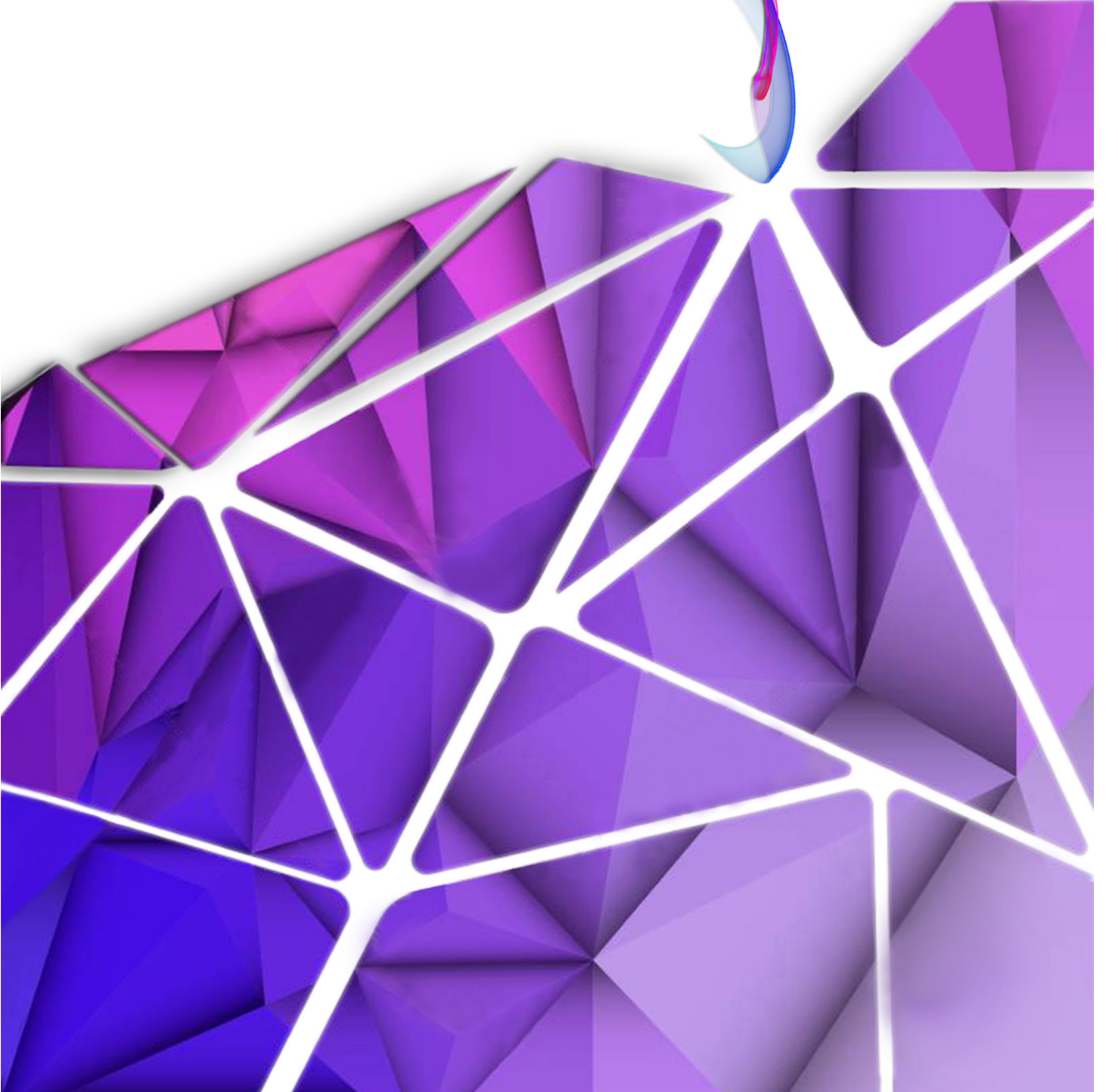


2020, Cilt1 Sayı2

İLERİ MÜHENDİSLİK ÇALIŞMALARI VE TEKNOLOJİLERİ DERGİSİ





İÇİNDEKİLER

Serhat YILMAZ Sadettin Burak KILCI	6 Serbestlik Dereceli Sualtı Aracı ve Manipülator Sistemi ile Görüntü İşleme Uygulamaları Image Processing Applications for 6 Degrees of Freedom (DOF) Underwater Vehicle and Manipulator System	63-79
Ömür ÇİMEN Erhan KELEŞ	Yüksek Plastisiteli Bir Kilin Mühendislik Özelliklerine Uçucu Kül ve Kireç Katkılarının Etkisi The Effect of Fly Ash and Lime Additives on the Engineering Properties of a High Plasticity Clay	80-90
Muhammed Oğuz TAŞ Semih ERGİN	Detection of the Brain Tumor Existence Using a Traditional Deep Learning Technique and Determination of Exact Tumor Locations Using K-Means Segmentation from MR Images Beyin Tümörü Varlığının Geleneksel Derin Öğrenme Tekniği Kullanılarak Tespiti ve MR Görüntülerinden K-Means Segmentasyonu Kullanılarak Kesin Tümör Konumlarının Belirlenmesi	91-97
Orkun TEKE Tolga DEPCI Aytemis DEPCI	Data Analysis of the Factors Related with Covid-19 Death Ratios: Cases in Spain, Italy, UK, Germany and Portugal Covid-19 Kaynaklı Ölüm Oranlarının Seçili Faktörlerle İlgisine Yönelik Data Analizi: İspanya, İtalya, Birleşik Krallık, Almanya ve Portekiz Örnekleri	98-114
Ahmet Numan KOCACIK Ali Bekir YILDIZ	Kablosuz Güç Transferi Sisteminin Genelleştirilmiş Düğüm Denklemleri ile Analizi Analysis of Wireless Power Transfer System with Modified Nodal Equations Approach	115-122
Raziye BOZKURT Atıla DEMİRÖZ	Kazıklı Radye Temel Boyutlarının Oturma Davranışı Dikkate Alınarak Optimum Tasarımı Optimum Design by Considering the Settlement Behavior of Pile Raft Foundation Dimensions	123-129

İÇİNDEKİLER

Hasan Hüseyin ÇOBAN	A 100% Renewable Energy System: The Case of Turkey In The Year 2050 %100 Yenilenebilir Enerji Sistemi: 2050 Türkiye Örneği	130-141
Ercan ŞENYİĞİT Ahmet ARTUT Selçuk MUTLU Uğur ATICI	Giden Konteynerler İçin Depolama Yeri Belirleme Probleminin Çözümü İçin Yeni Bir Sezgisel Yöntem A New Heuristic Method for Solving The Storage Location Problem for Outbound Containers	142-161
Canan AKIN Fuzuli YAĞMURLU	Akşehir Grabeninin Depremselliği Seismicity of Akşehir Graben	162-170
Ümit ÜNVER Eren ADIGÜZEL Enes DIGÜZEL Süleyman ÇİVİ Khandan ROZHANAİ	Türkiye'deki İklim Bölgelerine Göre Binalarda Isı Yalıtım Uygulamaları Application of Thermal Insulation in Buildings by Climate Zones in Turkey	171-187
Meryem Sena AKKUŞ Sema KARABUDAK	Biyoproses Çalışmalarında Deneysel Tasarım Yönteminin Uygulanması Application of Experimental Design Method in Bioprocess Studies	188-197
İsmail ÇALIKUŞU Esma UZUNHİSARCIKLI Mehmet Bahadır ÇETİNKAYA Uğur FIDAN	Robotic Design and Modeling of Medical Lower Extremity Exoskeletons Robotik Alt Ekstremitte Dış İskeletlerin Modellenmesi ve Tasarımı	198-214

6 Serbestlik Dereceli Sualtı Aracı ve Manipülatör Sistemi ile Görüntü İşleme Uygulamaları

Serhat YILMAZ¹ , Sadettin Burak KILCI² 

¹Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, 41100, Türkiye

²Beykent Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, İstanbul, 34398, Türkiye

Araştırma Makalesi, Geliş Tarihi: 10.09.2020, Kabul Tarihi: 18.11.2020

Özet

Endüstriyel ve askeri alanlarda, akıllı sistemler ve robotik uygulamaları giderek önem kazanmaktadır. Deniz robotiği ve sualtı araçları üzerine olan araştırmalar, robot kolu ve bunun sualtında bize sağladığı pozitif etkiler üzerine yoğunlaşmaktadır. Örneğin, batık araştırması, çevresel analizler, arkeolojik araştırmalar, sualtında örnek toplama işlemleri, gemi altı incelemesi ve tamiratında sualtı araçları kullanılmaktadır. Bu çalışmada, insanın ulaşamayacağı ya da ulaşmakta güçlük çektiği sualtı işlemlerinde kullanılması amaçlanan sualtı araçları için 2 eksenli robot kol (manipülatör) prototipi tasarlanmıştır. Prototip, Rotasyonel-Rotasyonel (RR) hareketi yapmaktadır. 4 serbestlik dereceli bir sualtı aracına entegre edilmiştir ve uçta bulunan kısıkaç ile cisimi kavrayabilmektedir. Manipülatör hareketi, kavranacak nesneyle uç işlevci arasındaki mesafenin kameradan görsel geri bildirim aracılığıyla yapılmaktadır. Bunun için gerekli görüntü işleme yazılımı, Raspberry Pi 3 geliştirme kartı üzerinde C Programlama dilinde OpenCV kütüphaneleri kullanılarak hazırlanmıştır. Kameradan alınan görüntü, RGB-HSV dönüşümü ile üzerinde görüntü işleme yapılacak formata dönüştürülmüştür. Aracın kameradan alınan gerçek zamanlı veriler ışığında, verilen bir görevi otonom olarak yerine getirmesi hedeflenmiştir. Arama, bulma ve cisim kavrama süreçleri için uygun algoritmalar hazırlanmıştır. Su üstü testlerinde kameradan alınan gerçek zamanlı görüntü ile renk bilgisine dayalı olarak nesne ve konum tespiti yapılmıştır. Manipülatör, oransal denetim yöntemi ile otomatik olarak ilerleyerek kendinden 20 cm uzaktaki bir nesneyi 20 sn içinde yakalamıştır. Sualtı testlerinde nesne yakalamada sorunlar yaşanmıştır. Ancak hazırlanan sistem altyapısı üzerinde daha uygun kameralar kullanılarak başarıyı arttırmak mümkündür.

Anahtar Kelimeler: RGB-HSV dönüşümü, Sualtı robotları, İki eksenli manipülatör.

Image Processing Applications for 6 Degrees of Freedom (DOF) Underwater Vehicle and Manipulator System

Abstract

Robotics applications have been gaining considerable prominence in military and industrial fields. Researches on marine robotics and underwater vehicles focus on the benefits of use of the robot arm and its underwater applications. For instance; underwater vehicles can be used for shipwreck research, environmental analysis, archaeological research, underwater specimen collection and sub-ship inspection. In the study, the 2-axis robot arm (manipulator) prototype has been implemented for underwater vehicles that are intended to be used in underwater operations that people cannot

¹Sorumlu yazar serhaty@kocaeli.edu.tr, ²burakkilci1@gmail.com

reach or have difficulty in reaching. The prototype performs Rotational-Rotational (RR) movement. It is integrated into a 4 degree of freedom underwater vehicle and can grasp by the gripper end effector located in front of the vehicle. The manipulator movement is fulfilled by visual feedback of the error from the target to be grasped to the end-effector with a camera. The image processing software required for this process has been prepared by using OpenCV libraries in the C programming language on the Raspberry Pi 3 development board. The image taken from the camera has been converted by RGB-HSV conversion into the format on which the image will be processed. The vehicle is aimed to perform an assigned task autonomously refer to real-time data from the camera. Appropriate algorithms have been prepared for searching, discovering and gripping an object. In surface tests, an object and its location were determined based on color information with real time image taken from the camera. The manipulator moved automatically with the proportional control method and capture the object 20 cm away from itself within 20 seconds. There have been problems with object capturing during underwater tests. However, it is possible to increase the performance by using more suitable cameras on the prepared system infrastructure.

Keywords: RGB-HSV transformation, Underwater vehicles, Biaxial manipulator.

1. GİRİŞ

İnsan hareketlerini tekrar edebilen ve benzer mekanik yapıları olan robotların üretimi ve geliştirilmesi günümüzün en önemli çalışma konularından biri olmuştur (Adar, Ören ve Kozan, 2013). Endüstriyel ve insansız robotlar üzerine yapılan araştırma ve geliştirme çalışmaları sayesinde, üretim kalitesi, verimliliği ve üretim robotlarının kontrol hassasiyeti her geçen gün artmaktadır (Conker ve Karaca, 2019). Robot manipülörlerin yapısı ve hareket kabiliyeti insan kol hareketlerine giderek yaklaşmaktadır ve bu konu üzerinde çalışmaların yoğunlaştığı gözlemlenmektedir (Michalec, 2011). Robotlara insan duyularına benzer özellikler kazandırabilmek için algılayıcılar kullanılmıştır (Kanda vd., 2002). Bu şekilde robotlar giderek daha yetenekli hale gelmektedir. Endüstri 4.0 ve Nesnelerin İnterneti (IOT) gibi gelişmelerle beraber evlerde, sokaklarda, fabrikalarda yani hayatımızın çoğu yerinde akıllı nesnelere ve bu nesnelere haberleşebilen mobil cihazlar olacaktır. Bununla beraber sanayideki insan gücüne duyulan ihtiyaç azalarak yerlerini robotlara bırakacaktır.

Sualtı aracı ile robot kolunun entegrasyonu su altında yapılan işleri oldukça kolaylaştırmıştır (Aras vd., 2017). Örneğin batık araştırması, çevresel ve arkeolojik araştırmalar, su altında örnek toplama işlemleri ve gemi altı tamirati gibi insan kabiliyetlerinin kimi zaman yetersiz kaldığı durumlarda sualtı araçları kullanılabilir. Günümüzde, çok derinlerde kullanılabilen, bir veya daha fazla manipülatörle donatılmış Uzaktan Kumandalı Araçlar (ROV) üzerinde çalışılmaktadır (Antonelli, 2014). Robot manipülatörler, giriş gerilim ve akımlarını eşgüdümli olarak ayarlayarak istenen açı, hız veya yönelim çıkışlarını sağlayan birden fazla motor ve sürücü sistemine sahiptir. Bu nedenle çok girişli-çok

çıkışlı (Multi Input-Multi Output -MIMO) sistemlerdir. Bu tip sistemlerin, doğrusal bir modeli oluşturularak kontrol edilmesi oldukça güçtür (Boughdiri vd., 2012; Katibeha, Egthesadb ve Bazargan-Laric, 2016). Bu konuda yapılan bir çalışmada, sualtındaki nesnelerin takibini yapmak ve konumlarını hassas bir şekilde tespit etmek için, sualtı aracı ve robot kolundan oluşan otonom bir sistem tasarlanmıştır. Görüntü işleme ile nesne tespit edilmekte ve araç bulanık mantık yöntemi ile nesneye yaklaşmaktadır. Eklemlerin hızı ve konumu, ters kinematik hesaplamalarla, uç işlevci tam nesneyi tam kavrayacak konuma gelene kadar ayarlanmaktadır (Cai vd., 2020). ROV'lar genellikle gemi ve uçak batıklarının, sualtı tünel ve mağaralarının araştırılmasında kullanılır. Bu nedenle dar alanlarda geniş dönüş açısına sahip olmaları gerekir. Klasik ROV'lar bu şartlarda çalışamaz. Bunun önüne geçebilmek için yapılan bir çalışmada, yazarlar ağırlık merkezini ayarlayarak yüksek manevra kabiliyetine ulaşan küçük boyutlu yeni tip bir ROV tasarlamıştır (Tolstonogov vd., 2019). Başka bir çalışmada, sualtındaki nesne görüntüsü karadaki operatöre yollanmaktadır. Operatörün kol hareketi görüntü işleme metodları ile algılanıp manipülör eklemlerindeki açı hareketleri ile eşleştirilmekte ve nesne kavranmaktadır (Hu vd., 2019).

