] Rao, S. R. ve Ravishankar, G. A. (2002). Plant cell cultures: chemical factories of secondary metabolites. *Biotechnology advances*, 20(2), 101-153.
- [10] Ogino, T., Hiraoka, N. ve Tabata, M. (1978). Selection of high nicotine-producing cell lines of tobacco callus by single-cell cloning. *Phytochemistry*, 17(11), 1907-1910.
- [11] Dougall, D. K. (1980). Nutrition and metabolism. In *Plant Tissue Culture as a Source of Biochemicals*. (Ed. EJ Staba.) pp. 21-58.
- [12] Zenk, MH. (1978). The impact of plant cell culture on industry. *The International Association of Plant Tissue Culture*, 1978. p. 1-14.

- [13] Matsumoto, T., Ikeda, T., Kanno, N., Kasaki, T. ve Noguchi, M. (1980). Selection of high ubiquinone 10-producing strain of tobacco cultured cells by cell cloning technique. *Agricultural and Biological Chemistry*, 44(4), 967-969.
- [14] Ramesha, B. T., Amna, T., Ravikanth, G., Gunaga, R. P., Vasudeva, R., Ganeshiah, K. N. ve Qazi, G. N. (2008). Prospecting for camptothecines from *Nothapodytes nimmoniana* in the Western Ghats, South India: identification of high-yielding sources of camptothecin and new families of camptothecines. *Journal of chromatographic science*, 46(4), 362-368.
- [15] Berlin, J. (1980). Para-fluorophenylalanine resistant cell lines of tobacco. *Zeitschrift für Pflanzenphysiologie*, 97(4), 317-324.
- [16] Salgado-Garciglia, R. ve Ochoa-Alejo, N. (1990). Increased capsaicin content in PFP-resistant cells of chili pepper (*Capsicum annum L.*). *Plant cell reports*, 8(10), 617-620.
- [17] Berlin, J., Forche, E., Wray, V., Hammer, J. ve Hösel, W. (1983). Formation of benzophenanthridine alkaloids by suspension cultures of *Eschscholtzia californica*. *Zeitschrift für Naturforschung C*, 38(5-6), 346-352.
- [18] Do, C. B. ve Cormier, F. (1990). Accumulation of anthocyanins enhanced by a high osmotic potential in grape (*Vitis vinifera L.*) cell suspensions. *Plant Cell Reports*, 9(3), 143-146.
- [19] Wang, Y. ve Weathers, P. J. (2007). Sugars proportionately affect artemisinin production. *Plant cell reports*, 26(7), 1073-1081.
- [20] Rajasekaran, T., Rajendran, L., Ravishankar, G. A. ve Venkataraman, L. V. (1991). Influence of nutrient stress on pyrethrin production by cultured cells of pyrethrum (*Chrysanthemum cinerariaefolium*). *Current Science*, 705-707.
- [21] Sasse F., K. Knobloch and J. Berlin. (1982). Induction of secondary metabolism in cell suspension cultures of *Catharanthus roseus*, *Nicotiana tabacum* and *Peganum harmala*. *Proceedings of the 5th International Congress of Plant Tissue and Cell Culture*, Tokyo, 343-4.
- [22] Nagella, P. ve Murthy, H. N. (2011). Effects of macroelements and nitrogen source on biomass accumulation and withanolide-A production from cell suspension cultures of *Withania somnifera (L.) Dunal*. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 104(1), 119-124.
- [23] Mantell, S.H. and Smith, H. (1984) Cultural factors that influence secondary metabolite accumulation in plant cell and tissue cultures. *Plant biotechnology*, Cambridge: Cambridge Univ. Press.: 75-108.
- [24] Zenk, M. H., El-Shagi, H. ve Schulte, U. (1975). Anthraquinone production by cell suspension cultures of *Morinda citrifolia*. *Planta Medica*, 28(S 01), 79-101.
- [25] Rajendran, L., Ravishankar, G. A., Venkataraman, L. V. ve Prathiba, K. R. (1992). Anthocyanin production in callus cultures of *Daucus carota* as influenced by nutrient stress and osmoticum. *Biotechnology letters*, 14(8), 707-712.
- [26] Mok, M. C., MC, M., & WH, G. (1976). Carotenoid synthesis in tissue cultures of *Daucus carota L.* *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1976. 101: 442-9.
- [27] Seitz, H. U. ve Hinderer, W. (1988). Anthocyanins. *Phytochemicals in Plant Cell Cultures*, 49-76.
- [28] Weathers, P. J., Bunk, G. ve McCoy, M. C. (2005). The effect of phytohormones on growth and artemisinin production in *Artemisia annua* hairy roots. *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant*, 41(1), 47-53.
- [29] Romagnoli, L. G. ve Knorr, D. (1988). Effects of ferulic acid treatment on growth and flavor development of cultured *Vanilla planifolia* cells. *Food Biotechnology*, 2(1), 93-104.
- [30] Sahai, O. P. ve Shuler, M. L. (1984). Environmental parameters influencing phenolics production by batch cultures of *Nicotiana tabacum*. *Biotechnology and bioengineering*, 26(2), 111-120.
- [31] Ikeda, T., Matsumoto, T. ve Noguchi, M. (1977). Effects of inorganic nitrogen sources and physical factors on the formation of ubiquinone by tobacco plant cells in suspension culture. *Agricultural and Biological Chemistry*, 41(7), 1197-1201.
- [32] Toivonen, L., Laakso, S. ve Rosenqvist, H. (1992). The effect of temperature on hairy root cultures of *Catharanthus roseus*: growth, indole alkaloid accumulation and membrane lipid composition. *Plant cell reports*, 11(8), 395-399.
- [33] Yu, K. W., Murthy, H. N., Hahn, E. J. ve Paek, K. Y. (2005). Ginsenoside production by hairy root cultures of *Panax ginseng*: influence of temperature and light quality. *Biochemical Engineering Journal*, 23(1), 53-56.
- [34] Mulder-Krieger, T. H., Verpoorte, R., Svendsen, A. B. ve Scheffer, J. J. C. (1988). Production of essential oils and flavours in plant cell and tissue cultures. A review. *Plant cell, tissue and organ culture*, 13(2), 85-154.
- [35] Keskin, N. ve Kunter, B. (2007). *Ercis üzüm çeşidinin kallus kültürlerinde UV ışını etkisiyle resveratrol üretiminin uyarılması*. *Journal of Agricultural Sciences*, 13(04), 379-384.
- [36] Chan, L. K., Koay, S. S., Boey, P. L. ve Bhatt, A. (2010). Effects of abiotic stress on biomass and anthocyanin production in cell cultures of *Melastoma malabathricum*. *Biological Research*, 43(1), 127-135.
- [37] Veliky, I. A. (1977). Effect of pH on tryptophol formation by cultured *Ipomoea sp.* plant cells. *Journal of the New York Entomological Society*.
- [38] Praveen, N. ve Murthy, H. N. (2012). Synthesis of withanolide A depends on carbon source and medium pH in hairy root cultures of *Withania*