Araçların daha bağımsız çalışabilmesi ve ROV operatörlerinin, su altında kaynak yapmak, vana açıp kapamak gibi tekrarlayan görevlerini azaltmak için sualtı aracı ve robot kolundan oluşan otonom sistemlere ihtiyaç artmıştır. Otonom sualtı aracı (OSA) ve manipülatörden oluşan bir sistemin dinamik modeli ve benzetimi, OSA ve manipülatörün ayrı ayrı modüller şeklinde modellenip birleştirilmesi ile elde edilebilir. Yerçekimi, sürüklenme ve kaldırma kuvvetleri ile yalpa, yunuslama ve yönelme momentlerinin araç ve kol

kütlelerinin hızlarına etkisi bilgisayar ortamında gözlenerek aracın yaklaşık dinamik davranışı kestirilebilir. Büyük sualtı araçlarında bağlantı etkileri önemsiz olabilir. Ancak küçük araçlarda denetleyici geliştirirken kol hareketinin ana gövde üzerine etkileri dikkate alınmalıdır (Periasamy, Asokan ve Singaperumal, 2012).

Sualtı aracından görüntü alma, akustik olarak iletme ve görüntü işleme işlemleri bu alanda yer bulan diğer bir çalışma konusudur. Örnek olarak bir çalışmada sualtı aracından alınan görüntüler, Canny Kenar Bulma, Hue, Luma ve Saturasyon algoritmaları kullanılarak iyileştirilmiştir (Manu ve Karthik, 2020). Manipülörlerin belirli bir çalışma uzayı ve izlemesini istediğimiz bir yörüngesi vardır. İstenenleri yerine getirebilmek için eklemlerin ters kinematik hesaplamaları gerekebilir. Bazı çalışmalarda bu hesaplamalar için karmaşık geometrik yöntemleri ve işlem yükü getiren sayısal yöntemleri birleştiren yöntemler önerilmiştir (Routray vd., 2019). Görüntü işleme uygulamalarına yönelik yapılan örnek bir çalışmada ise denizden 100 m derinlikte görüntü işleme yöntemleri ile deniz kabukları tespit edilip araca monte edilen sabit bir kolun vakum sistemiyle toplanmıştır. Burada kol hareket etmemektedir. Bu nedenle aracın, nesnenin tam üstüne gelip sabit kalması zorunludur (Nishida vd , 2019). Benzer bir çalışmada sualtı aracı farklı renkte üç nesneyi referans olarak kendi konumunu tespit etmektedir. Ardından hedefe en küçük kareler yöntemiyle yaklaşarak üzerine monte edilmiş sabit kol ile nesneyi yakalamaktadır (Mangipudi ve Li, 2019).

Bu çalışmada; 4 serbestlik dereceli bir sualtı aracına monte edilmiş 2 serbestlik dereceli manipülör sistemi (SAMS) tasarımı verilmiştir. Manipülör aslında 3 serbestlik derecesine sahiptir ama bu çalışmada kontrol için iki eksen (x-y) kullanmış, yukarı aşağı eksen (z) belirli bir değere ayarlanıp sabit tutulmuştur. SAMS üzerindeki kameradan bir nesnenin tespiti ve manipülör ile nesneye ulaşarak onu yakalama süreçleri kullanılan görüntü işleme ve eksenel denetim algoritmaları üzerinden açıklanmıştır. Manipülörün hareketli olması, sualtı aracının serbestlik derecesini idealde 2 derece daha artırarak nesneye yaklaşma koşullarını daha esnek hale getirmektedir. Araç gövdesi, kontrol kartı ve üzerindeki yazılımlar tasarlanan SAMS'ne özgün olarak hazırlanmıştır. SAMS, üzerinde yeni uygulamalar ve kontrol yöntemleri geliştirmeye açık olarak tasarlanmıştır. Nesnenin sualtında algılanması kısıtlıdır. Suyun kırıcılığı, konum tespitini zorlaştırmaktadır. Stereo kamera kullanılması başarıyı arttıracaktır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Lucky Fin İnsansız Sualtı Aracı

Kocaeli Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği bölümünde geliştirilen Lucky Fin isimli İnsansız Sualtı Aracı iki sephiye, buna ek iki itiş ve manevra motoruna sahip dört serbestlik dereceli sualtı aracıdır. Üzerindeki manipülör ise sağ-sol (y) ve ileri-geri (x) olmak üzere 2 serbestlik derecesine sahiptir (Şekil 1). Araç kontrol kartı üzerindeki Raspberry Pi mini bilgisayarı kameradan gelen görüntüyü işleyerek hedefle uç işlevci arasındaki mesafeyi hesaplamaktadır. Servo motorlar bu mesafe her eksende sıfır olana kadar ileri yönde çalışır ve kol nesneye uzanır. Uç işlevci nesneyi yakalar (Şekil Ek.1)



Şekil 1. Lucky Fin İnsansız SAMS

2.2. Raspberry Pi 3 Model B+

Önerilen sistemde görüntü işleme ve denetim süreçleri, öğrencilerin gömülü sistemler üzerinde yazılım geliştirmeleri için tasarlanmış bir mini bilgisayar olan Raspberry Pi 3 Model B+ (Choy vd., 2020) üzerinde yürütülmektedir (Şekil 2). Bu çalışma kapsamında Raspberry Pi, görüntü geribildirim verisini işleyerek, sualtı aracı üzerine monte edilmiş 2 serbestlik dereceli robot kolunu denetlemiştir. Arduino, kullandığı yüksek seviyeli programlama dili nedeniyle gerek kodlama, gerek uygulama açısından Raspberry Pi'ye göre daha kullanışlı bir geliştirme platformudur. STM tabanlı geliştirme kartları ise değiştirilebilir giriş çıkış adresleri ve düşük maliyeti nedeniyle tercih edilmektedir.

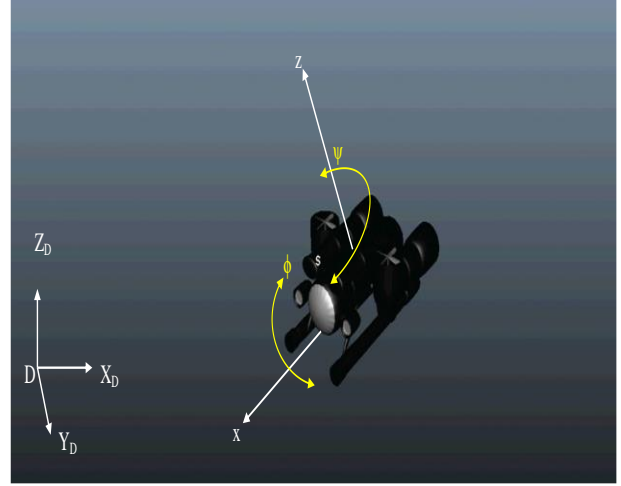


Şekil 2. Raspberry Pi 3 Model B+

Bu uygulamada çok fazla giriş çıkış birimi bulunmamaktadır. PWM adreslerinin sabit olması bir sorun oluşturmamaktadır. Buna karşılık, işlem kapasitesi yüksek bir mini bilgisayar olması, OpenCV kütüphanelerinin kurulabilmesi, bu kütüphane üzerindeki görüntü işleme kütüphanelerine erişim sağlanabilmesi, kameradan alınan verilerin gecikmesiz işlenmesine ve görüntü işleme algoritmalarının kolay yazılmasına olanak sağlamaktadır. 2 eksenli manipülâtörün gerçek zamanlı kontrolü için gerekli yazılım kodları Python dilinde hazırlanmış ve kullanılmıştır.

2.3. Dört Serbestlik Dereceli Sualtı Aracı

Dünya (D) referans çerçevesi ve aracın hareket edebildiği yerel eksenler Şekil 3'te verilmiştir. Araç yatay motorlar aynı hızda çalıştığında x doğrultusunda düzlemsel olarak ilerlemektedir. Farklı hızlarda veya ters yönlerde çalıştığında ise z eksenini etrafında ψ açısız hızıyla ve ψ açısız yer değıştirmesiyle dönmektedir. Aracın dikey motorları aynı hızda çalıştığında z doğrultusunda batmaktadır. Farklı hızlarda veya ters yönlerde çalıştığında ise ρ açısız hızıyla ve ϕ açısız yer değıştirmesiyle x eksenini çevresinde dönmektedir (Tablo. Ek.1).



Şekil 3. Sualtı Aracının Serbest Hareket Ettiği Yönlere

2.4. İki eksenli RR (Rotasyonel-Rotasyonel) Robot Kolu

RR eksenli (eklemlı) robot kolu, 2 ekseninde açısız dönüş yapan bir manipülâtör sınıfıdır. Hareket eksenleri sırasıyla insanın omuz ve dirsek hareketlerine benzer (Şekil 4). Elin kavrama işlevi ise uç işlevci tarafından yapılır (Ataman, 2017). Bu rotasyonel hareketler robot koluna esneklik sağlar, çalışma uzayını genişletir ve hedefe ulaşma süresini kısaltır. Buna karşılık eklemleri harekete geçiren servo motorların her birinin hata payları denetleyicilerden alınan geribildirimlerle düzeltilmelidir (Şahbaz, 2018). Ayrıca her bir eklemin kendi referans çerçeveleri üzerinden birbirine göre bağılı dönüşüm hesaplamaları oldukça karmaşık olduğundan RR tipi robot kollarının etkin olarak denetimi oldukça önemlidir.

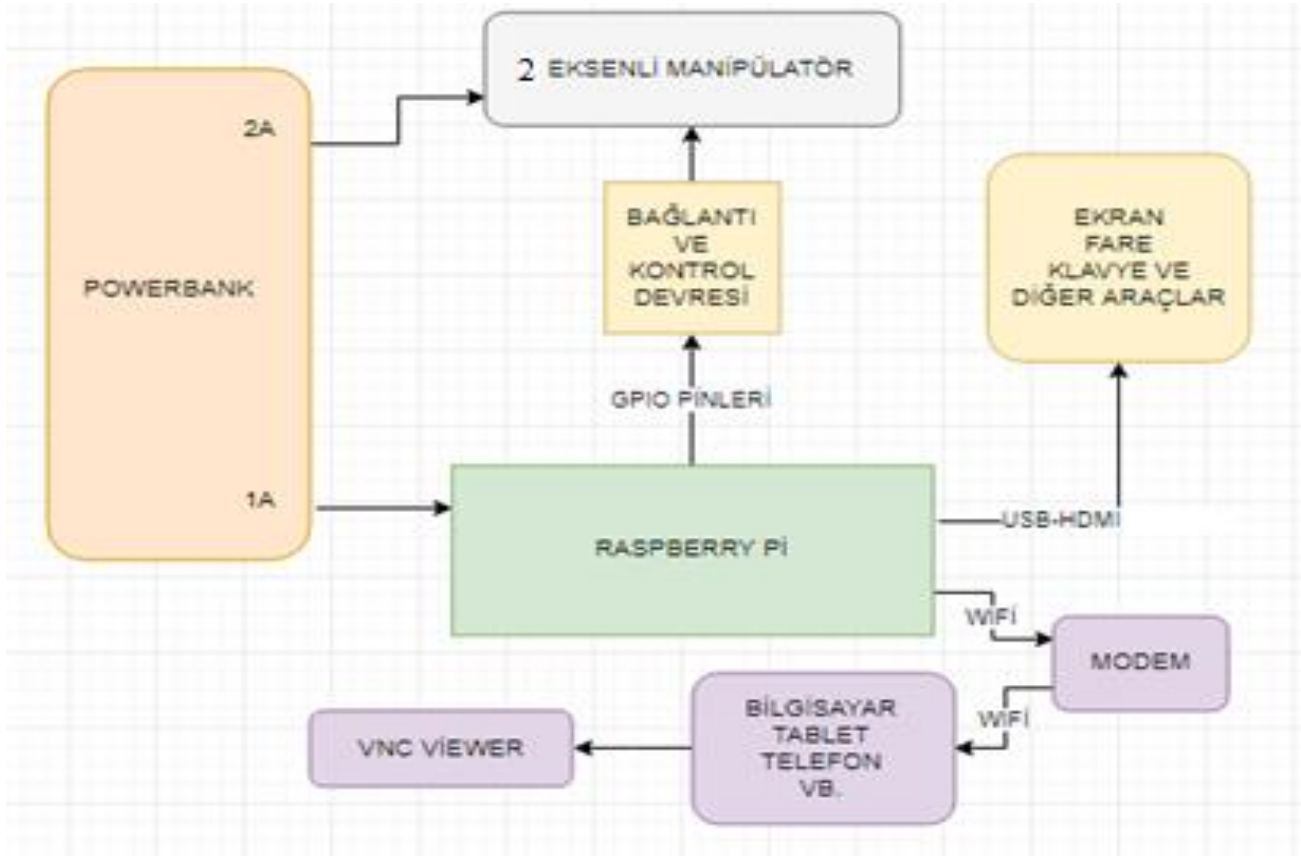


Şekil 4. İki eksenli manipülâtör (Çalışmada 3. eksen kontrol edilmemiştir)

2.5. Manipülâtörün Denetim Şeması

Uygulama aşamasında ilk olarak Raspberry Pi yapılandırılmıştır. Robot kolunda her bir eklemin sırayla hareketini gözlemlemek için servo motorlar önce kademeli biçimde kontrol edilmiştir (Şekil Ek.1). Denetim ve haberleşme işlemleri için üzerinde algılayıcıların, mini bilgisayarın, haberleşme

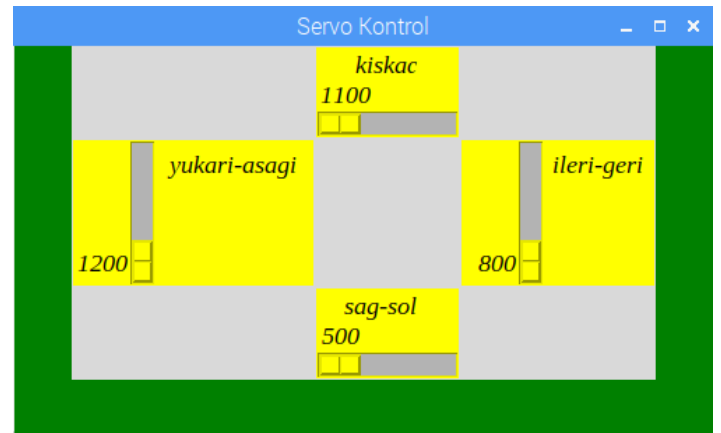
bağlantılarının, motor ve sürücülerinin bulunduğu bir kontrol kartı tasarlanmıştır. VNC Viewer yazılımı ile mikrodenetleyiciye uzaktan erişilebilmektedir. Raspberry Pi 1 A, manipülâtör ise 2 A ile güç kaynağı üzerinden beslenmektedir. Robot Kolu, mikrodenetleyici, güç katı ve bilgisayar bağlantılarının prensip şeması Şekil 5.'te verilmiştir.