- somnifera. *Industrial Crops and Products*, 35(1), 241-243.
- [39] Kreis, W. ve Reinhard, E. (1992). 12 β -Hydroxylation of digitoxin by suspension-cultured *Digitalis lanata* cells: Production of digoxin in 20-litre and 300-litre air-lift bioreactors. *Journal of biotechnology*, 26(2-3), 257-273.
- [40] Ambid, C. ve Fallot, J. (1981). Role of the gaseous environment on volatile compound production by fruit cell suspensions cultured in vitro. *Flavour '81*. Berlin: de Gruyter, 1981. 529-38.
- [41] Georgiev, M. I., Weber, J. ve Maciuk, A. (2009). Bioprocessing of plant cell cultures for mass production of targeted compounds. *Applied microbiology and biotechnology*, 83(5), 809-823.
- [42] Yamada, Y. (1990). Biochemistry of alkaloid production in vitro. *Secondary Products from Plant Tissue Culture*, 227-242.
- [43] Baque, M. A., Moh, S. H., Lee, E. J., Zhong, J. J. ve Paek, K. Y. (2012). Production of biomass and useful compounds from adventitious roots of high-value added medicinal plants using bioreactor. *Biotechnology Advances*, 30(6), 1255-1267.
- [44] Sivanandhan, G., Selvaraj, N., Ganapathi, A. ve Manickavasagam, M. (2016). Elicitation approaches for withanolide production in hairy root culture of *Withania somnifera* (L.) Dunal. In *Biotechnology of Plant Secondary Metabolism Humana Press*, 1-18.
- [45] Spencer, A., Hamill, J. D., Reynolds, J. ve Rhodes, M. J. C. (1990). Production of terpenes by transformed differentiated shoot cultures of *Mentha piperita citrata* and *M. piperita vulgaris*. In *Progress in Plant Cellular and Molecular Biology*, 619-624.
- [46] Praveen, N., Naik, P. M., Manohar, S. H., Nayeem, A. ve Murthy, H. N. (2009). In vitro regeneration of brahmi shoots using semisolid and liquid cultures and quantitative analysis of bacoside A. *Acta Physiologiae Plantarum*, 31(4), 723-728.
- [47] Dandin, V. S. ve Murthy, H. N. (2012). Enhanced in vitro multiplication of *Nothapodytes nimmoniana* Graham using semisolid and liquid cultures and estimation of camptothecin in the regenerated plants. *Acta Physiologiae Plantarum*, 34(4), 1381-1386.
- [48] Stafford, A. (1991). Natural products and metabolites from plants and plant tissue cultures. *Plant cell and tissue culture*, 124-162.
- [49] Ketchum, R. E., Gibson, D. M., Croteau, R. B. ve Shuler, M. L. (1999). The kinetics of taxoid accumulation in cell suspension cultures of *Taxus* following elicitation with methyl jasmonate. *Biotechnology and bioengineering*, 62(1), 97-105.
- [50] Zenk, M. H., El-Shagi, H., Arens, H., Stöckigt, J., Weiler, E. W. ve Deus, B. (1977). Formation of the indole alkaloids serpentine and ajmalicine in cell suspension cultures of *Catharanthus roseus*. In *Plant tissue culture and its bio-technological application*, 27-43.
- [51] Akula, R. ve Ravishankar, G. A. (2011). Influence of abiotic stress signals on secondary metabolites in plants. *Plant signaling & behavior*, 6(11), 1720-1731.
- [52] Murthy, H. N., Kim, Y. S., Park, S. Y. ve Paek, K. Y. (2014). Hypericins: biotechnological production from cell and organ cultures. *Applied microbiology and biotechnology*, 98(22), 9187-9198.
- [53] Coste, A., Vlase, L., Halmagyi, A., Deliu, C. ve Coldea, G. (2011). Effects of plant growth regulators and elicitors on production of secondary metabolites in shoot cultures of *Hypericum hirsutum* and *Hypericum maculatum*. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 106(2), 279-288.
- [54] Yamaner, Ö. (2011). *Hypericum adenotrichum* Spach'un doku kùltürü teknikleri ile çoğaltılması ve in vitro koşullarda sekonder metabolit değişiminin araştırılması. Doktora Tezi. AMÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye.
- [55] Halder, M., Sarkar, S. ve Jha, S. (2019). Elicitation: A biotechnological tool for enhanced production of secondary metabolites in hairy root cultures. *Engineering in Life Sciences*, 19(12), 880-895.
- [56] Wang, C., Wu, J. ve Mei, X. (2001). Enhanced Taxol Production and Release in *Taxus chinensis* Cell Suspension Cultures with Selected Organic Solvents and Sucrose Feeding. *Biotechnology progress*, 17(1), 89-94.
- [57] Brodelius, P., Deus, B., Mosbach, K. ve Zenk, M. H. (1979). Immobilized plant cells for the production and transportation of natural products. *Febs Letters*, 103(1), 93-97.
- [58] Johnson, T. S., Ravishankar, G. A. ve Venkataraman, L. V. (1996). Biotransformation of ferulic acid and vanillylamine to capsaicin and vanillin in immobilized cell cultures of *Capsicum frutescens*. *Plant cell, tissue and organ culture*, 44(2), 117-121.
- [59] Giri, A., Dhingra, V., Giri, C. C., Singh, A., Ward, O. P. ve Narasu, M. L. (2001). Biotransformations using plant cells, organ cultures and enzyme systems: current trends and future prospects. *Biotechnology advances*, 19(3), 175-199.
- [60] Ramachandra Rao, S., Tripathi, U. ve Ravishankar, G. A. (2002). Biotransformation of Digitoxin in Cell Cultures of *Capsicum frutescens* in the Presence of β -cyclodextrin. *Biocatalysis and Biotransformation*, 20(2), 137-143.
- [61] Li, W., Koike, K., Asada, Y., Yoshikawa, T. ve Nikaido, T. (2005). Biotransformation of paeonol by *Panax ginseng* root and cell cultures. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, 35(4-6), 117-121.

- [62] Smart, N. J. ve Fowler, M. W. (1981). Effect of aeration on large-scale cultures of plant cells. *Biotechnology Letters*, 3(4), 171-176.
- [63] Zupan, J., Muth, T. R., Draper, O. ve Zambryski, P. (2000). The transfer of DNA from *Agrobacterium tumefaciens* into plants: a feast of fundamental insights. *The Plant Journal*, 23(1), 11-28.
- [64] Anand, S. (2010). Various approaches for secondary metabolite production through plant tissue culture. *Pharmacia*, 1(1), 1-7.
- [65] Bailey, J. E. (1991). Toward a science of metabolic engineering. *Science*, 252(5013), 1668-1675.
- [66] What is chemistry, <http://www.whatischemistry.unina.it/it/h.html>, (Mart 2021).
- [67] Pfeiffer, N. (1994). FDA OKs Calgene's Flavr Savr tomato for marketing in supermarkets in the US. *Genetic engineering news: GEN (USA)*.
- [68] Wongsamuth, R. ve P.M. Doran, Production of monoclonal antibodies by tobacco hairy roots. *Biotechnology and Bioengineering*, 1997. 54: p. 401-15.
- [69] Saito, K., Yamazaki, M. ve Murakoshi, I. (1992). Transgenic medicinal plants: *Agrobacterium*-mediated foreign gene transfer and production of secondary metabolites. *Journal of natural products*, 55(2), 149-162.
- [70] Stöckigt, J. ve Zenk, M. H. (1977). Strictosidine (isovincoside): the key intermediate in the biosynthesis of monoterpene indole alkaloids. *Journal of the Chemical Society, Chemical Communications*, (18), 646-648.
- [71] Songstad, D. D., Kurzt, W. G. W. ve Nessler, C. L. (1991). Tyramine accumulation in *Nicotiana tabacum* transformed with a chimeric tryptophan decarboxylase gene. *Phytochemistry*, 30(10), 3245-3246.
- [72] Chavadej, S., Brisson, N., McNeil, J. N. ve De Luca, V. (1994). Redirection of tryptophan leads to production of low indole glucosinolate canola. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 91(6), 2166-2170.
- [73] McKnight, T. D., Roessner, C. A., Devagupta, R., Scott, A. I. ve Nessler, C. L. (1990). Nucleotide sequence of a cDNA encoding the vacuolar protein strictosidine synthase from *Catharanthus roseus*. *Nucleic acids research*, 18(16), 4939.
- [74] Steffens, J.C., Darel, E. ve Hunt, M.D. (1994). Polyphenoloxidase. *Genetic Engineering of Plant Secondary Metabolism*, 1994. 275-312.

Determination of Antifungal Activity Against Invasive Candidiasis Agents and Trace Element Content of Fig Tree Latex Samples Obtained from Trabzon Province

Trabzon Bölgesinden İzole Edilen İncir Ağacı Latekslerinin İnvazif Kandidiyazis Etkenlerine Karşı Antifungal Aktivitesinin ve Eser Element Düzeylerinin İncelenmesi

Özge ÜNLÜ¹, Fatma ATEŞ ALKAN^{2*}, Nural PASTACI ÖZSOBACI³,
Sedanur ÖZYÜKSEL⁴, Mehmet DEMİRCİ⁵

¹Beykent University Faculty of Medicine, Department of Medical Microbiology, 34500, Istanbul, Turkey

^{2*}Beykent University Faculty of Medicine, Department of Biophysics, 34500, Istanbul, Turkey

³Istanbul University-Cerrahpasa, Faculty of Medicine Cerrahpasa, Department of Biophysics, 34098, Istanbul, Turkey

⁴Beykent University Faculty of Medicine, 4th Grade Student, 34500, Istanbul, Turkey

⁵Kırklareli University Faculty of Medicine, Department of Medical Microbiology, 39100, Kırklareli, Turkey

Abstract

Candidiasis is a major health concern causing both morbidity and mortality. The increasing prevalence of antimicrobial-resistant fungi associated with life-threatening systemic mycoses, led a constant need for new antifungal agents. Herbal medicines have been tried for this purpose for centuries. The antifungal effect of fig tree latex has been reported and some trace elements such as zinc were associated with antifungal effects. The aim of this study was to determine the trace element content and in-vitro antifungal activity of fig tree latex sample against *Candida albicans*, *C. glabrata*, *C. tropicalis* and *C. krusei*. Fig tree latex samples were obtained from four different fig tree at Trabzon province in July 2019. The broth microdilution technique was performed to investigate antifungal activity against standard *Candida* strains and trace elements level were detected with Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrophotometer (ICP-OES) analyzer. The most powerful antifungal activity was reached at a concentration of 0.5 for *C. albicans* and *C. tropicalis*, and at a concentration of 0.125 for *C. krusei* and *C. glabrata* in fig tree latex. According to trace element analysis, magnesium had the highest level, followed by calcium and phosphorus. Selenium, aluminium, lead and nickel levels were too low to be measured. As a conclusion, fig tree latex has an antifungal potential against *Candida* species and this may be caused by the high level of magnesium that it contains, however more studies are needed to understand the therapeutic effects of fig tree latex.