Şekil 5. İki eksenli manipülâtör denetim sisteminin şeması

2.6. Sualtı Aracı ve Manipülâtör Sistemi için Grafik Arayüzü Tasarımı

Arayüz, Python dilinde, Tkinter arayüz modülü kullanılarak hazırlanmıştır. Arayüz üzerinde yukarı-aşağı, sağ-sol, ileri-geri ve uç işlevcinin açılıp-kapanmasını sağlayan motor işlevleri oluşturulmuştur. Manuel kontrolde, nesnenin yüksekliği gözle tespit edilebildiği için otomatik kontrolde kullanmadığımız yukarı aşağı eksenini de kullanılmıştır. Yapılandırmalar sonucunda oluşturulan GUI ekranı Şekil 6.'da verilmiştir. Bu arayüz ile araç, kullanıcı tarafından el ile yönlendirilebilmektedir.



Şekil 6. Robot kolu için hazırlanan el ile denetim arayüzü

2.7. Gerçek Zamanlı Görüntü İşleme ile Manipülâtör Denetimi

USB kameradan alınan görüntü üzerinde; kırmızı etiketli kısıkaç ile mavi etiketli nesne arasındaki mesafe, 2 boyutlu imge uzayında piksel bazlı hesaplanmıştır. Bu çalışmada nesne olarak genelde kalem, çubuk gibi, robot uç işlevcisi hangi yükseklikte olursa olsun z (yukarı aşağı) doğrultusunda yakalanabilecek uzunlukta nesnelere seçilmiştir. Kameradan alınan görüntü bir çerçeveye kaydedilir. RGB'den HSV uzayına dönüştürülür. Nesne ve Uç İşlevci önceden tanımlanan renk aralıkları içinde tespit edilir. Nesnenin merkezi ve uç işlevcinin merkezinin konumları arasındaki fark hesaplanır. Aralarındaki mesafe hata olarak kabul edilmiştir. Bu hata oransal olarak azaltılarak belli bir mesafeye gelindiğinde cisim kavranmıştır. Programın PseudoCode'u Şekil 7'de verilmiştir. Görüntüde renklerin HSV renk uzayındaki eşik değerleri belirlenmiştir. Pikseller arası mesafe (Denklem 1)'deki gibi hesaplanabilir (Ataman,2017);

$$|AB| = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (1)$$

Burada mavi ile işaretlenmiş hedefin x eksenindeki koordinatı x_2 ile, kırmızı ile işaretlenmiş uç işlevcinin bu eksenindeki koordinatı x_1 ile ifade edilmiştir. Benzer şekilde mavi hedefin y eksenindeki koordinatı y_2 , kırmızı ile işaretlenmiş uç işlevcinin bu eksenindeki koordinatı y_1 'dir. Kamera, uç işlevci ve nesne arasındaki konum hatasını geri bildirir. Denetleyici, robot kolu uç işlevcisini hareket ettirmek için hata ile orantılı olarak servo motoru çalıştırır. Uç işlevci ilerleyerek referans konum olan, nesneye ulaşır. Hassasiyet ve kesinlik gerektiren kontrol uygulaması yapılmak istendiğinde kapalı çevrim oransal kontrol yöntemi kullanılır. Kullanılan görüntünün köşegen uzunluğunun hesaplanması ve

köşegenin piksel uzaklığına bölünmesi ile 1 pikselin uzunluk değeri hesaplanabilmektedir. Şekil 8.'de bulunan imgeler gösterilmiştir. Bu işlem ile beraber konumu bilinen manipülâtörün nesneye olan gerçek uzaklığı hesaplanabilmektedir. Nesnenin yakalanmasında; hesaplanan mesafe üzerinden iki eksende oransal kontrol yapılır. Öncelikle kolun ana gövdesini taşıyan gövde servo motoru (yazılımda gövde değişkeni ile temsil edilmiştir) z ekseninde etrafında ϕ açısıyla sağ-sol (y) yönünde oransal hareket eder. Yer değiştirme ise z'ye dik olan x-y düzleminde olur.

```

//Kütüphaneleri projeye dahil et
import RPi.GPIO , cv2, time , math...
// Projede kullanılacak kamera kaynağı ve GPIO pinlerini tanımla ve görüntü
// boyutlarını ayarla
cap=cv2.VideoCapture(0)...
Camera 320x240 ayarla
pi=pigpio()// servomotorları sürmek için gerekli kütüphane

// Projede kullanılacak değişkenleri tanımla ve ilk değerlerini ata
Kiskac(uçışlevci servomotorunun içeriği), govde (y ekseninde nesnenin karşısına gelmeyi
sağlayan servomotorun verisi), yukariasagi (bir kez kullanılacak), AB(karesel ortalama hata,
ilerigeri (x ekseninde nesneye ilerleme sağlayan
servomotorun verisi), mesafe2 (y eksenindeki hata), mesafe1 (x eksenindeki hata),
kazanc(oransal kazanç)...

// Kolu başlangıç konumuna getir: GPIO pinlerine bağlı
7. pindeki servo motora kiskac değerinin darbe genişliğinde PWM ver.
11. pindeki servo motora ilerigeri darbe genişliğinde PWM ver.
8. pindeki servo motora yukariasagi değerinin darbe genişliğinde PWM ver.Daha sonra hep
bu yükseklikte kalacak, değişmeyecek),
9. pindeki servo motora govde degerinin darbe genişliğinde PWM ver.

// Programın çalışacağı döngüyü başlat
WHILE AB<1
//Görüntünün güncel karesini (opencv2 ile) yakala
// ve frame değişkenine kaydet
// Görüntüyü orjinal hali ile göster
cv2.imshow('original', frame)
// 25 milisaniye boyunca klavye girdisi bekle
// imgeyi BGR (Blue Green Red) den
// HSV (Hue Saturation Vibrance) renk uzayına dönüştür
hsv=cv2.cvtColor (frame, cv2.Color_BGR2HSV)
//Belirli bir Mavi Eşik değeri belirleyerek hedefin merkez konumunu
//bul, ilgili pixelleri mavi ile maskele
IF BETWEEN lower blue, upper blue, maskblue
ELSE PRINT ('Nesne bulunamadı') ; EXIT
//Belli Kırmızı Eşik değeri belirleyerek uç işlevcinin merkez konumunu bul
lower red, upper red, maskred
// orta noktalarını nokta olarak işaretle
redpoint, bluepoint

//y eksenini boyunca redpoint ve bluepoint in frame içindeki y koordinatlarını bul.range(1:319)
y1=KoordinatRedpoint_y ; y2=KoordinatBluepoint_y
//x eksenini boyunca redpoint ve bluepoint in frame içindeki x koordinatlarını bul.range(1:239)
x1=KoordinatRedpoint_x; x2=KoordinatBluepoint_x
Mesafe2= y2-y1;
Mesafe1= x2-x1;
AB= sqrt(sqr(Mesafe2)+sqr(Mesafe1))
//y ve x eksenindeki servomotorların konumunu oransal kontrolle güncelle (döngüde hata sıfıra
//yaklaşana kadar
Govde=Govde+kazanc*Mesafe2
ilerigeri=ilerigeri+kazanc*Mesafe1

END WHILE

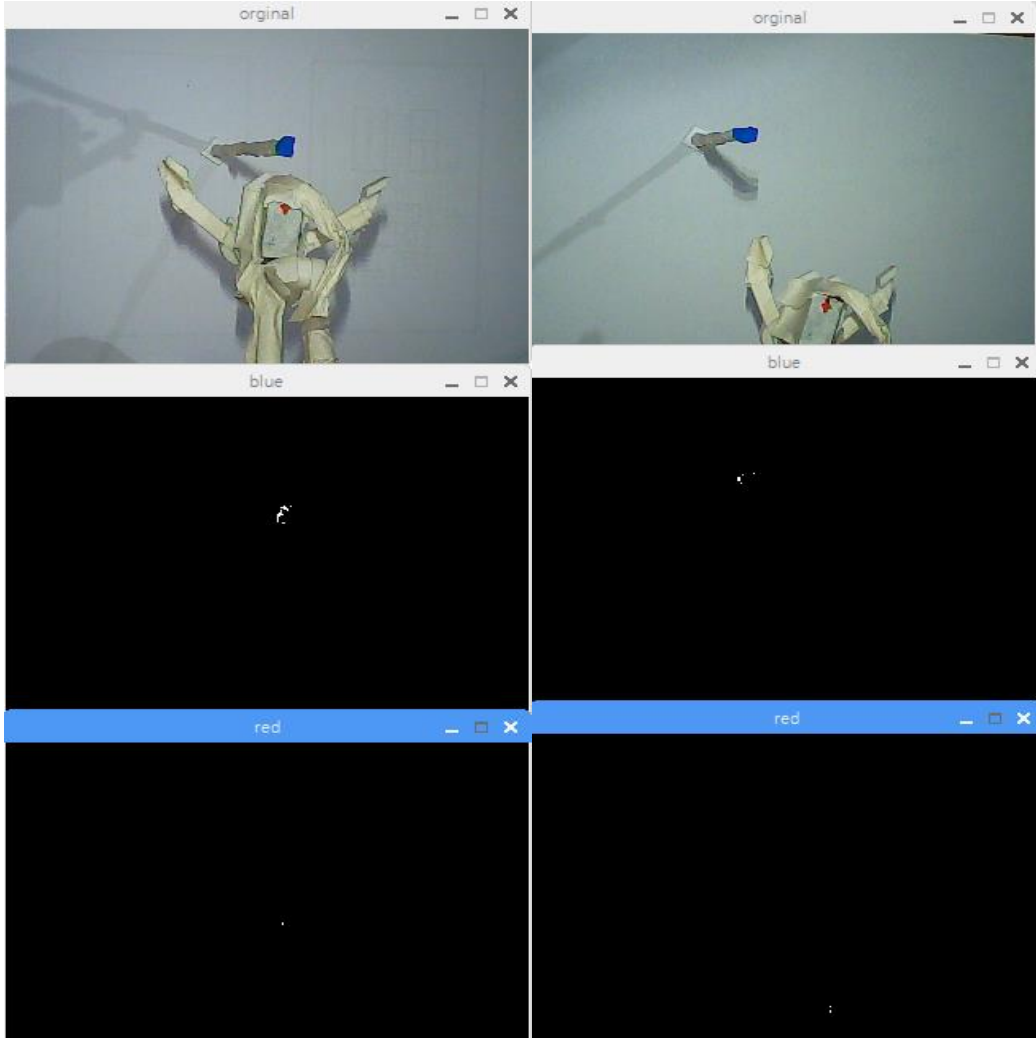
WHILE Akim<Eşik Akım Değeri
Kiskac=kiskac+1
END

```

Şekil 7. Görüntü İşleme ve Oransal Kontrol Programı (Pseudo Code)

Hatanın y bileşeni oransal olarak azalır ve sonunda ortadan kalkar. Diğer yandan dirsek servo motoru (yazılımda ileri-geri değişkeni ile temsil edilmiştir) x doğrultusunda oransal kontrol ile ilerleyerek uç işlevciyi nesneye ulaştırmıştır (Şekil Ek.1). Artık bileşke mesafe

$|AB| = 0$ 'a çok yakın bir değerdir. Burada geri besleme ile oransal kontrol yapılarak nesneye ulaşılmıştır.



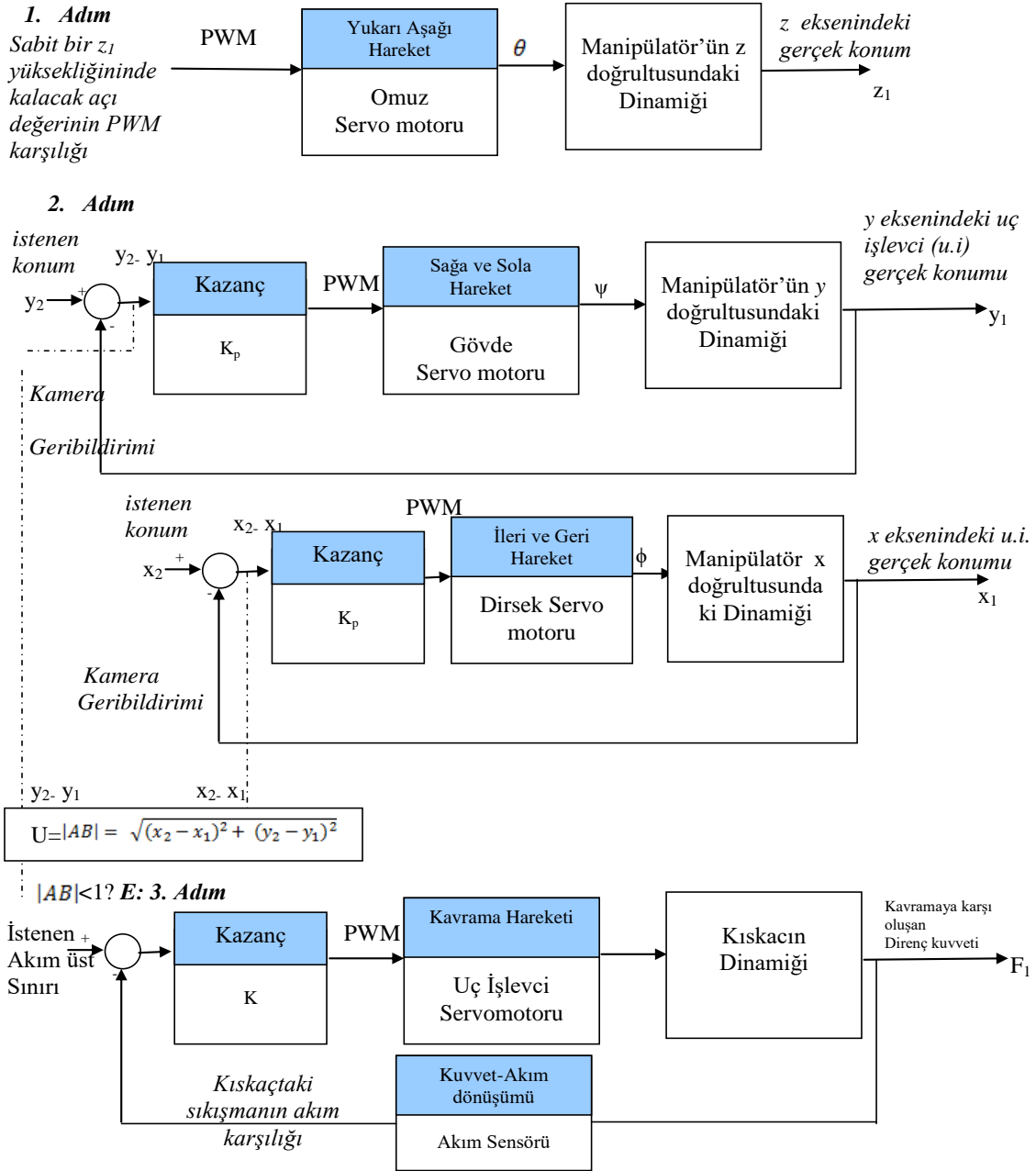
Şekil 8. Tespit edilen imgeler

Uç işlevci bu aşamadan sonra nesneyi yakalar. Bu çalışmada, sualtı aracının kendisi nesne yakalarken hareket halinde değildir. Operatör tarafından getirildiği noktada sabit durmaktadır. Manipülatörün denetim blok şeması Şekil 9 'da verilmiştir:

- 1. Adımda, manipülatör z doğrultusunda belirli bir yüksekliğe ayarlanır.
- 2. Adımda kameradan alınan geribildirime göre y ve x eksenlerinde ilerlenir. x eksenindeki ilerleme için en uygun kazanç değeri, deneme yanılma yolu ile $K_p=0.7$

seçilmiştir. Yüksek K_p değerlerinde uç işlevci nesneye çarpıp düşürmüştür. Düşük değerlerde ise ilerleme yavaş olmuştur. Gövdenin sağ ve sol hareketinde kazanç daha yüksek seçilebilir. Ancak bu çalışmada aynı seçilmiştir.

- $|AB|$ mesafesi 1 pixelin altına inince 3. Adıma geçilir ve kısa nesneyi kavrar. Belirli bir akım sınır değerine ulaşıncaya kadar hata sıfır olur ve kısa servo motoru son PWM değerini korur.



Şekil 9. Sisteme ait kapalı çevirim kontrolü

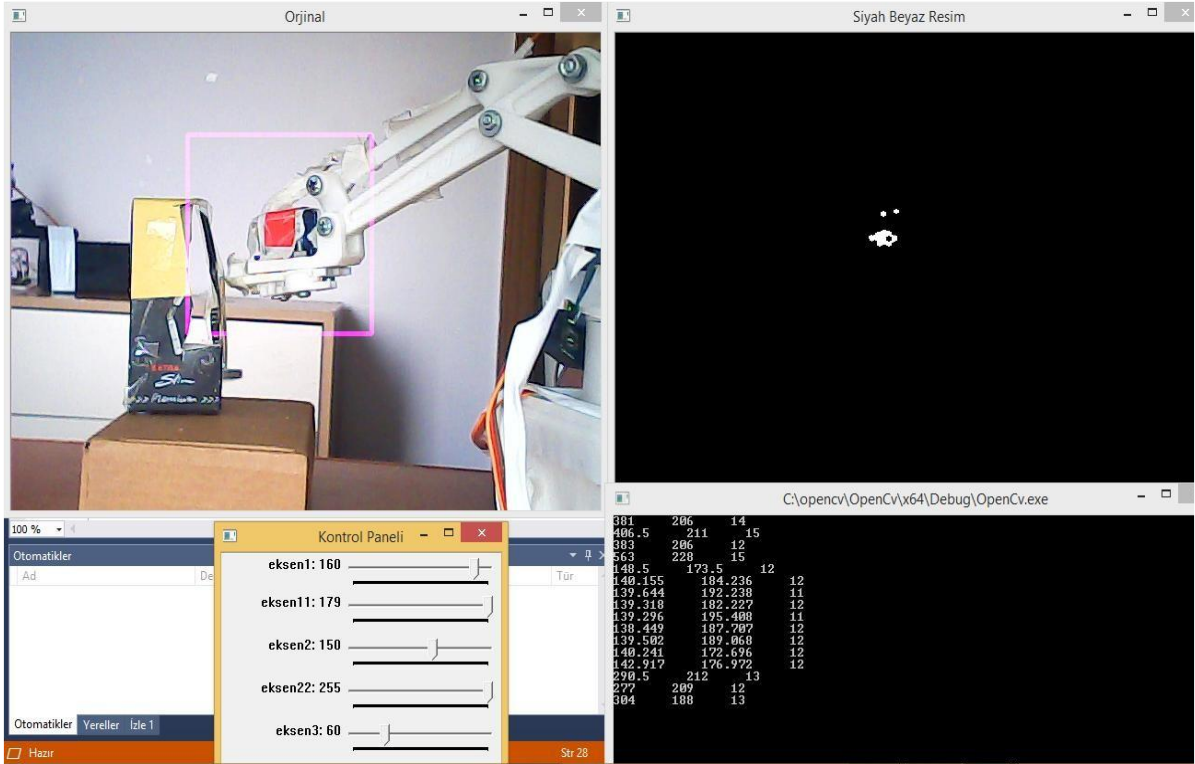
3. BULGULAR

Aynı algoritmayı farklı renkte nesnelere tespit ve yakalama için kullanabilir, aranacak rengi önceden tanımlayarak farklı nesne tespit uygulamaları yapabiliriz. Renk kontrol paneli üzerinden hangi rengin aranacağı ayarlanabilmektedir (Şahbaz,2018). Tespit edilen renkli nesnenin siyah beyaz görüntüsü ekranın sağ üstünde gösterilir. Nesnenin etrafında otomatik olarak pembe bir çerçeve oluşur ve x, y, z koordinatları ise sağ altta gösterilir. Şekil 10'da uç işlevcinin tespiti, Şekil 11'de ise nesnenin tespiti verilmiştir. Uç işlevci ve

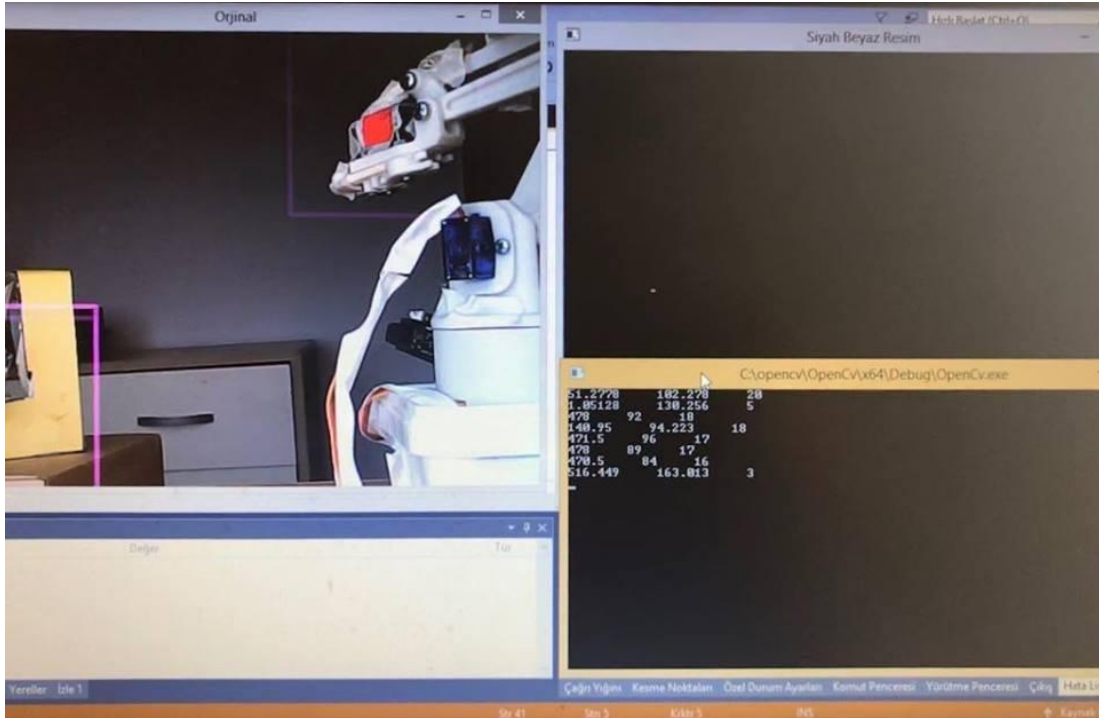
nesne hareket ettirilerek koordinatlarındaki değişim ekranda sayısal olarak raporlanmıştır.

SAMS, uzanabileceği bir mesafe olan 20 cm'e kadar nesneye müdahale etmez. Bu mesafeye kadar sadece ölçüm (tarama) yapar. Bu mesafenin altında, manipülator nesneye yaklaşmaya başlar ve kavrama hareketini gerçekleştirir. x, y, z verileri tespit ettikleri rengin merkezinin o anki koordinatlarını vermektedir. Kontrolde z_1 ve z_2 kullanılmamaktadır. Uç işlevci'den alınan x_1 , y_1 ile nesneden alınan x_2 , y_2 koordinatları arasındaki fark denetim sürecini belirlemektedir.

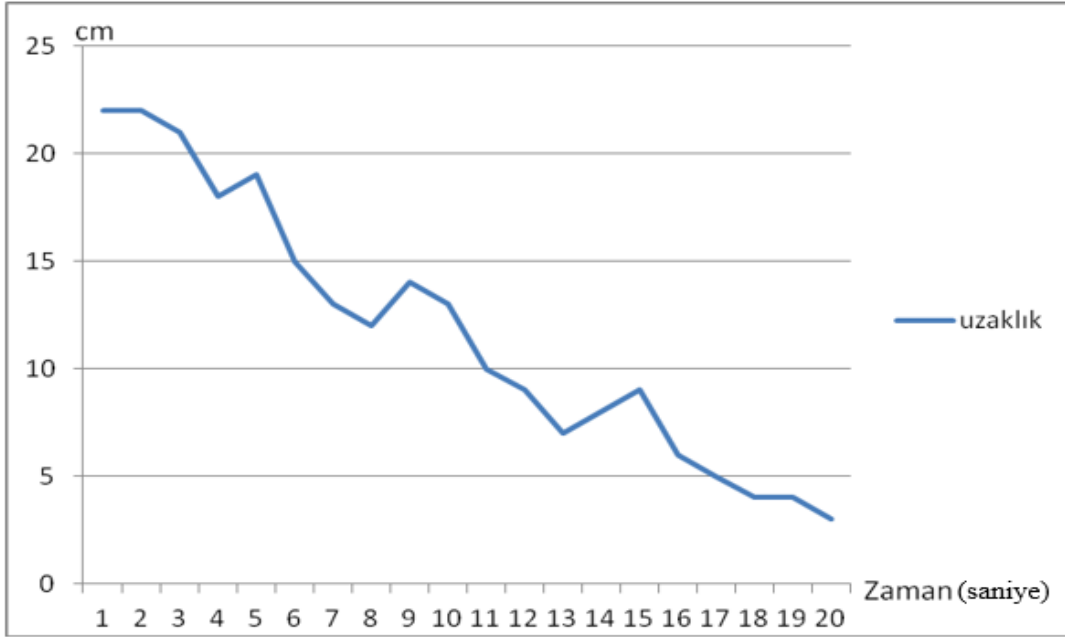
Testler su altında tekrarlanmıştır. Nesne algılanmış, manipülâtör tepki vermiş ancak su üstündeki başarı elde edilememiştir.



Şekil 10. Manipülâtör uç işlevcisinin tespiti ve koordinat bilgileri



Şekil 11. Hedef nesnenin tespiti ve koordinat bilgileri



Şekil 12. Manipülâtörün konumunun zamana bağlı olarak cisme olan $|AB|$ uzaklık değışimi

3.1. Deneysel Sonuçlar

Kameradan alınan görüntünün işlenmesi sonucu elde edilen uzaklık işlemciye aktarılmış ve bu uzaklık verisi kullanılarak cisme otomatik yaklaşım sağlanmıştır. Şekil 12'de işlemciye aktarılan $|AB|$ bileşke uzaklık bilgisinin zamana göre değışimi gözlenmektedir.

Hazırlanan yazılım, hesaplanan mesafe üzerinden y ekseninde robot kolu gövdesine sağ-sol hareketi yaptırırken diğer yandan x doğrultusundaki dirseği ileri-geri doğrultusunda ilerletmektedir (Şekil Ek.1). Burada geri bildirim ile oransal kontrol yapılarak nesneye ulaşılmıştır. Kavrama hareketi, kısıkaç üzerindeki servo motorun çektiği akım belirli bir değeri geçene kadar devam etmiştir. SAMS, dip akıntıları, suyun kaldırma kuvveti gibi akışkan etkilerin bulunduğu sualtı ortamlarında hassas görevleri yerine getirebilmek için hava ortamına göre daha yavaş hareket etmelidir (Şekil Ek.2). Uç işlevimiz olan kısıkaç, kendinde 20 cm kadar uzakta olan bir nesneyi, görüntü işleme ve kontrol algoritmalarını kullanarak su üstü testlerde 20 sn.'de yakalamıştır. Su altında ise kırılmanın farklı olması nedeniyle yakalayamamıştır.

4. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

2 eksenli manipülâtör tasarımı gerçekleştirilmiştir. Manipülâtör sualtı aracına entegre edilmiştir. Görsel

arayüz ekranından manipülâtörün otomatik ilerlemesi izlenmiştir. Sabit bir kameradan alınan gerçek zamanlı görüntü ile nesne tespiti ve yakalanması sağlanmıştır.