Keywords: fig tree latex, *Ficus carica*, *Candida*, antifungal activity, trace elements

Öz

Kandidiyazis, morbidite ve mortaliteye neden olan önemli bir halk sağlığı sorunudur. Hayatı tehdit eden sistemik mikozlara neden olan antimikrobiyal dirençli mantarların sayısındaki artış, yeni antifungal ajanlara olan ihtiyacı doğurmuştur. Bitkisel ilaçlar bu amaçla yüzyıllardır kullanılmaktadır. İncir ağacı lateksinin antifungal etkisi önceki çalışmalarda rapor edilmiş, buna ek olarak çinko gibi bazı eser elementlerin de antifungal etkileri çeşitli çalışmalarla ortaya konmuştur. Çalışmamızda, incir ağacı lateksinin *Candida albicans*, *C. glabrata*, *C. tropicalis* ve *C. krusei*'ye karşı in vitro antifungal aktivitesinin belirlenmesi ve içeriğindeki eser elementlerin ortaya konarak, bu eser elementlerin potansiyel antifungal etkilerinin incelenmesi amaçlandı. İncir ağacı lateks numuneleri, Temmuz 2019'da Trabzon ilindeki dört farklı incir ağacından elde edilmiştir. Latekslerin standart *Candida* kökenlerine karşı antifungal etkisini araştırmak için mikrodilüsyon tekniği uygulandı ve İndüktif Eşleşmiş Plazma Optik Emisyon Spektrofotometresi (ICP-OES) kullanılarak eser element seviyesi tespit edildi. İncir ağacı latekslerinde *C. albicans* ve *C. tropicalis* için 0.5 konsantrasyonda, *C. krusei* ve *C. glabrata* için ise 0.125 konsantrasyonda en güçlü antifungal aktiviteye ulaşıldığı saptandı. Eser element analizine göre incir ağacı lateksinde en yüksek konsantrasyonda bulunan elementler sırasıyla magnezyum, kalsiyum ve fosfor olarak saptandı. Selenyum, alüminyum, kurşun ve nikel seviyeleri ise ölçülemeyecek kadar düşük olarak kaydedildi. Çalışmamıza göre incir ağacı lateksinin *Candida* türlerine karşı antifungal potansiyeli olduğu görülmüş ve aktivitenin lateksin içerdiği yüksek magnezyum seviyesinden kaynaklanıyor olabileceği düşünülmüştür. Ancak incir ağacı lateksinin terapötik etkilerinin ortaya konulması için daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır.

Anahtar kelimeler: incir ağacı lateksi, *Ficus carica*, *Candida*, antifungal etki, eser elementler

I. INTRODUCTION

Candidiasis is a major health concern increasing both morbidity and mortality. It is known that there are at least 15 different *Candida* species that cause infections in humans. However, the four most common species detected in more than 90% of invasive diseases related to *Candida* species are *Candida albicans*, *C. glabrata*, *C. tropicalis* and *C. krusei*. Each of these organisms has unique virulence potential, antifungal sensitivity, and epidemiology [1]. As a result of the increasing prevalence of antimicrobial-resistant fungi associated with life-threatening systemic mycoses, there is a constant need for new antifungal agents. Because fungi have eukaryotic cell structure, their similarity with host cells creates additional problems in the design of drugs with selective toxicity to fungal cells in the treatment of these infections [2]. Herbal medicines have played an important role in the protection of individuals' health for thousands of years all over the world [3]. When the frequency of the usage of complementary and alternative drugs in general populations is examined, it has been understood that herbal drugs are quite popular in recent years [4]. The fig tree is one of the oldest trees belonging to the *Moraceae* family. Its product, *Ficus carica* L., is one of the earliest cultivated crops in the world due to its nutritional and medicinal benefits. The fruit can be consumed both in dry and fresh form. Mediterranean countries such as Turkey are the leading manufacturers of this product due to suitable climate [5]. In addition, fig tree latex ("ficin", a common milky secretion of fig tree leaves and fruits) has different therapeutic effects [6]. The antifungal effect of fig tree latex has been reported in previous studies, however, the cause of this antifungal effect was not examined in these studies [7, 8].

Trace elements are essential inorganic elements for life and are cofactors or catalysts in enzyme activity. When taken insufficiently, it causes dysfunction by affecting biological functions and only physiological doses are needed for the continuation of normal tissue functions. Trace elements such as iron (Fe), copper (Cu), zinc (Zn), selenium (Se), etc. play crucial roles in many biological systems [9, 10]. For instance, in *C. albicans*, these ions can participate in the provision of membrane potential, regulation of cell volume, cell proliferation and apoptosis mechanisms [10]. In addition to this, some trace elements such as Zn and Se compounds were associated with antifungal agents [11, 12]. When the trace elements found in figs were examined, the presence of different trace elements was reported [13].

In our study, it was aimed to reveal the in-vitro antifungal activity of fig tree latex against *C. albicans*, *C. glabrata*, *C. tropicalis* and *C. krusei* which are the species responsible for over 90% of invasive candidiasis, also to determine the levels of the trace elements in the fig tree latex and to evaluate the trace elements that may contribute to the antifungal activity.

II. MATERIALS AND METHODS

2.1. Antifungal Activity Assays

In this study, the broth microdilution technique was utilized to investigate the effect of fig tree latex on the growth of *Candida* species according to Clinical Laboratory Standards Institute (CLSI) criteria. In order to achieve this objective, *C. albicans* American Type Culture Collection (ATCC) 10231, *C. tropicalis* ATCC 750, *C. krusei* ATCC 6258 ve *C. glabrata* ATCC 2001 strains were used. Fig tree latex samples were obtained from four different fig tree from Trabzon region (Turkey) in July 2019 and latexes were transferred to the laboratory under sterile conditions in microcentrifuge tubes. Each fig tree latex was individually tested against four different *Candida* species. 10 µL fig tree latex sample was added directly to the first well of the 96 well plate which contains 80 µL Brain Heart Infusion (BHI) broth in each well. Then, latex diluted 0.5, 0.25, 0.125 ve 0.0625 (dilution coefficient) fold with BHI broth. Also, the same volume of BHI was used as the negative control. Broth cultures of *Candida* species were adjusted to 0.5 McFarland turbidity standard individually and were inoculated into each well. The absorbances of the time T0 were measured spectrophotometrically at optical density at 600 nm (OD 600) in the Epoch System (Biotek Instruments, USA) according to the manufacturer's instructions. After incubation at 37°C for 24 hours, the absorbance values of T24 time were measured and values were compared with T0 absorbances in order to evaluate fungal growth. All experiments were performed in triplicate [14].

2.2. Trace Element Analysis

Fig tree latex samples were prepared for element measurements by diluting 1:10 with deionized water. The analysis of chromium (Cr), Cu, Fe, magnesium (Mg), manganese (Mn), Se, Zn, aluminium (Al), calcium (Ca), phosphorus (P), cobalt (Co), cadmium (Cd), lead (Pb), arsenic (As), boron (B), nickel (Ni) and silicium (Si) levels were performed with ICP-OES Thermo iCAP 6000 series at Trace Element Analysis Laboratory of Biophysics Department of Cerrahpasa Medical Faculty at Istanbul University-Cerrahpasa.

The favorable wavelengths, 267.716, 324.754, 259.940, 285.213, 257.610, 196.090, 206.200, 167.090, 317.933, 177.495, 228.616, 249.773, 189.042, 249.773, 221.647 and 251.611 nm, were used for the determinations of Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Se, Zn, Al, Ca, P, Co, Cd, Pb, As, B, Ni and Si levels, respectively, in the ICP-OES device.

2.3. Reagents

ICP-OES labor standards were prepared from appropriate standard solutions including 1.000 ppm for each tested element obtained from Chem Lab NV located in Zedelgem/Belgium. Reagents with analytical reagent grade and deionized water were used. Stock solutions of Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Se, Zn, Al, Ca, P, Co,

Cd, Pb, As, B, Ni and Si were prepared by taking the appropriate standard in deionized water. Solutions were prepared freshly before using doubly deionized water was used in this study. To reduce the risk of contamination from ambient air and dust, all process was performed on a clean bench. All the volumetric flasks used were cleaned soaking in with 10% (v/v) nitric acid (HNO₃) solution during the day before use. These were rinsed with deionized water thoroughly and dried in an oven overnight at 100 °C [15]. *F. carica* L. levels of analyzed elements were expressed in micrograms per milliliter (µg/mL) [16]. Measurement of each trace element level was carried out three times and averaged.

III. RESULTS AND DISCUSSION

Antifungal activity assays revealed the most powerful antifungal activity was reached at a concentration of 0.5 for *C. albicans* and *C. tropicalis*, and at a concentration of 0.125 for *C. krusei* and *C. glabrata* in fig tree latex taken at different times. The fungal growth suppression rates of *Candida* strains according to the fig tree latex dilution rates are given in Table 1 and Figure 1, and the relative growth rates of *Candida* strains as colony-forming unit (CFU) are given in Table 2.

Minerals, trace and toxic element levels of *F. carica* L samples were given in Table 3. According to trace element analysis, Mg has the highest level, followed by Ca and P. Se, Al, Pb and Ni levels were too low to be measured. All element levels are given in Table 3.