Tek kamera kullanılarak yapılan hesaplamalar yerine, paralel konumlandırılmış iki kameradan stereo görüntü oluşturularak derinlik analizi yapılabilir. Böylece nesnenin 3 boyutta konumu hakkında daha sağlıklı sonuçlar alınabilir. Literatür çalışmalarında ağırlıklı olarak şekil bilgisi referans alınarak nesne tespit edilmektedir. Kontrol yöntemi olarak ise bulanık mantık, yapay sinir ağları (YSA) gibi daha yeni kontrol yöntemleri denenmektedir. Bu çalışmada, renk bilgisine dayalı nesne tespiti yapılmıştır. Bu durum, sualtında nadir bulunan ve ayırt edici bir renge sahip nesnenin tespitini kolaylaştırmaktadır. Ancak yöntem, yosun gibi doğal bir örtü ile kaplanmış nesnelere etkin biçimde çalışmayacaktır. Manipülâtör eksenleri PWM girişi ile orantılı açı değeri veren doğrusal bir yapıya sahiptir. PWM girişi ile itici motorlar arasında da doğrusala yakın bir ilişki vardır. Doğrusal sistemlerde bulanık veya YSA denetleyicilerin oransal denetleyicilere göre belirgin bir üstünlükleri bulunmamaktadır. Eklemlerin hızı ve konumu bazı çalışmalarda ters kinematik hesaplamalarla yapılmaktadır. Oransal kontrolün iteratif yapısına göre, eksen konumlarının doğrudan hesaplanması ve ayarlanması önemli bir üstünlüktür.

İleride yapılacak çalışmalarda eksen konumları kinematik hesaplamalarının yapılması planlanmaktadır.

Daha önceden örnek verdiğimiz Nishida vd. (2019)'nin çalışmasında, görüntü işleme yöntemleri kullanılarak sualtı aracı deniz kabuklarının tam üzerine getirilmeye çalışılmıştır. Çünkü yapılan çalışmada nesnelere sabit bir vakum kolu ile toplanmak istenmiştir. Nesneye yaklaşma ve kavrama aşamalarında manipülatörün eksenel açılarının ayarlayabilmesi, sualtı aracına esneklik sağlamaktadır. Yapılan bazı çalışmalarda, operatörün kol hareketleri görüntü işleme veya giyilebilir sanal gerçeklik eldivenleri ile manipülatöre bildirilmektedir. Bu çalışmalar, gelişmiş birer ROV uygulaması olmakla birlikte, operatöre bağımlılığı devam ettirmektedir. Ancak bu çalışmada örüntü işleme ile nesnenin uç işlevciye olan uzaklığının tespit edilmiştir. Buna göre manipülatör uç işlevcisinin otomatik olarak nesneye yaklaşması sağlanmıştır. Bu da sualtı aracının otonomluğunun artmasına katkı sağlamaktadır.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, çalışmaya katkılarından dolayı Halit ATAMAN ve Ali ŞAHBAZ'a teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

Adar, G., Ören, H., ve Kozan, R. (2013). 5 serbestlik dereceli robot kolunun modellenmesi ve kontrolü, SAÜ. Fen Bil. Der. 17(1), 155-160.

Antonelli, G. (2014). Underwater Robots, 3rd ed., Springer International Publishing, Switzerland.

Aras, M.S.M., Aripin, M.K., Nor Azmi, M. W., Khamis, A., Zambri, M. K. M., and Ab Halim, M. F. M. (2017). 3 DOF small scale underwater manipulator-Gripper for unmanned underwater vehicle, Proceedings of the IEEE 7th International Conference on Underwater System Technology: Theory and Applications (USYS), Kuala Lumpur, 123-126.

Ataman, H. (2017). Sualtı Aracı İçin 3 Eksenli Manipülatör Tasarımı, Lisans Bitirme Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Bölümü, 3-4, Kocaeli.

Boughdiri, R., Nasser, H., Bezine, H., M'Sirdi, N. K., Alimi, A. M., and Naamane, A. (2012). Dynamic modeling and control of a multi-fingered robot hand for grasping task, Procedia Engineering, 41, 923- 931.

Cai, M., Wang, Y., Wang, S., Wang, R., Ren, Y., and Tan M (2020). Grasping Marine Products With Hybrid-Driven Underwater Vehicle-Manipulator System, IEEE Transactions On Automation Science And Engineering, 17(3), 1443-1454.

Choy, J. L. C., Wu, J., Long, C., and Lin, Y.-B. (2020). Ubiquitous and Low Power Vehicles Speed Monitoring for Intelligent Transport Systems, IEEE Sensors Journal, Early Access, 1-10.

Conker, Ç., ve Karaca, A. (2019). Bulanık Mantık Esaslı Karar Destek Sistemi ile Robot Elin Kuvvet Kontrolü, DEU FMD 21(62), 433-447.

Çölgeçen, M. C. (2019). Sualtı Aracında Bulanık Mantık Yöntemiyle Derinlik Kontrolü Uygulamaları, Lisans Bitirme Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Bölümü, 21-22, Kocaeli.

Ergan, A. F. (2014). Sualtı Deney Platformu İçin Donanım Ve Kullanıcı Arayüzünün Tasarlanarak Gerçeklenmesi, Y.Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi FBE Elektronik ve Haberleşme AD, 69-70, Kocaeli.

Fossen T. I. (1991). Nonlinear Modelling and Control of Underwater Vehicles, Norwegian Institute of Technology.

Hu, Z., Zhu, X., Tu, D., Zhang, X., and Wang, M. (2019). Manipulator Arm Interactive Control in Unknown Underwater Environment, Proceedings of the 2nd World Conference on Mechanical Engineering and Intelligent Manufacturing (WCMEIM), 494-497, Shanghai, China.

Kanda, T., Ishiguro, H., Ono, T., Imai, M., and Nakatsu R. (2002). Development and Evaluation of an Interactive Humanoid Robot "Robovie", Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics Automation, USA, 1848-1855.

Katibeha, F., Eghtesadb, M., and Bazargan-Laric, Y. (2016). Dynamic modeling and control of a 4 DOF robotic finger using adaptive-robust and adaptive-neural controllers, International Journal of Robotics, 4(4), 51-61.

Kılıcı, S. B., (2020). Dört Serbestlik Dereceli Sualtı Aracının Dinamik Modellenmesi ve Benzetim Çalışmaları, Y.Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi FBE Elektronik ve Haberleşme AD, 36, Kocaeli.

Kulaç, O. (2019). STM32 ile Otonom Araç Kontrolü, Lisans Bitirme Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Bölümü, 14-23, Kocaeli.

Manu, D. K., and Karthik, P. (2020). Development and Implementation of AUV for Data Acquisition and Image Enhancement, International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT), 9(4), 2088-2093.

Mangipudi, C. P., and Li, P. Y. (2019). Vision based Passive Arm Localization Approach for Underwater ROVs Using a Least Squares on SO(3) Gradient Algorithm, Proceedings of the American Control Conference (ACC), 5798-5803, Philadelphia.

Michalec, R. (2011). Modeling and control of multifingered dextrous manipulation for humanoid robot hands. PhD Thesis, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI, Paris, 588.

Nishida, Y., Ahn, J., Sonoda, T., Watanabe, K., Ura, T., Yasukawa, S., and Ishii, K. (2019). Benthos Sampling by Autonomous Underwater Vehicle Equipped a Manipulator with Suction Device, IEEE Underwater Technology (UT), 1-4, Kaohsiung.

Periasamy, T., Asokan, T., and Singaperumal, M. (2012). Investigations on the dynamic coupling in AUV-manipulator system and the manipulator trajectory errors using bond graph method, International Journal of Systems Science, 43(6), 1104-1122.

Routray, S., John, A. T., Syed, A., and Jadhavi P. (2019). Inverse Kinematics Solution for a Robotic Arm Through Geometric and Iterative Fusion Based Modelling, IEEE International Conference on Distributed Computing, VLSI, Electrical Circuits and Robotics (DISCOVER), 1-7, Manipal.

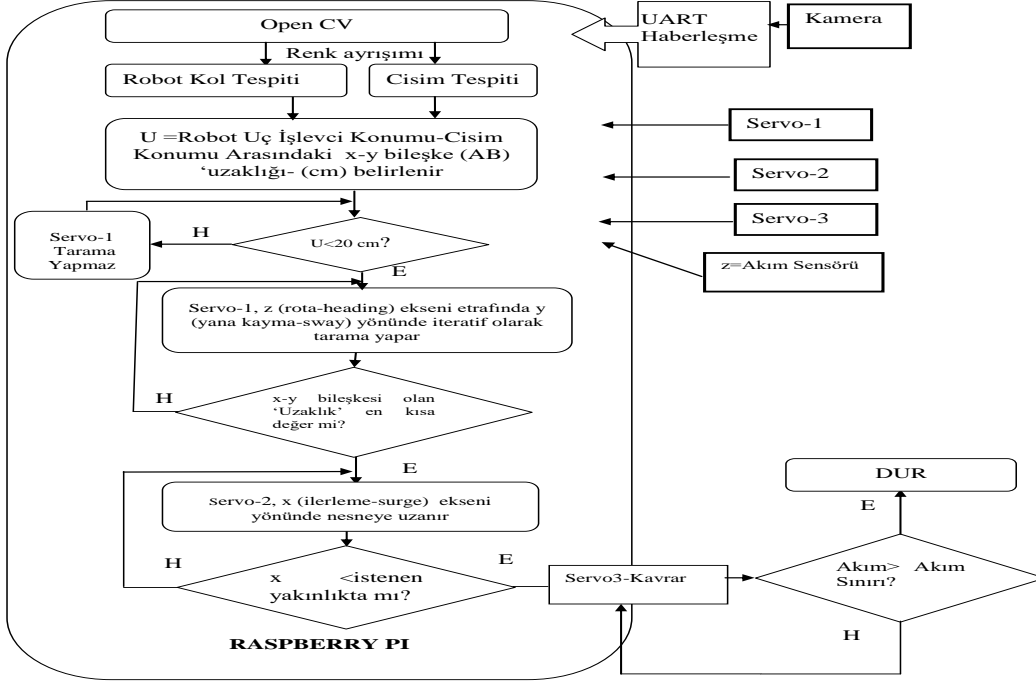
Şahbaz, A. (2018). Sualtı Aracı İçin Manipülâtör Tasarımı, Lisans Bitirme Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Bölümü, 45-52, Kocaeli.

Tolstonogov, A.Y., Dzyaman, M. A., Sebto, A.Y., Filonov, I.V., and Chemezov, I. A. (2019). The compact ROV with Variable Center of Gravity and its Control, IEEE Underwater Technology (UT), 1-7, Kaohsiung, Taiwan.

Yılmaz, S., ve Kılıcı, S.B. (2019). İnsansız Sualtı Araçlarının Kinematik Modellenmesi, Uluslararası Marmara Fen ve Sosyal Bilimler Kongresi, Kocaeli, 550-557.

EKLER

EK A



Şekil Ek 1. Sisteme ait akış şeması



Şekil Ek 2. Kocaeli Üniversitesi Lucky Fin Sualtı Aracı + Manipülatör sisteminin sualtı testleri

EK B

Deneysel çalışmalar sırasında Lucky Fin aracından elde edilen en yüksek hızlar Tablo Ek.1'de verilmiştir (Çölgeçen, 2019; Kulaç, 2019; Kılıcı, 2020; Ergan, 2014).

Tablo Ek 1. Dört Serbestlik Dereceli Lucky Fin Sualtı Aracının Hareket Eksenleri ve Araçtan Elde Edilen En Yüksek Hızlar

Serbestlik Derecesi (DOF)	Hareketin Tanımı	Doğrusal Yer Değiştirme ve Euler açıları	Doğrusal ve açısal hızlar
1	x yönünde doğrusal	x	u=0.12 m/s
2	z yönünde doğrusal	z	w=0.2 m/s
3	x ekseninde çevresinde açısal yalpa	ϕ	p=Ölçülemedi
4	z ekseninde çevresinde açısal rota	ψ	r= 5°/sn

EK C**Jacobiyen Matrisinin Elde Edilmesi**

Jacobiyen matrisi; dünya, sualtı aracı ve manipülatör eklemlerinin kendi referans çerçeveleri arasında dönüşüm ilişkilerini ifade etmek için genel bilgi olarak verilmiştir:

Deniz ve hava araçlarının konumlarını belirlemek için Euler Açılımları tercih edilir. Araç gövdesinin koordinat sistemi $X_0Y_0Z_0$ koordinat sistemi ile gösterilebilir. Benzer şekilde Dünyanın koordinat sistemi XYZ ile gösterilir (Yılmaz & Kılıcı, 2019). Aşağıdaki denklemler, bir aracın doğrusal hız vektörünü Dünya koordinat sistemindeki hız vektörüne, Dünya koordinat sistemindeki hız vektörünü de, araç doğrusal hız vektörüne dönüştürür;

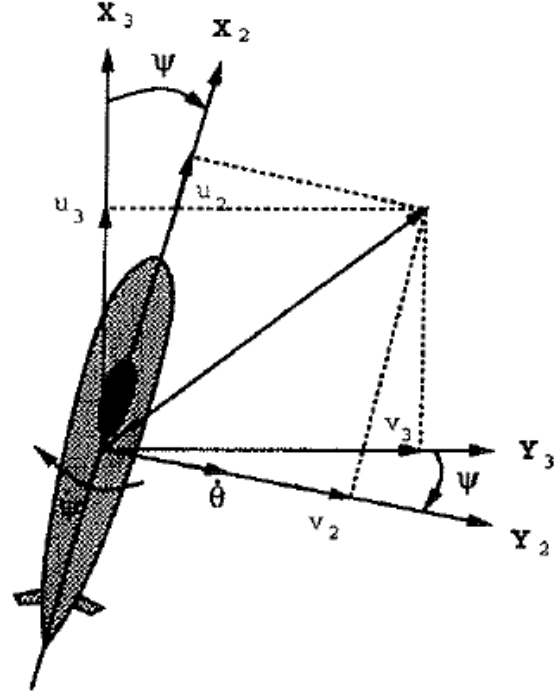
$$v_e = J_1(\phi, \theta, \varphi) v_o \quad (\text{Ek.1})$$

$$v_e = (\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})^T \quad (\text{Ek.2})$$

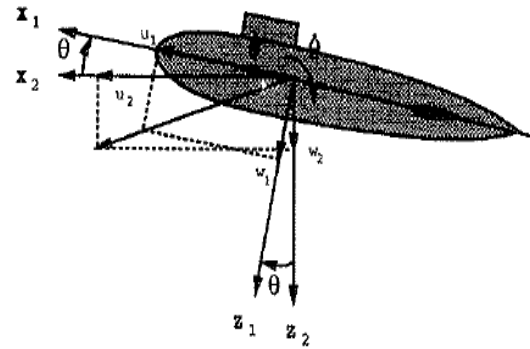
$$v_o = (u, v, w)^T \quad (\text{Ek.3})$$

J1 koordinat dönüşüm matrisi, Euler yalpa (roll), yunuslama (pitch) ve rota (yaw) açıları ile ilişkilidir. J1 koordinat dönüşüm matrisi ortogondur. Bu nedenle aşağıdaki denklem yazılabilir;

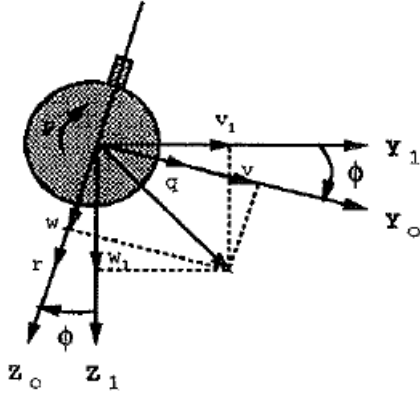
$$v_o = J_1^{-1}(\phi, \theta, \varphi) v_e = J_1^T(\phi, \theta, \varphi) v_e \quad (\text{Ek.4})$$



Şekil Ek 4.1. Z_3 ' e göre ψ açısal konumu (Fossen,1991).



Şekil Ek 4.2. Y_2 ' e göre θ açısal konumu (Fossen, 1991).



Şekil Ek 4.3. \$X_1\$' e göre \$Ø\$ açısız konumu (Fossen, 1991).

Aracın koordinat sisteminin merkezi, Dünya koordinat sisteminin merkezi (\$XYZ\$) ile eşleşene kadar döndürülür.

\$X_3 Y_3 Z_3\$ koordinat sistemi, yalpa açısı vasıtasıyla \$Z_3\$ ekseninin etrafında döndürülür ve \$X_2 Y_2 Z_2\$ koordinat sistemi elde edilir. Daha sonra \$X_2 Y_2 Z_2\$ koordinat sistemi, \$Y_2\$ eksenini etrafında yunuslama açısı kadar döndürülür ve \$X_1 Y_1 Z_1\$ koordinat sistemi elde edilir. \$X_1 Y_1 Z_1\$, \$X_1\$ eksenini etrafında yalpa açısı ile döndürüldüğünde, bu \$X_0 Y_0 Z_0\$ koordinatları elde edilir. Döndürme sırası aşağıdaki gibidir (Antonelli, 2014);

$$J_1^{-1}(\phi, \theta, \psi) = C_{x,\phi} C_{y,\theta} C_{z,\psi} \quad (\text{Ek.5})$$

Burada \$C_{i,j}\$: \$i\$ eksenini etrafında \$j\$ rotasyon açısı ile dönüşü ifade eden Rotasyon Matrisidir. Temel olarak;

$$C_{x,\phi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\phi & s\phi \\ 0 & -s\phi & c\phi \end{bmatrix} \quad (\text{Ek.6})$$

$$C_{y,\theta} = \begin{bmatrix} c\theta & 0 & -s\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ s\theta & 0 & c\theta \end{bmatrix} \quad (\text{Ek.7})$$

$$C_{z,\psi} = \begin{bmatrix} c\psi & s\psi & 0 \\ -s\psi & c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Ek.8})$$

Burada, \$s\$;sinüs, \$c\$;kosinüs ve \$t\$; tanjant'tır. Koordinat dönüşüm matrisi \$C_{ij}\$ ortogonal olduğu için \$J_1\$;

$$J_1(\phi, \theta, \psi) = (C_{x,\phi} C_{y,\theta} C_{z,\psi})^T \quad (\text{Ek.9})$$

$$J_1(\phi, \theta, \psi) = \begin{bmatrix} c\theta c\psi & -s\psi c\phi + s\theta s\theta c\psi & s\psi s\phi + c\phi s\theta c\psi \\ c\theta s\psi & c\psi c\phi + s\theta s\theta s\psi & -c\psi s\phi + c\phi s\theta s\psi \\ -s\theta & s\theta c\phi & c\phi c\theta \end{bmatrix} \quad (\text{Ek.10})$$

Aracın açısal hız vektörü \$w_0\$ ile Dünya referans çerçevesine göre Euler açısal hız vektörü \$w_e\$ arasındaki ilişki \$J_2\$ dönüşüm matrisi ile bulunur.

$$w_0 = (p, q, r)^T \quad (\text{Ek.11})$$

$$w_e = (\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi})^T \quad (\text{Ek.12})$$

$$w_e = J_2(\phi, \theta, \psi) w_0 \quad (\text{Ek.13})$$

Sadece aracın koordinat sistemini tanımladığı ve referans çerçevesine göre sadece yönelimini gösterdiği için, \$J_2\$ dönüşüm matrisi ortogonal dönüşüm matrisi özelliği taşımaz.

$$w_0 = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + C_{x,\psi} \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} + C_{x,\psi} C_{y,\theta} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = J_2^{-1}(\phi, \theta, \psi) w_e \quad (\text{Ek.14})$$

Kinematik denklemlerin kompakt gösterimi şu şekilde olur;

$$\begin{bmatrix} v_e \\ w_e \end{bmatrix} = J(\phi, \theta, \psi) \begin{bmatrix} v_0 \\ w_0 \end{bmatrix} \quad (\text{Ek.15})$$

$$J = \begin{bmatrix} J_1(\phi, \theta, \psi) & 0 \\ 0 & J_2(\phi, \theta, \psi) \end{bmatrix} \quad (\text{Ek.16})$$

$$J = \begin{bmatrix} c\theta c\psi & -s\psi c\theta + s\theta s\theta c\psi & s\psi s\theta + c\theta s\theta c\psi & 0 & 0 & 0 \\ c\theta s\psi & c\psi c\theta + s\theta s\theta s\psi & -c\psi s\theta + c\theta s\theta s\psi & 0 & 0 & 0 \\ -s\theta & s\theta c\theta & c\theta c\theta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & s\theta t\theta & c\theta t\theta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c\theta & -s\theta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s\theta/c\theta & c\theta/c\theta \end{bmatrix} \quad (\text{Ek.17})$$

Gemi İnşaatı Mimarları ve Gemi Mühendisleri Derneği (SNAME) notasyonunda hızlar arası dönüşüm Ek.18'deki gibidir (Antonelli,2014):

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1(x_2) & 0 \\ 0 & J_2(x_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} \quad \dot{x} = J(x)\dot{q} \quad (\text{Ek.18})$$

Dünya referans sisteminde $x_1 = (x, y, z)^T$ konum vektörü ve $x_2 = (\theta, \theta, \varphi)^T$ Euler açısı vektörüdür. Aracın doğrusal ve açısal hızları ise aşağıdaki gibidir;

$$\dot{q}_1 = (u, v, w)^T, \quad \dot{q}_2 = (p, q, r)^T \quad (\text{Ek.19})$$

Yüksek Plastisiteli Bir Kilin Mühendislik Özelliklerine Uçucu Kül ve Kireç Katkılarının Etkisi

Ömür ÇİMEN*¹ , Erhan KELEŞ*² 

*Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta, 32200, Türkiye

Araştırma Makalesi, Geliş Tarihi: 21.09.2020, Kabul Tarihi: 16.11.2020

Özet

Şişme ve büzülme potansiyeline sahip killer ülkemizin birçok bölgesinde bulunmaktadır. Şişen killerin hacim değiştirme kapasitesine bağlı olarak oluşan düşey deformasyonlar yapıda hasarlar oluşturabilmektedir. Temel zeminin şişme özelliği gösteren kil mineralleri içermesi durumunda, hafif yüklenmiş yapıların aktardığı düşük düşey basınç nedeniyle yapıda farklı oturmalar oluşmakta ve büyük hasarlara neden olabilmektedir. Bu çalışmada, yüksek plastisiteli Eşen kiline ağırlıkça %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında Afşin-Elbistan uçucu külü ilave edilerek kıvam limitleri, kompaksiyon, serbest basınç ve şişme basıncı deneyleri yapılmıştır. Daha sonra, kireç miktarı ağırlıkça %6 oranında sabit tutularak aynı deney serisi tekrarlanmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, Afşin-Elbistan uçucu külünün yüksek plastisiteli Eşen kilinin mühendislik özelliklerini iyileştirdiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Stabilizasyon, Yüksek plastisiteli kil, Afşin-Elbistan uçucu külü, Kireç.

The Effect of Fly Ash and Lime Additives on the Engineering Properties of a High Plasticity Clay

Abstract

Clays with the potential to swell and shrink are found in many regions of our country. Vertical deformations that occur depending on the capacity of volume changing of the swelling clays can cause damage to the structure. In the case of a foundation ground contains swelling clay minerals, different settlements in the structure occur due to the low vertical pressure transferred by the lightly loaded structures and it may cause major damage. In this study, consistency limits, compaction, free pressure, and swelling pressure tests were carried out by adding Afşin-Elbistan fly ash of 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, and 30% by weight to high plasticity Eşen clay. Then the same series of experiments was repeated, keeping the lime amount constant at 6% by weight. As a result of the experimental studies, it was determined that Afşin-Elbistan fly ash improved the engineering properties of Eşen clay with high plasticity.

Keywords: Stabilization, High plasticity clay, Afşin-Elbistan fly ash, Lime.

¹Sorumlu yazar omurcimen@sdu.edu.tr, ²ins.muherhankales@gmail.com

1. GİRİŞ

Zemin, kayaçların kimyasal ve fiziksel ayrışma sonucu meydana gelen, yük altında şekil değiştirmelere uğrayan, yol, köprü, baraj ve hava alanı gibi her türlü mühendislik yapılarının üzerine inşa edildiği ve bu şekilde yapıların yükünü güvenle taşımasını beklediğimiz daneli bir yapıdır. Mühendislik yapılarını inşa etmeyi planladığımız alanların bir kısmı istediğimiz mühendislik parametrelerine sahip iken bir kısmı da istediğimiz özelliklere sahip olmayabilir. Özellikle, sosyo-ekonomik gelişmelerden dolayı kentlerin büyümesi ve arzu edilen mühendislik özelliklere sahip yerlerin azalması bizleri uygun taşıma gücüne sahip olmayan yerlere yapıları inşa etmeye zorlamaktadır. Yapı inşası için elverişsiz olan zeminleri, yapı inşasına uygun hale getirmek için birtakım çalışmalar yapmak gerekebilir. Bunlardan birkaçı, derin temel yapmak, yumuşak zemin tabakasının yeteri derinliğe kadar kazılarak yerine uygun zeminin konulması ya da gerek kimyasal gerekse atık malzemelerin zemine ilave edilerek zeminin yerinde stabilize edilmesidir.

Stabilizasyon, zayıf dayanım özelliklerine sahip zeminin çeşitli zemin iyileştirme yöntemleriyle dış kuvvetlere karşı daha dayanıklı hale getirilmesidir (Cömert, 2005). Katkılı zemin iyileştirmesi, derin temel uygulamalarına kıyasla daha ekonomik olması ve uygulama teknikleri açısından daha basit olmasından dolayı zayıf zeminlerin güçlendirilmesinde uygun bir yöntem olabilmektedir. Zemin stabilizasyonunda, zeminin daha sıkı bir duruma gelmesi, taşıma gücünün ve kayma direncinin artırılmasının yanı sıra sıvılaşma riskinin ortadan kaldırılması hedeflenmektedir (Türkel, 2019). İyileştirme yapılmasındaki maksat ve zeminin davranışı, zemin stabilizasyonundaki uygulanacak yöntemin seçimini etkileyen parametrelerdendir. Kireç, uçucu kül, volkanik tuf, çimento, pomza ve bitüm gibi doğal ve yan ürün konumundaki katkı maddelerinin ilave edilerek yapılan iyileştirme en yaygın kullanılan yöntemlerdendir (Güçek, 2011).

Atık malzemelerin zemin stabilizasyonunda kullanılması, stabilizasyon girdilerini azaltmakla beraber bu atık malzemelerin depolanma giderlerini de azaltır (Baykal vd. 2004). Günümüzde, yan ürün veya atıkların değerlendirilmesi üzerinde yoğun olarak çalışılmaktadır. Literatürde atık malzemelerin zemin iyileştirilmesinde kullanımıyla ilgili çalışmalar hızla artmaktadır (Kalay, 2010). Bu çalışmalar şöyle sıralanabilir. Beyaz, sarı ve yeşil Bayburt taşı atıklarının zemin stabilizasyonunda kireçle birlikte kullanılabilir olduğu (Yılmaz, 2015), elektrik ark fırını (EAF) cürufu katkısının zemin

stabilizasyonunda kullanılabilmesi (Mahmoudi Moghaddam, 2011), kırmızı çamur, silis dumanı ve kireç ile muamele edilen mikronize kilin, serbest basınç, şişme basıncı ve geçirimsizlik özelliklerinin iyileştirilmesiyle geoteknik problemlerin çözümünde faydalı sonuçlar ortaya koyduğu (Pekdemir, 2013), Afşin-Elbistan uçucu külünün zemin iyileştirmede kullanılabilmesi (Öksüz, 2006), statik ve sismik yükler altında mukavemet ve taşıma gücü kaybına uğrayarak ciddi boyutta şekil değiştirmelere maruz kalabilecek sıvılaşma potansiyeli olan zeminlerin iyileştirilmesinde çimentoyla birlikte kullanılacak bazalt fiberin, zemin iyileştirme uygulamalarında kullanılabilmesi (Türkel, 2019), göçebilen bir zeminin iyileştirilmesinde atık pirinç kabuğu külü ve çimentonun birlikte kullanılabilmesi (Basha vd. 2005) belirtilmiştir. Endüstriyel atıkların kilin mukavemet özelliklerini iyileştirmek için kireç ile birlikte kullanılabilmesi gösterilmiştir (Bhardwaj and Sharma, 2020). Ağırılıkça %5 jips katkısı ile şişebilen killerin etkin bir şekilde iyileştirilebileceği (Civelekoğlu, 2009), yumuşak bir kile ağırılıkça %1 kopolimer ve %10 uçucu kül ilave edilerek yalın numunenin serbest basınç mukavemetinin %581 arttığı belirtilmiştir (Çetin, 2011). %2 kolemanit katkısı ve %6 amorf silika katkısının bentonit kilinde iyileştirme amaçlı kullanılabilmesi, %5 kireç katkısı sabit tutularak, artan amorf silika miktarının serbest basınç mukavemetini artırdığı belirlenmiştir (Dereli, 2013). %1.5 keçiyoynuzu gam katkısıyla doğal kilin serbest basınç mukavemeti %233 oranında arttığı, %1.5 biyopolimer+%5 pomza katkısı ile kilin serbest basınç mukavemetinin %237 arttığı tespit edilmiştir (Gencer, 2018). %3 kireç ve %10 silis dumanı katkısının zeminin mühendislik özelliklerinde önemli seviyede iyileşme sağladığı belirtilmiştir (Taşçı, 2011). %10-20 oranları arasında mermer toz atıklarının stabilizasyonda kullanılabilmesi belirtilmiştir (Yıldız, 2008). Uçucu kül ile iyileştirilmiş killerde serbest basınç direncinin ve CBR değerlerinin yükseldiği ve uçucu küllerin karayolu inşasında yumuşak alt temel iyileştirilmesinde kullanılabilmesi gösterilmiştir (Şenol vd. 2006). %6-10 oranlarında çimentonun kilin drenajsız kayma mukavemetini artırıcı bir etki sağladığı belirtilmiştir (Kılıç, 2008). %5 kireç, %3.33 çelikhane cürufu ve deniz suyu ile karıştırılan düşük plastisiteli killerde serbest basınç mukavemetinin 16 kat artış gösterdiği, %7.5 kireç, %3.33 çelikhane cürufu ve deniz suyu karıştırılan yüksek plastisiteli killerde ise 10 kat artış gerçekleştirdiği gösterilmiştir (Bilgen, 2011). Soğuk bölgelerde yol dolgusu yapılırken uçucu kül kullanımının boşluk oranını arttırması nedeniyle daha düşük ağırlık, daha yüksek stabilite sağladığı belirtilmiştir (Baykal vd., 2004). Ağırılıkça %5-10 oranlarında kireç çamuru, kumlu kil, killi balçık ve ağır kil zeminleri üzerinde olumlu etki