Table 1. Growth suppression rates of *Candida* strains according to the concentrations of fig tree latexes (%)

	1	0.5	0.25	0.125	0.0625
<i>C. albicans</i>	55.19%	90.74%	86.44%	87.04%	69.99%
<i>C. tropicalis</i>	67.36%	68.06%	63.92%	65.98%	51.23%
<i>C. krusei</i>	75.20%	75.35%	72.03%	79.73%	63.25%
<i>C. glabrata</i>	64.59%	51.99%	84.98%	87.47%	73.36%

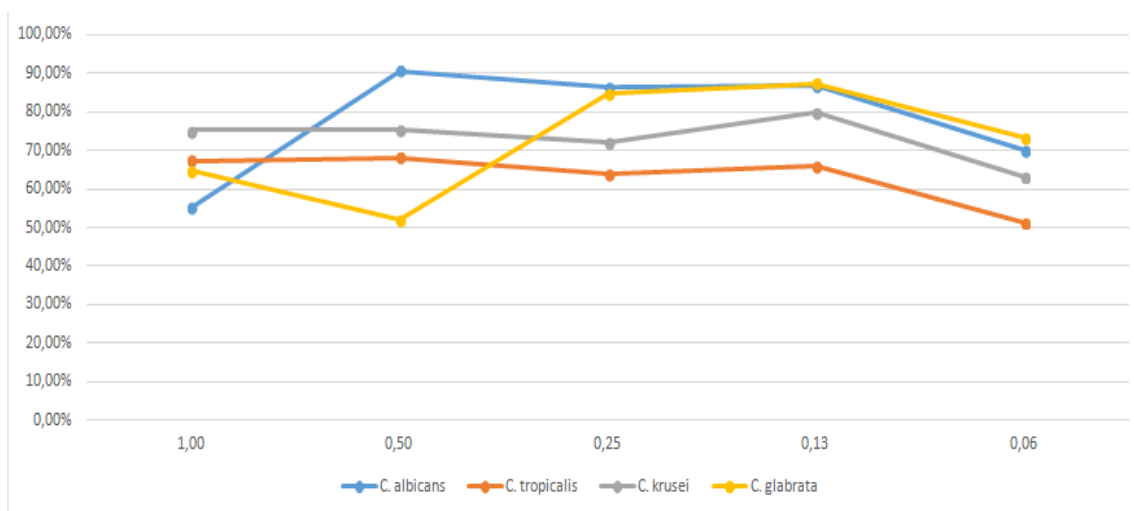


Figure 1. Growth suppression rates of *Candida* species by fig tree latex (%)

Table 2. Relative growth rates of *Candida* strains as CFU in medium supplemented with different concentrations of fig tree latex samples (Means + SD.) (CFU/mL*10⁵)

	1	0.5	0.25	0.125	0.0625
<i>C. albicans</i>	8.96±6.49	1.85±2.22	2.71±4.14	2.59±2.97	6.00±3.45
<i>C. tropicalis</i>	6.53±3.95	6.39±3.12	7.22±7.28	6.80±4.40	9.75±6.34
<i>C. krusei</i>	4.96±3.92	4.93±4.47	5.59±6.18	4.05±5.20	7.35±6.22
<i>C. glabrata</i>	7.08±7.64	9.60±6.92	3.00±5.20	2.51±2.72	5.33±4.99

CFU: Colony-forming unit

Table 3. Trace element levels of *F. carica* L. samples

Element	Results ($\mu\text{g/mL}$)	SD
Cr	0.06	0.03
Cu	0.27	0.13
Fe	0.37	0.21
Mg	2688.93	610.30
Mn	0.16	0.07
Se	ND	ND
Zn	0.35	0.22
Al	ND	ND
Ca	70.98	10.49
P	29.42	9.18
Co	0.04	0.03
Cd	0.03	0.01
Pb	ND	ND
As	0.51	0.21
B	0.68	0.43
Ni	ND	ND
Si	0.96	0.25

Cr, chromium; Cu, copper; Fe, iron; Mg, magnesium; Mn, manganese; Se, selenium; Zn, zinc; Al, aluminium; Ca, calcium; P, phosphorus; Co, cobalt; Cd, cadmium; Pb, lead; As, arsenic; B, boron; Ni, nickel; Si, silicium. ND: non-detectable. Data are shown as the Means \pm SD.

Candida species are the most important pathogens of opportunistic mycoses. In addition to superficial and mucosal infections such as oral candidiasis and vulvovaginal candidiasis, which are common in healthy hosts, they also have the potential to cause systemic infection in the immunosuppressive host. Although more than fifteen *Candida* species that can infect humans have been identified, it is known that *C. albicans*, *C. glabrata*, *C. tropicalis* and *C. krusei* are responsible for 90% of human infections [1]. Antifungal resistance emerging in *Candida* is an important public health problem that causes failure in the treatment of candidiasis. The development of new antifungals against increased antifungal resistance and the discovery of substances with antifungal activity are crucial [2]. Herbal treatment methods have been used in the treatment of superficial infections for many years, and especially in recent years, interest in these traditional treatment approaches has increased [3, 4]. One of the plants that have been used for many years for this purpose is fig, in which Turkey is among the leading producers. Fig (*Ficus carica* L.) is a nutritious plant belonging to the *Moraceae* family, whose therapeutic effects have been revealed in many studies [5-8]. One of the most important therapeutic effects of *F. carica* L. is the wound healing effect, which is claimed to be caused by the latex of the fig tree. Fig tree latex is a milky substance that is highly secreted from many parts of the fig tree such as young shoots, pedicles and leaves. Fig tree latex, which is secreted especially from the injured area of the fig tree, covers the area and protects it against to invasion of pathogens [8].

Probably with the observation of this effect, fig tree latex has begun to be used in traditional treatment of human wounds. In addition to its wound healing effect, there are many studies investigating the antifungal effect of fig tree latex [7, 8]. Despite its proven antifungal effect, there are no studies examining which active ingredient of the fig tree latex causing this antifungal effect. Therefore, in our study, it was aimed to investigate the antifungal effect of fig tree latex on *Candida* species, and to reveal the trace elements in the fig tree latex collected from our country and to examine the potential antifungal effects of these trace elements.

Aref et al. examined the antifungal effects of the extracts prepared from fig tree latex in their studies and they demonstrated that different extracts exerted different antifungal effects on different fungal species such as *C. albicans*, *Aspergillus fumigatus*, *Microsporum canis*, *Cryptococcus neoformans*, *Trichophyton rubrum*, *T. soudanense* and *Scopulariopsis brevicans*. The most resistant species were determined as *T. rubrum*, *T. soudanense* and *S. brevicans*, and it was observed that fig tree latex inhibit the related species at rates varying between 0% and 60% [7].

Raskovic et al. investigated the antifungal effect of fig tree latex collected between May and August from Bar Region of Montenegro on *Saccaromyces cerevisiae*. According to the results of their study, that fig milk collected between May and June had a higher antifungal effect than the latex collected between July

and August due to the high chitinolytic activity in the fig tree in the relevant months [8].

In the study conducted by Ahmed in 2016, the antimicrobial effect of latexes obtained from *Ficus carica* and *Ficus elastica* species was examined on many bacteria and fungal species, and it was reported that the antifungal activity of fig tree latex was high against all the yeast strains examined. It was stated that the fig latex obtained from *F. carica* was more effective compared to *F. elastica* latex and according to agar well diffusion results, inhibition zone diameters varied between 30 mm and 12 mm against different yeast species. The highest inhibition zone was observed against *C. tropicalis* (30 mm), followed by *C. albicans* (25 mm), *C. sojae* (22 mm), *C. kefyr* (19 mm) species, and the lowest antifungal effect was observed against *C. krusei* (14mm) and *C. neoformans* (12mm) species [17].

In our study, it was observed that fig tree latex in different concentrations suppressed the growth of different *Candida* species at different rates. It was observed that fig tree latex showed the highest antifungal activity against *C. albicans* and *C. tropicalis* at the concentration of 0.5, and the concentration of 0.125 against *C. krusei* and *C. glabrata*. Growth of *C. albicans* was suppressed 91% at 0.5 concentration, while *C. tropicalis* growth was suppressed by 68%. The growth of *C. krusei* was inhibited by 80% at the concentration of 0.125 and the growth of *C. glabrata* was suppressed by 87%. It is noteworthy that fig tree latex suppresses the growth of different *Candida* species at different dilution rates. It is also striking that, contrary to expectations, higher antifungal activity was not obtained when fig tree latexes were applied to *Candida* species at maximum concentration without dilution.

Trace elements such as Mg, Ca, Fe, Cu, Zn, Se, etc. plays vital roles in biological systems such as, providing membrane potential, regulation of cell volume, cell proliferation or participation in apoptosis mechanisms [9-12]. In addition to this, the antimicrobial activities of some trace elements are known [11, 12]. Although the antifungal effectiveness of fig tree latex has been known for years, there are no studies on active compounds that cause this activity. In our study, we aimed to examine the trace elements found in fig tree latex and reveal the elements that may cause or support this antifungal activity.

In our study, the minerals, trace and toxic element levels in fig tree latex were examined, and the elements with the highest concentrations were found as Mg, Ca and P, respectively. There are studies in the literature regarding the antifungal effectiveness of some trace elements, particularly magnesium oxide. Karimiyan et al. investigated the antifungal activity of magnesium oxide, zinc oxide, silicon oxide and copper oxide

nanoparticles on *C. albicans* in their study and reported that the minimum inhibitory concentration (MIC) value of magnesium oxide nanoparticles against *C. albicans* was higher than 3200 µg/mL. In our study, the magnesium ratio in fig tree latex was found to be 2989 µg/mL, suggesting that the magnesium concentration may have contributed to the antifungal effect of fig tree latex. In the same study, the MIC values of zinc oxide and copper oxide nanoparticles against *C. albicans* were found to be 200 and 400 µg/mL, respectively, and their antifungal activities were evaluated as higher than magnesium oxide nanoparticles. However, in our study, because the zinc and copper ratios in fig tree latex were detected as very low, it cannot be said that the antifungal effect of fig tree latex we observed in our study was caused by the relevant elements [18].