yaparak orman yollarında kireç çamurunun iyileştirme amaçlı kullanılabilmesi belirtilmiştir (Eroğlu, 2003). İnşaat yıkıntı atığının kaolin kilinin taşıma gücü oranında (CBR) %500'ü aşan bir iyileşme sağladığı belirtilmiştir (Kalem, 2015). Uçucu küle %10 atık lastik ve bentonit ilave edildiğinde elde edilen hidrolik geçirgenliğin kaplama malzemesi olarak kullanılabilir standartlarda olduğu gösterilmiştir (Çokca ve Yılmaz, 2004). Silika dumanı ve kireç katkılarının kilin geoteknik özelliklerine etkisi araştırılmıştır (Türköz vd., 2018). %10 kolemit atığı ve %10 kireç katkısının, yüksek plastisiteli killi yol taban zemininin; işlenebilirlik, plastisite, sıkışabilirlik ve dayanım gibi mühendislik özelliklerini iyileştirdiği gösterilmiştir (Yeşilçiçek, 2016). %30 perlit ve %8 kireç katkısının zemin stabilizasyonunda kullanılabilmesi belirtilmiştir (Çalık, 2012). Magnezyum klorür solüsyonunun problemler zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılabilmesi ve özellikle %7 katkı seviyesinde etkin bir iyileştirme sağlandığı belirtilmiştir (Açaz, 2011). Ağırlıkça %10-%20 oranlarında inşaat atıklarının kilin serbest basınç mukavemetini artırdığı ve şişme basıncının azaltılmasında kullanılabilmesi belirtilmiştir (Çimen vd., 2017).

Bu çalışmada, yüksek plastisiteli bir kile ağırlıkça %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında uçucu kül ilave edilerek, karışım numunelerinde kıvam limitleri, kompaksiyon, serbest basınç ve şişme basıncı deneyleri yapılmıştır. Ayrıca, uçucu kül-kil karışımlarına kireç katkısının etkisi de araştırılmıştır. Sonuçta, kilin mühendislik özelliklerine uçucu kül ve kirecin etkisi belirlenmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Eşen Kilinin Özellikleri

Kil zeminler, genel olarak su muhtevsındaki değişime bağlı olarak hacim değişimine uğrarlar. Hacim değişimi, kurumada büzülme ve ıslanmada şişme olarak kendini gösterir. Eğer zemin kurumayı takiben ıslatılırsa, şişme oluşur. Büyük hacimsel değişiklikler birbirini izleyen kurak ve yağmurlu mevsimlere sahip iklim koşullarında gözlenir. Killi zeminlerin mühendislik yapılarını önemli derecede etkileyen özelliği oturma, mukavemet, şişme ve büzülmedir. İyi projelendirilmemiş bir yapıda büzülme ve şişmeden kaynaklı oluşan deformasyonlar yapı için sürekli bir tehdit oluşturmaktadır (Oweiss ve Bowman, 1981).

Bu çalışmada Muğla'nın Fethiye ilçesinde yapılan Eşen barajlarının şantiye sahasından temin edilen kil numunesi ile çalışılmıştır. Numune üzerinde elek analizleri, kıvam limitleri, hidrometre ve standart kompaksiyon deneyleri

yapılmıştır. Kil üzerinde yapılan zemin sınıflandırma deneylerinden sonra numunenin içerisinde %0 çakıl, %2 kum, %38 silt ve %60 kil olduğu belirlenmiştir. Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine göre zeminin CH (Yüksek plastisiteli kil) sınıfında olduğu tespit edilmiştir (Kalay, 2010). Eşen kilinin fiziksel görüntüsü Şekil 1 'de, kimyasal analiz test sonuçları Tablo 1 'de, X-Ray cihazı ile tanımlanan minerallerin çokluk sırasına göre sıralanmış hali Tablo 2 'de ve mühendislik özellikleri ise Tablo 3 'te verilmiştir.



Şekil 1. Eşen kilinin fiziksel görüntüsü

Tablo 1. Eşen kilinin kimyasal içeriği

Oksitler	(% ağırlık)
Na ₂ O	<0.1
MgO	17.4
Al ₂ O ₃	4.3
SiO ₂	47.1
P ₂ O ₅	<0.1
K ₂ O	0.3
CaO	2.8
TiO ₂	0.2
MnO	0.1
Fe ₂ O ₃	16.6
A.Za	9.85

Tablo 2. Eşen kilinin mineral içeriği

Çokluk sırasına göre mineraller
Simektit grubu mineral, serpantin grubu mineral, kuvars, kalsit, amorf silika, amfibol grubu mineral (çok çok az), feldispat (çok çok az), klor grubu mineral (çok çok az)

Tablo 3. Eşen kilinin mühendislik özellikleri

Özellikler	Miktarı
$W_R(\%)$	21
$W_L(\%)$	108
$W_p(\%)$	38
PI(%)	70
$\gamma_{kmax}(gr/cm^3)$	1.16
$W_{opt}(\%)$	38
$\gamma_s(gr/cm^3)$	2,70

W_R rötre limiti, W_L Likit limit, W_p plastik limit, PI plastisite indisi, γ_{kmax} maksimum kuru birim hacim ağırlık, W_{opt} optimum su muhtevası, γ_s dane birim hacim ağırlık

2.2. Afşin-Elbistan Uçucu Külünün Özellikleri

Ağırlıkça %80 'ni No:200 elekten geçecek şekilde öğütülerek toz haline getirilen düşük kalorili kömürler, elektrik enerjisi üretmek için termik santrallerde kullanılan başlıca yakıt çeşitleridir. Sıcak havayla beraber fırına gönderilen toz halindeki kömürün yanması neticesinde gazlar ve atık maddeler açığa çıkar (Erdoğan, 1993). Toz halindeki kömürün yakılması sonucunda açığa çıkan, bünyesinde katı partiküller bulunduran çeşitli gazlar bacadan yukarı doğru sürüklenirler. Bacadan yukarı yönlü hareket eden gazların bünyesindeki katı partiküllerinin atmosfere geçişini önlemek için bacalara silikonlar ve elektro filtreler konulur. Bu filtreler vasıtasıyla, gaz ile karışık katı partiküllerinin yaklaşık %99 'u atmosfere geçmeden tutularak hapsedilir. Bu şekilde biriken camsı katı yığıntıya uçucu kül denilmektedir (Öksüz, 2006). Bu küller süngerimsi mineral, içi boşluklu tanecikler ve yanmamış kömür partiküllerinden meydana gelir. Uçucu küllerin kimyasal bileşimlerine bakıldığında, genel olarak %85'ini SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , ve MgO oluşturur (Tokuy ve Erdoğan, 1998).

Termik santrallerde üretilen elektrik enerjisi, ülkemizde üretilen elektrik enerjisinin %50 'sinden fazlasını oluşturmaktadır. Yine ülkemizde her yıl yaklaşık 15 milyon ton uçucu kül, termik santral yan ürünü olarak üretilmektedir. Bu yan ürünler çevresel sorunlar oluşturmakla beraber taşıma ve depolama masraflarını artırıp işletme girdilerini artırıcı bir etki de yapmaktadır. Ülkemizde bol miktarda bulunduğu halde, bu atık ürünlerin gerek imhası gerek başka sektörlerde kullanılarak faydalanılması hususunda yeterli derecede çalışmalar yapılmamaktadır. Santrallerden uzaklaştırılması ciddi problemler oluşturan hatta taşıma ve depolama sırasında enerji ve parasal kaynak harcanan bu atıkların başka sektörlerde kazandırılması faydalı

olacaktır. Uçucu küllerin kullanılabilceği alanları belirlemek adına bir araştırma yapıldığında inşaat endüstrisi karşımıza çıkmaktadır. Yapı malzemesi, çimento üretimi, hazır beton üretimi ve hafif yapı malzemesi üretimi alanlarında uçucu küller tercih edilebilmektedir. Geoteknik uygulamalarında da son derece uygun ve ekonomik çözümler sunabildiği belirtilmektedir. Bu atıklar, dolguların stabilizasyonu, altyapı ve taban malzemesi, alt drenaj tabakası, iri zemin iyileştirme malzeme boşluklarını doldurma ve zemin enjeksiyonu uygulamalarında da kullanılabilirler (Öksüz, 2006).

Bu çalışmada, Afşin-Elbistan termik santralinden elde edilen uçucu kül kullanılmıştır. Afşin-Elbistan termik santralinde yakıt olarak linyit kömürü kullanılmaktadır. Bu linyit kömürü Kahramanmaraş ilinin Afşin ve Elbistan ilçelerinin sınırları içindeki 120 km²'lik bir alanda üretilmektedir. Halen işletme faaliyetleri devam etmekte olan havzanın kışlaköy açık işletmesi, Afşin ilçe merkezine 15 km ve Elbistan ilçe merkezine ise 26 km mesafede bulunmaktadır (Öksüz, 2006). Afşin-Elbistan uçucu külünün fiziksel görüntüsü Şekil 2 'de, kimyasal içeriği Tablo 3 'te, mineral içeriği Tablo 4 'te ve mühendislik özellikleri Tablo 5 'te verilmiştir.

**Şekil 2.** Afşin-Elbistan uçucu külünün fiziksel görüntüsü**Tablo 3.** Afşin-Elbistan uçucu külünün kimyasal içeriği

Oksitler	% Ağırlık
Na_2O	0.03
MgO	1.38
Al_2O_3	12.79
SiO_2	31.25
P_2O_5	0.21
K_2O	0.57
CaO	41.73
TiO_2	0.23
MnO	0.02
Fe_2O_3	4.94
A.Za	5.72

Tablo 4. Afşin-Elbistan uçucu külünün mineral içeriği

Mineraller
Analcline, Anyhdrite, Calcite ve Quartz

Tablo 5. Afşin-Elbistan uçucu külünün mühendislik özellikleri

Özellikler	Miktarı
$W_R(\%)$	--
$W_L(\%)$	--
$W_P(\%)$	--
$PI(\%)$	--
$\gamma_{kmax}(gr/cm^3)$	1.13
$\gamma_s(gr/cm^3)$	2.75
$W_{opt}(\%)$	40

2.3. Kirecin Özellikleri

Kireç, yüksek kalsiyumlu, magnezyumlu veya dolomitik yapıda olabilen ve sedimanter bir kayacın doğal kireçtaşından üretilir. Kireçtaşının yapısı ve üretim süreci, üretilen kirecin tipini belirler. Yüksek kalsiyumlu sönmemiş kireç (CaO), monohidrete dolamatik kireç (Ca(OH)₂MgO) ve yüksek kalsiyumlu sönmüş kireç (Ca(OH)₂) zemin iyileştirmede en çok kullanılan kireç tipleridir (Kalay, 2010). Kil mineralleri ve kireç arasında reaksiyonlar meydana gelir. Bu reaksiyonlardan dolayı kireç, kil içeriği yüksek olan kohezyonlu zeminlerde iyi bir iyileştirme sağlar (Özaydın, 2011). Kireç stabilizasyonu, zeminin mukavemetinin ve şekil değiştirme modülünün artmasını, şişme potansiyelinin ve şişme basınçlarının azalmasını ve çevre koşulları etkisi altında zeminin özelliklerinin bozulmasının daha sınırlı kalmasını yani dayanıklılığının artmasını sağlamaktadır. Ayrıca zeminin plastisitesini azalttığı için arazi çalışma koşullarını iyileştirmektedir. Kireçle stabilizasyon genellikle killi zeminlerle yapılan dolgularla özellikle yol inşaatlarında kullanılmaktadır (Özaydın, 2011).

Literatüre bakıldığında, yüksek plastisiteli killerin stabilizasyonunda ağırlıkça %3-10 oranında kireç kullanıldığı görülmektedir. Bu çalışmada %6 oranında sönmemiş kireç kullanılmıştır. Kullanılan kirecin kimyasal içeriği Tablo 6 'da ve mineral içeriği Tablo 7 'de verilmiştir.

Tablo 6. Kirecin kimyasal içeriği

Oksitler	% Ağırlık
Na ₂ O	<0.1
MgO	0.4
Al ₂ O ₃	<0.1
SiO ₂	0.1
P ₂ O ₅	<0.1
K ₂ O	<0.1
CaO	79.3
TiO ₂	<0.1
MnO	<0.1
Fe ₂ O ₃	0.1
A.Za	19.89

Tablo 7. Kirecin mineral içeriği

Mineraller
Portlandit, Aragonit (az), kalsit (az), illit (çok çok az)

2.4. Araştırma Kapsamında Yapılan Deneyler

Kilin kıvam limitlerine, kompaksiyon parametrelerine, şişme potansiyeline ve serbest basınç direncine Afşin-Elbistan uçucu külü ve kirecin etkilerinin belirlenmesi amacıyla kile ağırlıkça %5, 10, 15, 20, 25 ve 30 oranlarında Afşin-Elbistan uçucu külü ilave edilmiştir. Daha sonra kireç ağırlıkça %6 oranında sabit tutularak aynı deney serisi tekrarlanmıştır. İkili karışım olarak adlandırılan kil-uçucu kül deneylerinin tamamlanmasının ardından üçlü karışım (kil-uçucu kül-kireç) deneyleri yapılmıştır.