Kong et al. investigated the antifungal effectiveness of magnesium oxide nanoparticles against *C. albicans* in 2020 and they found the MIC value as 391 µg/mL. Besides, it has been demonstrated that magnesium oxide nanoparticles significantly inhibited the adhesion of *C. albicans* by adhesion experiments ($p < 0.001$). As a result, they reported that magnesium oxide nanoparticles effectively inhibited the growth, adhesion, morphological transformation and biofilm formation of *C. albicans* and mentioned that magnesium oxide nanoparticles may be an effective antifungal candidate [19].

IV. CONCLUSION

In our study, the most common elements found in fig tree latex after Mg were Ca and P, respectively. However, there have been no studies investigating the antifungal efficacy of these two elements in the literature, so it is not possible to compare the antifungal efficacy of the related elements at this stage. More studies are needed in this field in order to evaluate the antifungal potential of other minerals, trace and toxic elements measured in fig tree latex.

In conclusion, fig tree latex has an antifungal potential on *Candida* species and this may be caused by the high level of magnesium that it contains however more studies are needed on the therapeutic use of fig tree latex. Also, according to the results of our in vitro study, before the usage of fig tree latex for antifungal purposes, it is necessary to know which fungal agent it will be used against and to use it at the appropriate concentration for that agent.

REFERENCES

- [1] Pappas, P. G., Kauffman, C. A., Andes, D. R., Clancy, C. J., Marr, K. A., Ostrosky-Zeichner, L., Reboli, A. C., Schuster, M. G., Vazquez, J. A., Walsh, T. J., Zaoutis, T. E., & Sobel, J. D. (2016). Clinical practice guideline for the management of Candidiasis: 2016 Update by the Infectious Diseases Society of America. *Clin. Infect. Dis.*, 62(4), e1–e50.

- [2] Mazu, T. K., Bricker, B. A., Flores-Rozas, H., & Ablordeppey, S. Y. (2016). The mechanistic targets of antifungal agents: An overview. *Mini Reviews in Med. Chem.*, 16(7), 555-578.
- [3] Zhang, L., Dou, X. W., Zhang, C., Logrieco, A. F., & Yang, M. H. (2018). A review of current methods for analysis of Mycotoxins in herbal medicines. *Toxins (Basel)*, 10(2), 65.
- [4] McIntyre, E., Saliba, A. J., Wiener, K. K., & Sarris, J. (2016). Herbal medicine use behaviour in Australian adults who experience anxiety: a descriptive study. *BMC Complement. Altern. Med.*, 16, 60.
- [5] Nadeem, M., & Zeb, A. (2018). Impact of maturity on phenolic composition and antioxidant activity of medicinally important leaves of *Ficus carica* L. *Physiol. Mol. Biol. Pla.*, 24(5), 881-887.
- [6] Hemmatzadeh, F., Fatemi, A., & Amini, F. (2003). Therapeutic effects of fig tree latex on bovine Papillomatosis. *J. Vet. Med. B. Infect. Dis. Vet. Public Health*, 50(10), 473-476.
- [7] Aref, H. L., Salah, K.B., Chaumont, J. P., Fekih, A., Aouni, M., & Said, K. (2010). In vitro antimicrobial activity of four *Ficus Carica* Latex fractions against resistant human pathogens (antimicrobial activity of *Ficus Carica* Latex). *Pak. J. Pharm. Sci.*, 23(1), 53-58.
- [8] Raskovic, B., Lazic, J., & Polovic, N. (2016). Characterisation of general proteolytic, milk clotting and antifungal activity of *Ficus Carica* Latex during fruit ripening. *J. Sci. Food Agr.*, 96(2), 576-582.
- [9] Nizamani, P., Afridi, H. I., Kazi, T. G., Talpur, F. N., & Baig, J. A. (2019). Essential trace elemental levels (zinc, iron and copper) in the biological samples of smoker referent and pulmonary tuberculosis patients. *Toxicol. Reports*, 6, 1230-1239.
- [10] Li, Y., Sun, L., Lu, C., Gong, Y., Li, M., & Sun, S. (2018). Promising antifungal targets against *Candida Albicans* based on ion homeostasis. *Front. Cell. Infect. Microbiol.*, 8, 286.
- [11] Aggarwal, K., Jain, V. K., & Sangwan, S. (2003). Comparative study of Ketoconazole sersus selenium sulphide shampoo in pityriasis versicolor. *IJDVL*, 69(2), 86-87.
- [12] Savi, G. D., Bortoluzzi, A. J., & Scussel, V.M. (2013). Antifungal properties of zinc-compounds against toxigenic Fungi and Mycotoxin. *Int. J. Food Sci. Technol.*, 48, 1834-1840.
- [13] Hana, R., Alzahrani, H. R., Kumakli, H., Ampiah, E., Mehari, T., Thornton, A. J., Babyak, C. M., & Fakayode, S. O. (2017). Determination of macro, essential trace elements, toxic heavy metal concentrations, crude oil extracts and ash composition from Saudi Arabian fruits and vegetables having medicinal values. *Arab. J. Chem.*, 10(7), 906-913.
- [14] Eğil, E., Duman, C., Ünlü, Ö., Demirci, M., Altan Sallı, G., Özdal Zincir, Ö., & Katiboğlu, A. B. (2020). Siyah Havuç, Vişne ve Nar Konsantrelerinin *Streptococcus Mutans*'in Biyofilm Oluşturma Özelliği Üzerine Etkisinin Değerlendirilmesi. *Türkiye Klinikleri J. Dental Sci.*, doi: 10.5336/dentalsci.2020-77374.
- [15] Kılınç, E., Buturak, B., & Ateş Alkan, F. (2020). Level of trace elements in serum and toenail samples of patients with Onychocryptosis (ingrown toenail) and Onychomycosis. *JTEMB.*, 61, 126509.
- [16] Duzgun Ergun, D., Dursun, S., Ergun, S., & Ozcelik, D. (2021). The Association Between Trace Elements and Osmolality in Plasma and Aqueous Humor Fluid in Diabetic Rabbits. *BTER.*, doi: 10.1007/s12011-020-02538-5.
- [17] Ahmed, N. M. Antifungal and Antibacterial activity of Fig Fruit Latexes from two *Ficus* species Plants. 3rd Scientific Conference - College of Veterinary Medicine -University of Tikrit 2,3 May 2016.
- [18] Karimiyan, A., Najafzadeh, H., Ghorbanpour, M., & Hekmati-Moghaddam, S. H. (2015). Antifungal effect of magnesium oxide, zinc oxide, silicon oxide and copper oxide nanoparticles against *Candida albicans*. *Zahedan J. Res. Med. Sci.*, 17(10), e2179.
- [19] Kong, F., Wang, J., Han, R., Ji, S., Yue, J., Wang, Y., & Ma, L. (2020). Antifungal activity of magnesium oxide nanoparticles: effect on the growth and key virulence factors of *Candida albicans*. *Mycopathologia*, 185, 485-494.

Examination of Film Thickness Dependence on Acoustic Impedance of Gold and Chromium Thin Films by Scanning Acoustic Microscopy

Altın ve Krom İnce Filmlerin Akustik Empedansının Film Kalınlığına Bağlılığının Taramalı Akustik Mikroskopisi ile Araştırılması

Bukem TANOREN¹ 

¹ Acibadem University, Department of Natural Sciences, 34752, Istanbul, Turkey

Abstract

Thickness induced changes in acoustic impedance of gold (Au) and chromium (Cr) thin films are studied with scanning acoustic microscopy (SAM). Thin films are produced by thermal evaporation technique on BK7 glass substrates with varying thicknesses between 40 nm to 200 nm. In acoustic impedance (AI) mode, the microscope generates two-dimensional acoustic impedance maps of the thin films and micrometer resolution helps determining the surface defects on these films. On the other hand, acoustic impedance value is found to increase as thickness increases for both Au and Cr thin films indicating increased elasticity, therefore, hardness. The acoustic impedance of Cr thin films were found as 1.901 ± 0.050 MRayl for 40 nm, 1.905 ± 0.045 MRayl for 80 nm, 1.943 ± 0.049 MRayl for 120 nm, 1.964 ± 0.049 MRayl for 160 nm and 1.987 ± 0.052 MRayl for 200 nm. The acoustic impedance of Au thin films were found as 1.725 ± 0.026 MRayl for 80 nm and 1.954 ± 0.047 MRayl for 200 nm. This success achieved by SAM, demonstrates its potential in monitoring thin film surfaces even with very small thicknesses.

Keywords: Acoustic microscopy, gold thin films, chromium thin films

Öz

Altın (Au) ve krom (Cr) ince filmlerin akustik empedansındaki kalınlığa bağlı değişiklikler, taramalı akustik mikroskobu (TAM) ile incelenmiştir. İnce filmler, 40 nm ile 200 nm arasında değişen kalınlıklarda BK7 cam alt tabakalar üzerinde termal buharlaştırma tekniği ile üretilir. Akustik empedans (AE) modunda, mikroskop ince filmlerin iki boyutlu akustik empedans haritalarını oluşturur ve mikrometre çözünürlüğü bu filmlerdeki yüzey kusurlarının belirlenmesine yardımcı olur. Öte yandan, hem Au hem de Cr ince filmler için artan elastiklik yani sertlik nedeniyle, kalınlık arttıkça akustik empedans değerinin arttığı bulunmuştur. Cr ince filmlerin akustik empedansı 40 nm için 1.901 ± 0.050 MRayl, 80 nm için 1.905 ± 0.045 MRayl, 120 nm için 1.943 ± 0.049 MRayl, 160 nm için 1.964 ± 0.049 MRayl ve 200 nm için 1.987 ± 0.052 MRayl olarak bulundu. Au ince filmlerin akustik empedansı 80 nm için 1.725 ± 0.026 MRayl ve 200 nm için 1.954 ± 0.047 MRayl olarak bulundu. SAM ile elde edilen bu başarı, çok küçük kalınlıklarda bile ince film yüzeylerinin izlenmesindeki potansiyelini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Akustik mikroskopisi, altın ince filmler, krom ince filmler

I. INTRODUCTION

Nondestructive thin film characterization methods are required for sub-micrometer dimensions. Particularly, mechanical characterization is fundamental for thin films designed for devices in which they may be subjected to stresses and damaged. X-ray diffraction (XRD) technique [1, 2] can determine the crystallographic structure of a material, while scanning electron microscopy (SEM) [2] and atomic force microscopy (AFM) or atomic force acoustic microscopy (AFAM) [3, 4] obtain two-dimensional structural information in nanometer scale. An alternative imaging modality called scanning acoustic microscopy (SAM) can be used for thin film surface characterizations [5-7].

Thin films are used in many applications such as optoelectronic and photovoltaic systems [8, 9], magnetic storage systems [10] or chemical biosensors [11]. Their electrical or magnetic properties change according to their preparation conditions [12], thickness of the films [5], substrates on which they are grown [3] and also aging [13]. Chromium (Cr), being the first metal investigated as a thin film resistor with no superconductivity even under pressure, and gold (Au), being a unique material with high chemical stability and electrical conductivity especially in porous form [14], gain attention from scientists and therefore, highly examined.

In this study, Cr and Au thin films with varying thicknesses on BK7 substrates were investigated by SAM and AFM. Thin films were grown by chemical vapor deposition on same type of glass substrates to exclude the

Corresponding Author: Bukem TANOREN, Tel: +90532 417 0359, e-posta: bukem.tanoren@acibadem.edu.tr

Submitted: 27.05.2021, **Revised:** 07.07.2021, **Accepted:** 07.07.2021

influence of substrate and concentrate only on thickness of thin film by keeping all parameters the same, except the time of deposition. AFM measurements are done for specifying the morphology and thickness of thin film surfaces. SAM system obtains 2-dimensional maps of 4.8 mm x 4.8 mm area within couple of minutes and without a necessity of a special sample preparation. The acoustic impedance value was found to increase as thickness was increased, denoting an increase in elasticity, in other words, hardness. This achievement is an indication that SAM can be used widely as a mechanical characterization tool for thin film surfaces in the future.

II. MATERIALS AND METHODS

2.1. Thin films

Thin films of Gold (Au) and chromium (Cr) were prepared by thermal evaporation, using Edwards Coating System E306A. BK7 glass substrates were used for thin film preparation and before deposition, they were cleaned first with a chemical detergent, followed by acetone and methanol in an ultrasonic vibrator. The clean substrates were placed on a holder, which was about 10 cm above the source, inside Edwards Coating System, and the evaporation source was placed inside a tungsten boat below the holder, as shown in Figure 1. The raw materials of Au and Cr were heated by resistive heating. During thermal evaporation, the chamber pressure was kept around 7×10^{-6} mbar. The thickness of the films was altered between 40 nm to 200 nm by just changing the evaporation time of the materials, while keeping other parameters exactly the same.

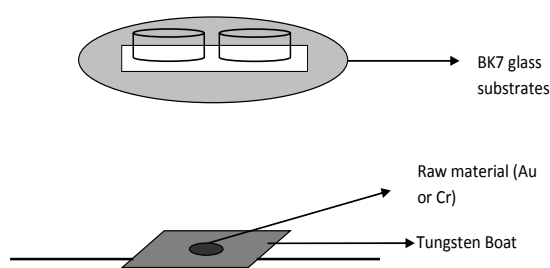


Figure 1. Layout within the evaporation unit.

2.2. Atomic force microscopy

Atomic force microscopy (AFM) measurements were done with Universal Scanning Probe Microscope (USPM) developed by Ambios-Quesant. AFM is performed in tapping mode to avoid surface damage. It has a 250x video microscope, easy change cantilever, a $40 \mu\text{m} \times 40 \mu\text{m} \times 4 \mu\text{m}$ scan tube assembly and Acoustic/Vibration Isolation Chamber (AVIC).

2.3. SAM

In Figure 2, SAM setup is shown. Scanning acoustic microscope (AMS-50SI) was developed by Honda Electronics (Toyohashi, Japan). Acoustic impedance

(AI) mode of SAM is used. Transducer used in SAM has 80 MHz center frequency. Transducer generates the ultrasound signals and also collects the reflected signals. The coupling medium between the quartz lens and the BK7 substrate is distilled water. 2-dimensional maps are obtained by scanning the transducer mounted on the X-Y stage. Consequently, acoustic intensity and impedance maps with 300×300 sampling points are obtained, simultaneously.

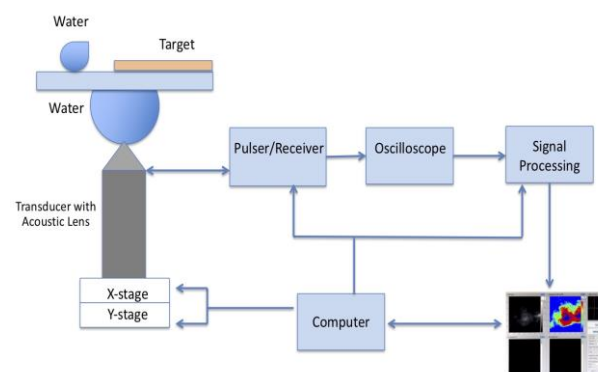


Figure 2. SAM setup in AI mode. Acoustic impedance of the target is obtained by analyzing the signals reflected from water and the target (thin film surface).

The reference material is distilled water. Transducer generates a constant signal S_0 [15]. The target reflects this generated ultrasound signal as

$$S_{target} = \frac{Z_{target} - Z_{sub}}{Z_{target} + Z_{sub}} S_0 \quad (1)$$

Thin film's acoustic impedance is Z_{target} and the substrate's impedance is Z_{sub} . The reference (water) with acoustic impedance Z_{ref} reflects the signal as

$$S_{ref} = \frac{Z_{ref} - Z_{sub}}{Z_{ref} + Z_{sub}} S_0 \quad (2)$$

Finally, the thin film's acoustic impedance is written as

$$Z_{target} = \frac{1 + \frac{S_{target}}{S_0}}{1 - \frac{S_{target}}{S_0}} Z_{sub} \quad (3)$$

III. FINDINGS AND DISCUSSION

Figure 3 shows the representative three-dimensional AFM image of a thin film surface on a BK7 glass substrate, which was prepared as shown in Figure 1. As can be seen in Figure 3, the thickness of Cr thin film is around 40 nm for this sample. The inhomogeneities are also observed but only at the edges of the thin film surfaces. The other thin films with different thicknesses are obtained by only changing evaporation time for the raw source within tungsten boat, keeping all other parameters exactly the same. Chromium and gold thin film surfaces with varying thickness values can also be seen in real photographs in Figures 4 and 5, respectively.

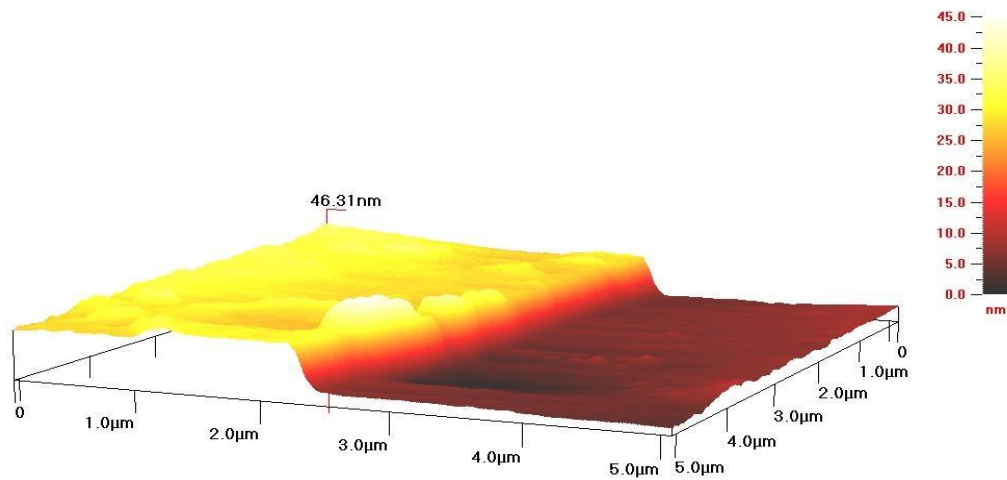


Figure 3. Three-dimensional AFM image of the Cr thin film of thickness of 40 nm.

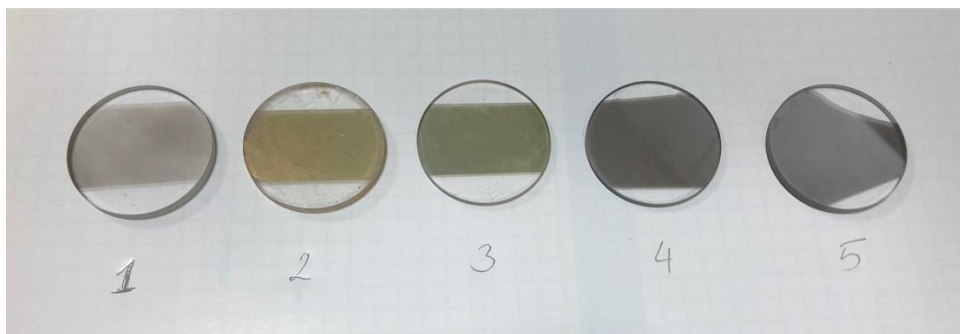


Figure 4. Real photograph of the chromium thin films of thickness of 1) 40 nm, 2) 80 nm, 3) 120 nm, 4) 160 nm and 5) 200 nm.

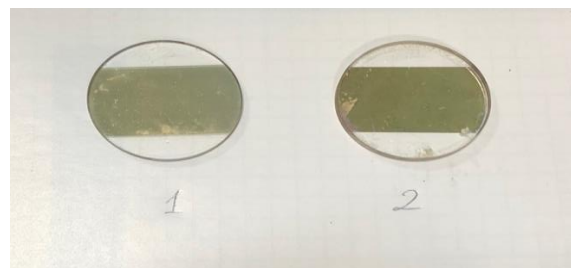


Figure 5. Real photograph of the gold thin films of thickness of 1) 80 nm and 2) 200 nm.

Table 1 summarizes SAM results of Cr thin films. 2-dimensional scans were performed on areas of 4.8 mm x 4.8 mm with 300 x 300 points. The acoustic impedance value was found to increase as thickness was increased as a result of increased hardness and elasticity. Table 2 summarizes SAM results for Au thin films but for only 2 different thickness values, starting from 80 nm, since there was no pronounced acoustic impedance difference between 40 nm-thick and 80 nm-thick films. Similarly, as the film thickness is increased

the surface became more robust and therefore the acoustic impedance increased. Figure 6 shows thickness dependence on acoustic impedance of thin films. In this figure, it is observed that Au films become more stable with higher elasticity as thickness is increased, on the other hand, thickness dependence is more modest for Cr thin films, since Cr is better adsorbed on BK7 surfaces even with a very small thickness value.

Table 1. Thickness dependence of acoustic impedance values of Cr thin films.

Thickness of Thin Films (nm)	Acoustic Impedance (MRayl)
40	1.901 ± 0.050
80	1.905 ± 0.045
120	1.943 ± 0.049
160	1.964 ± 0.049
200	1.987 ± 0.052

Table 2. Thickness dependence of acoustic impedance values of Au thin films.

Thickness of Thin Films (nm)	Acoustic Impedance (MRayl)
80	1.725 ± 0.026
200	1.954 ± 0.047

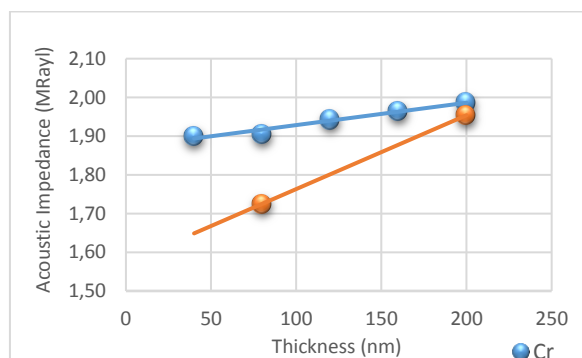


Figure 6. Thickness dependence on acoustic impedance of thin films.

Figure 7, Figure 8 and Figure 9 show acoustic impedance maps of 40 nm-thick, 120 nm-thick and 200 nm-thick Cr films, respectively. SAM obtains 2-dimensional acoustic impedance maps by sending and collecting the reflected ultrasound signals by the same transducer of 80 MHz. As can be observed in Figures 7-9, mean acoustic impedance value increases as thickness is increased more rapidly around 120 nm.

Figure 10 shows acoustic impedance map of 80 nm-thick Au film, while Figure 11 shows acoustic impedance map of 200 nm-thick Au film. The increase in acoustic impedance is obvious when these figures are considered. The inhomogeneous parts probably belong to voids on film surfaces or dirt on substrates.

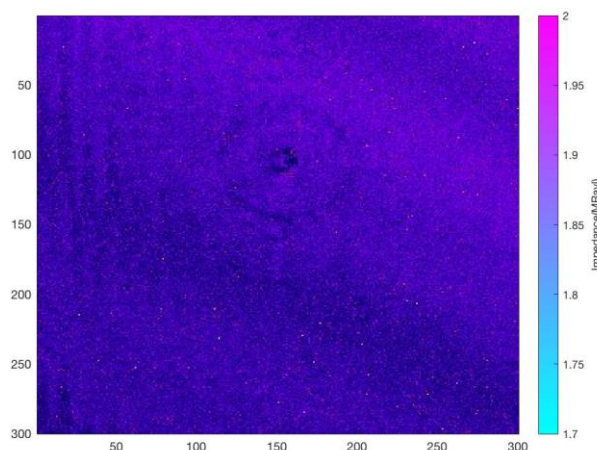


Figure 7. SAM image of the chromium thin film of thickness of 40 nm. Scanning area is 4.8 mm x 4.8 mm.

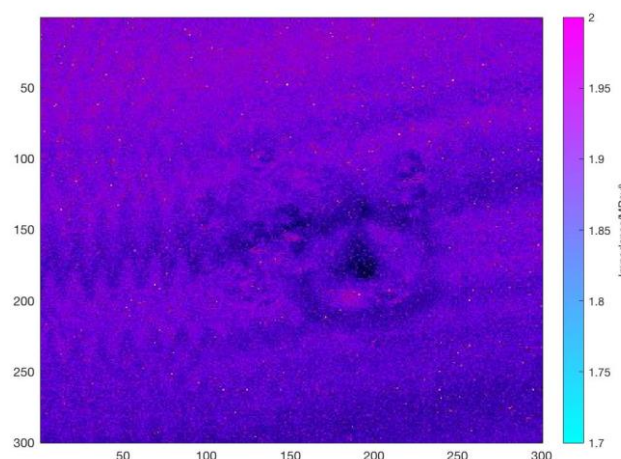


Figure 8. SAM image of the chromium thin film of thickness of 120 nm. Scanning area is 4.8 mm x 4.8 mm.

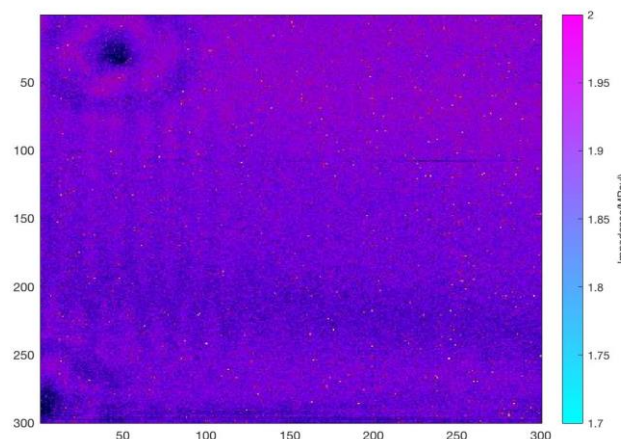


Figure 9. SAM image of the chromium thin film of thickness of 200 nm. Scanning area is 4.8 mm x 4.8 mm.

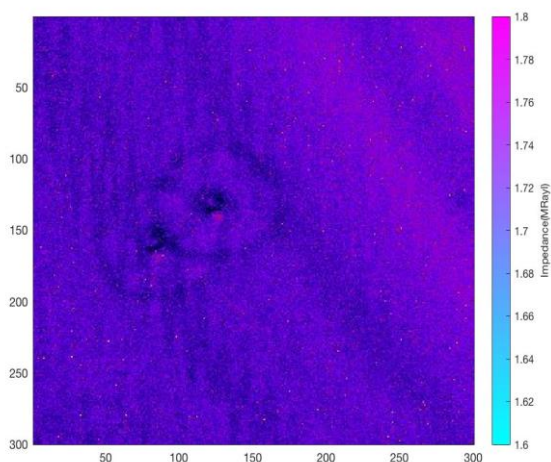


Figure 10. SAM image of the gold thin film of thickness of 80 nm. Scanning area is 4.8 mm x 4.8 mm.

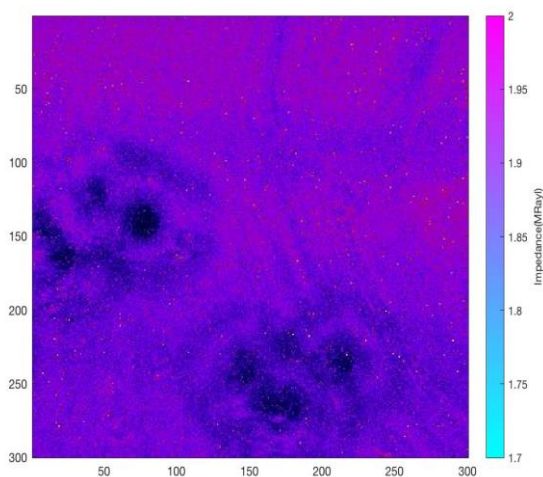


Figure 11. SAM image of the gold thin film of thickness of 200 nm. Scanning area is 4.8 mm x 4.8 mm.

IV. CONCLUSION AND EVALUATIONS

In this study, SAM monitored thin films of Cr and Au grown on BK7 substrates. The films consist of either Cr or Au. Surface morphology of films were also assessed with AFM measurements. Figure 3 illustrates one representative three-dimensional AFM image of 40 nm-thick Cr thin film surface on a BK7 glass substrate. As can be seen in Figure 3, thin film surfaces are almost smooth with inhomogeneities at the edges, therefore, SAM measurements were performed on homogenous parts of all thin film surfaces. As thickness changed the surface morphology of the deposited films also changed, which can be observed in real photographs of film surfaces (Figure 4 and Figure 5). As can be seen in these figures, the color of the surfaces varies with thickness, indicating varying light wavelength the surface absorbs. In other words, by adjusting thin film thickness, optical properties can be tuned and this

flexibility has made thin films useful as optoelectronic materials in many applications [16, 17].

Figure 6 shows the thickness dependence on acoustic impedance of thin films. For Au films, increase in acoustic impedance value is prominent, indicating a more pronounced elasticity with thickness increase. This may be a result of the difference in adsorption properties of Au and Cr films on BK7 substrates, since Cr layers are being used to increase adhesion of Au layers on polymer surfaces [18].

Two-dimensional SAM images were constructed by reflecting ultrasound signals from both surfaces of reference and thin film. In Figures 7-11, few defects with different elasticity were observed on the surfaces by different acoustic impedance values. Two-dimensional scanning with SAM provided information about the morphology and mechanical behaviour of thin film surfaces with micrometer resolution. Mean value of acoustic impedance of thin film surface was calculated over an area of 4.8 mm x 4.8 mm for each sample examined and shown in Table 1 and 2 for Cr and Au, respectively. Standard deviations, which are probably due to voids on film surfaces or dirt on substrates, were less than 3%.

The increase in acoustic impedance as thickness is increased describes the increase in hardness of thin film surfaces. 200 nm-thick Cr and Au surfaces obtain the highest acoustic impedance values due to increased elasticity, while they also become more robust physically, which supports SAM results. Success of SAM in monitoring the thin film surfaces is of great importance, since it is quick, does not require a special preparation technique and has a micro-meter lateral resolution [19-21]. Besides, the resolution may be further increased with a higher frequency transducer [22, 23]. However, with 80 MHz transducer SAM has a resolution of 17 μm with a moderate price.

In this study, SAM characterized Cr and Au thin film surfaces of varying thicknesses between 40 nm to 200 nm. Acoustic impedance maps analyzed surfaces two-dimensionally and average acoustic impedance values of the surfaces were calculated in couple of minutes. Immediate observation capacity of SAM with a moderate price makes this modality a very good candidate for surface analyses. SAM on probe is definitely a consideration for a future study and will be useful in many other applications in addition to electro-optic applications.

ACKNOWLEDGMENT

This study was funded by the Ministry of Development of Turkey (grant number 2009K120520).

REFERENCES

- [1] Coppa, B.J., Fulton, C.C., Kiesel, S.M., Davis, R.F., Pandarinath, C., Burnette, J. E., Nemanich, R.J., & Smith, D. J. (2005). Structural, microstructural, and electrical properties of gold films and Schottky contacts on remote plasma-cleaned, n-type ZnO{0001} surfaces. *J. Appl. Phys.*, 97, 103517.
- [2] Catledge, S.A., Vaid, R., Diggins, IV P., Weimer, J.J., Koopman, M., & Vohra, Y.K. (2011). Improved adhesion of ultra-hard carbon films on cobalt–chromium orthopaedic implant alloy. *J. Mater. Sci. :Mater. Med.*, 22, 307–316.
- [3] Udachan, S.L., Ayachit, N.H., & Udachan, L.A. (2019). Impact of substrates on the electrical properties of thin chromium films. *Ing. Univ.*, 23(2).
- [4] Hurley, D.C., Shen, K., Jennett, N.M., & Turner, J.A. (2003). Atomic force acoustic microscopy methods to determine thin-film elastic properties. *J. Appl. Phys.*, 94, 2347.
- [5] Kim, M., Choi, N., Kim, Y., & Lee, Y. (2018). Characterization of RF sputtered zinc oxide thin films on silicon using scanning acoustic microscopy. *J. Electroceram.*, 40, 79–87.
- [6] Guzelcimen, F., Tanoren, B., Cetinkaya, C., Donmez Kaya, M., Efker, H.I., Ozen, Y., Bingol, D., Sirkeci, M., Kınacı, B., Unlu, M.B., & Özçelik, S. (2020). The effect of thickness on surface structure of rf sputtered TiO₂ thin films by XPS, SEM/EDS, AFM and SAM. *Vacuum*, 182, 109766.
- [7] Passeri, D., Bettucci, A., & Rossi, M. (2010). Acoustics and atomic force microscopy for the mechanical characterization of thin films. *Anal. Bioanal. Chem.*, 396, 2769–2783.
- [8] Kumar, K.D.A., Ganesh, V., Shkir, M., AlFaify, S., & Valanarasu, S. (2018). Effect of different solvents on the key structural, optical and electronic properties of sol–gel dip coated AZO nanostructured thin films for optoelectronic applications. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, 29, 887–897.
- [9] Tait, J.G., Merckx, T., Li, W., Wong, C., Gehlhaar, R., Cheyins, D., Turbiez, M., & Heremans, P. (2015). Determination of Solvent Systems for Blade Coating Thin Film Photovoltaics. *Adv. Funct. Mater.*, 25(22), 3393-3398.
- [10] Koumoulos, E.P., Markakis, V., Tsikourkitoudi, V.P., Charitidis, C.A., Papadopoulos, N., & Hristoforou, E. (2015). Tribological characterization of chemical vapor deposited Co and Co₃O₄ thin films for sensing reliability in engineering applications. *Tribol. Int.*, 82(A), 89-94.
- [11] Arya, S.K., Saha, S., Ramirez-Vick, J.E., Gupta, V., Bhansali, S., & Singh, S.P. (2012). Recent advances in ZnO nanostructures and thin films for biosensor applications: Review. *Anal. Chim. Acta*, 737, 1-2.
- [12] Sawabu, M., Ohashi, M., Ohashi, K., Miyagawa, M., Kubota, T., & Takanashi, K. (2017). The electrical resistivity of epitaxially deposited chromium films. *J. Phys.:Conf. Ser.*, 871, 012002.
- [13] Raghavan, R., Harzer, T.P., Djaziri, S., Hieke, S.W., Kirchlechner, C., & Dehm, G. (2017). Maintaining strength in supersaturated copper–chromium thin films annealed at 0.5 of the melting temperature of Cu. *J. Mater. Sci.*, 52, 913–920.
- [14] Zhang, R., & Olin, H. (2014). Porous Gold Films—A Short Review on Recent Progress. *Materials*, 7, 3834-3854.
- [15] Kobayashi, K., Yoshida, S., Saijo, Y., & Hozumi, N. (2014). Acoustic impedance microscopy for biological tissue characterization. *Ultrasonics*, 54, 1922–1928.
- [16] Dhindsa, N., Walia, J., Pathirane, J.M., Khodadad, Wong, I.W.S., & Saini, S.S. (2016). Adjustable optical response of amorphous silicon nanowires integrated with thin films. *Nanotechnology*, 27, 145703.
- [17] Kats, M.A., & Capasso, F. (2014). Ultra-thin optical interference coatings on rough and flexible substrates. *Appl. Phys. Lett.*, 105, 131108.
- [18] Putz, B., Schoeppner, R.L., Glushko, O., Bahr, D.F., & Cordill, M.J. (2015). Improved electro-mechanical performance of gold films on polyimide without adhesion layers. *Scr. Mater.*, 102, 23-26.
- [19] Kobayashi, K., Yoshida, S., Saijo, Y., & Hozumi, N. (2014). Acoustic impedance microscopy for biological tissue characterization. *Ultrasonics*, 54, 1922-1928.
- [20] Saijo, Y., Miyakawa, T., Sasaki, H., Tanaka, M., & Nitta, S. (2004). Acoustic properties of aortic aneurysm obtained with scanning acoustic microscopy. *Ultrasonics*, 42, 695-98.
- [21] Miura, K., Nasu, H., & Yamamoto, S. (2013). Scanning acoustic microscopy for characterization of neoplastic and inflammatory lesions of lymph nodes. *Sci. Rep.*, 3, 1255.
- [22] Masugata, H., Mizushige, K., Senda, S., Kinoshita, A., Lu, X., Sakamoto, H., Sakamoto, S., & Matsuo, H. (1999). Tissue characterization of myocardial cells by use of high-frequency acoustic microscopy: differential myocyte sound speed and its transmural variation in normal, pressure-overload hypertrophic, and amyloid myocardium. *Angiology*, 50(10), 837-845.
- [23] Saijo, Y., Sasaki, H., Sato, M., Nitta, S., & Tanaka, M. (2000). Visualization of human umbilical vein endothelial cells by acoustic microscopy. *Ultrasonics*, 38, 396-399.