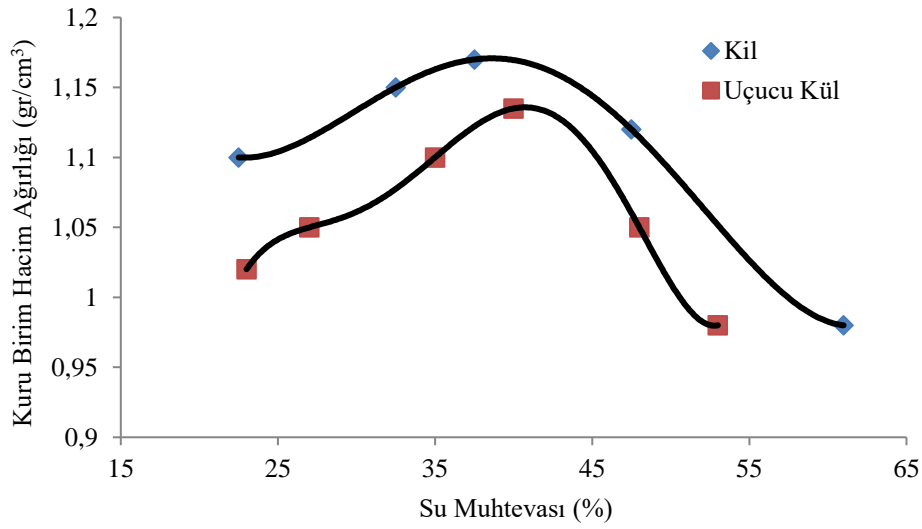
Kıvam limitleri olarak bilinen likit ve plastik limitin belirlenmesinde ASTM D 4318-05 deney metodu kullanılmıştır. Afşin-Elbistan uçucu külü ve kireç, No 40 elekten elenerek, yukarıda belirtilen miktarlarda yine No 40 elekten elenen kile eklenmiştir. Numunelerin kompaksiyon özelliklerinin belirlenmesi için ASTM D 698-07 E1 standartlarındaki standart kompaksiyon deneyi yapılmıştır. Her bir karışım oranı için standart kompaksiyon deneylerinden elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su muhtevası verilerinden yararlanılarak hazırlanan numuneler üzerinde serbest basınç deneyleri yapılmıştır. ASTM D2166 / D2166M-13 standartlarında yapılan serbest basınç deneylerinde No 40 elek altına geçen numuneler kullanılmıştır. Serbest basınç numuneleri 3.8cm çapında ve 7.6cm yüksekliğinde ikiye ayrılabilen ringin içine sıkıştırılmıştır. Ringden çıkarılan numuneler üzerinde 0.5 mm/dk yükleme hızıyla yükleme yapılarak serbest basınç deneyleri yapılmıştır. İncelenen zemin numunelerinin

şişme basınçları, sabit hacim ödometre deney yöntemi ASTM D 4546-90 metot C kullanılarak belirlenmiştir.

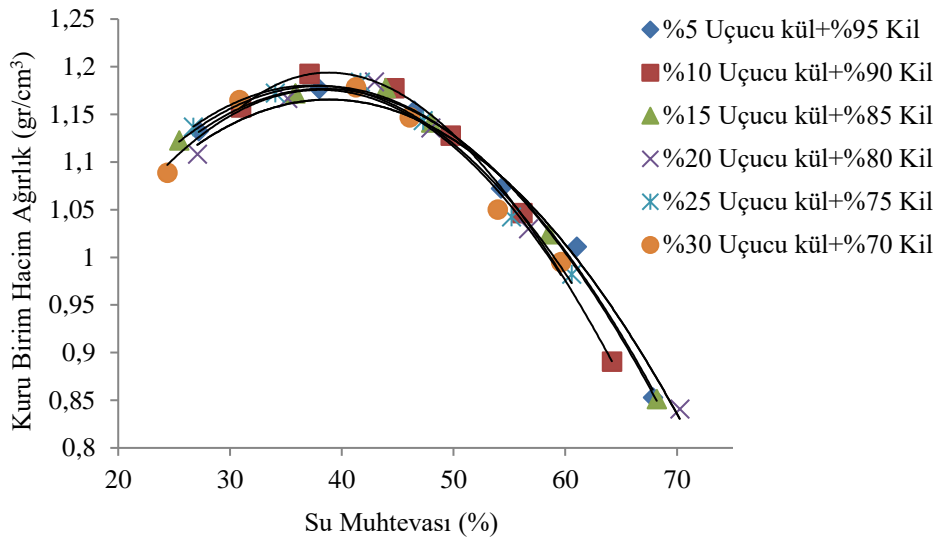
3. BULGULAR

Eşen kili ve Afşin-Elbistan uçucu külü üzerinde yapılan standart kompaksiyon deneyleri sonucunda elde edilen kompaksiyon eğrileri Şekil 3 'te, kile belli oranlarda uçucu kül ilave edilerek yapılan kompaksiyon deneyleri sonucunda elde edilen kompaksiyon grafikleri Şekil 4 'te ve kil-uçucu kül karışımlarına kireç katkısı ağırlıkça %6 oranında sabit tutularak yapılan kompaksiyon deneyleri

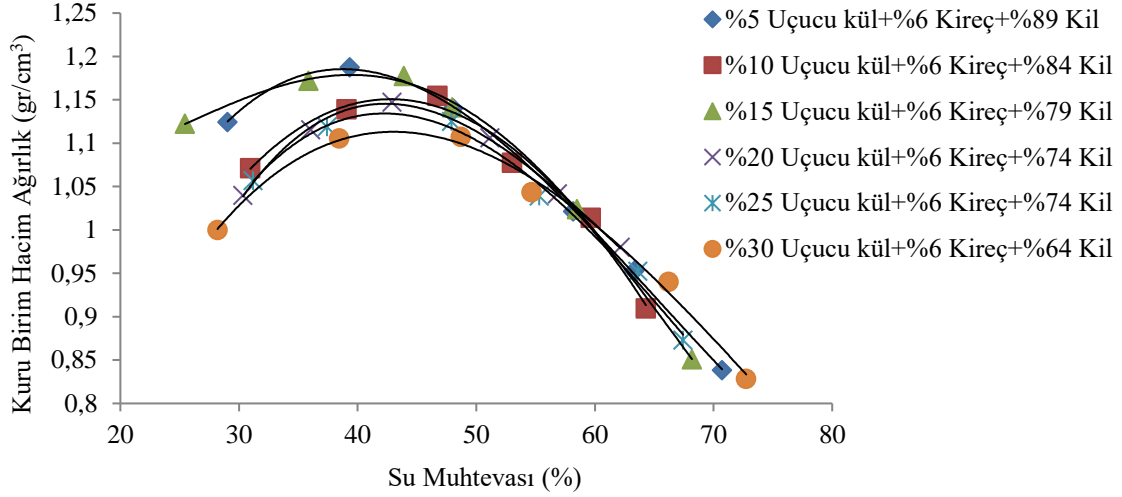
sonucunda elde edilen kompaksiyon eğrileri ise Şekil 5 'te verilmiştir. Eşen kili ve Afşin-Elbistan uçucu külü üzerinde yapılan serbest basınç deneyleri sonucunda elde edilen serbest basınç mukavemeti eğrileri Şekil 6 'da, kile belli oranlarda uçucu kül ilave edilerek yapılan serbest basınç deneyleri sonucunda elde edilen serbest basınç mukavemeti eğrileri Şekil 7 'de ve kil-uçucu kül karışımlarına kireç katkısı ağırlıkça %6 oranında sabit tutularak yapılan serbest basınç deneyleri sonucunda elde edilen serbest basınç mukavemeti eğrileri ise Şekil 8 'de verilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar Tablo 8 'de görülmektedir.



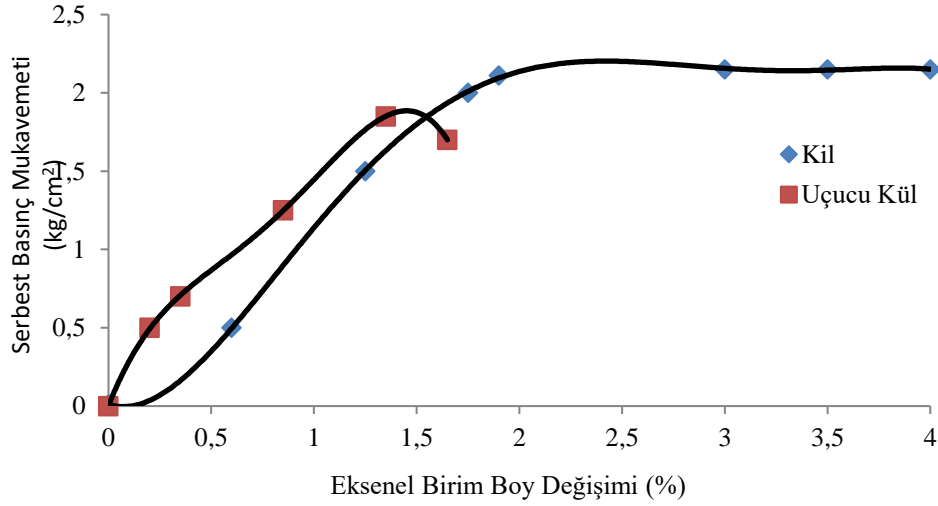
Şekil 3. Eşen kili ve Afşin-Elbistan uçucu külü numunelerinin kompaksiyon eğrileri



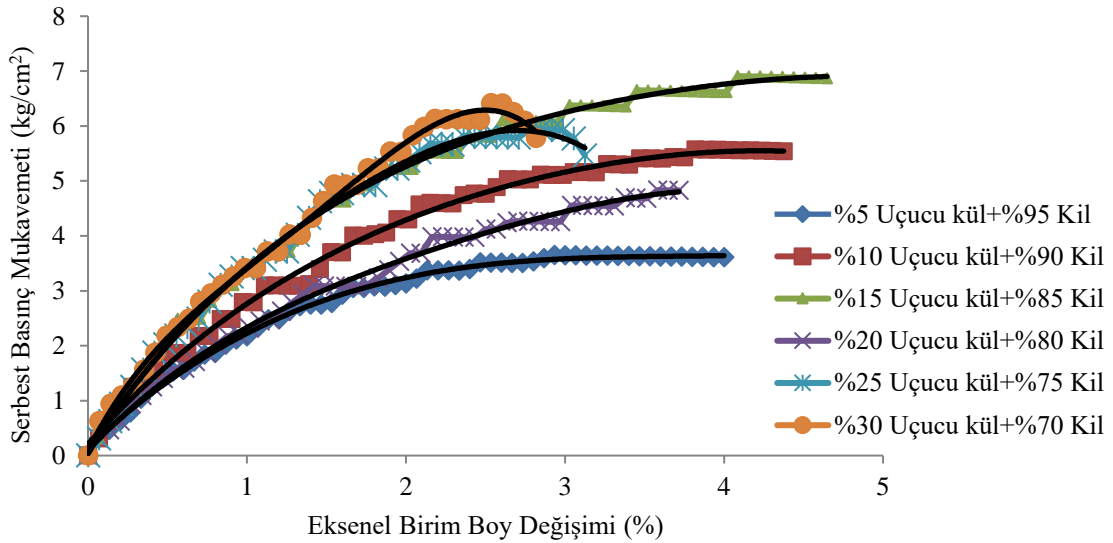
Şekil 4. Afşin-Elbistan uçucu külü katkılı eşen kili numunelerinin kompaksiyon eğrileri



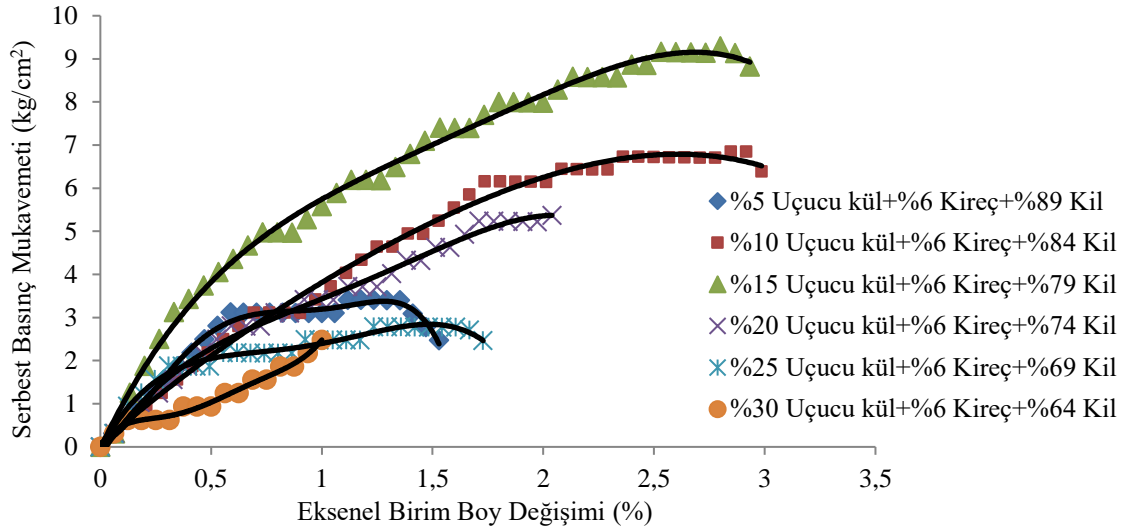
Şekil 5. %6 kireç ve Afşin-Elbistan uçucu külü katkıları ile yapılan eşen kili numunelerinin kompaksiyon eğrileri



Şekil 6. Eşen kili ve Afşin-Elbistan uçucu külü numunelerinin serbest basınç mukavemeti eğrileri



Şekil 7. Afşin-Elbistan uçucu külü katkıları ile yapılan eşen kili numunelerinin serbest basınç mukavemeti eğrileri



Şekil 8. %6 kireç ve Afşin-Elbistan uçucu külü katkılı Eşen kili numunelerinin serbest basınç mukavemeti eğrileri

Tablo 8. Numuneler üzerinde yapılan deneylerin sonuçları

Numune	W _L (%)	W _P (%)	PI (%)	Y _{kmax} (gr/cm ³)	ω _{opt} (%)	q _u (kg/cm ²)	P _s (kg/cm ²)
%100 Kil	108	38	70	1.16	38	1.96	1.60
%100 UK	--	--	--	1.13	40	1.85	0.17
%5 UK katkılı kil	103	34	69	1.17	40	3.64	1.56
%10 UK katkılı kil	90	39	51	1.2	40	5.63	0.79
%15 UK katkılı kil	88	44	44	1.185	38	6.90	0.55
%20 UK katkılı kil	82	53	29	1.180	43	4.80	0.24
%25 UK katkılı kil	82	56	26	1.19	38	5.95	0.59
%30 UK katkılı kil	81	52	29	1.17	35	6.40	0.59
%5 UK +%6 K katkılı kil	89	59	30	1.16	42	3.40	1.01
%10 UK +%6 K katkılı kil	81	57	24	1.16	44	6.85	0.40
%15 UK +%6 K katkılı kil	80	54	26	1.15	40	9.28	0.35
%20 UK +%6 K katkılı kil	85	53	32	1.15	43	5.40	0.10
%25 UK +%6 K katkılı kil	80	54	26	1.13	44	2.78	0.36
%30 UK +%6 K katkılı kil	79	55	24	1.12	44	2.48	0.25

Tablo 8 incelendiğinde, likit limit değerinde %27 'lere varan bir azalma, plastik limit değerinde %55 'lere varan bir artma, plastisite indisinde %66 'lara varan bir azalma, maksimum kuru birim hacim ağırlıkta karışımlara bağlı olarak azalma ve artmalar, optimum su muhtevasında genellikle bir artma, serbest basınç mukavemetinde %370 'lere varan bir artma ve şişme basıncında ise önemli miktarlarda azalma gözlenmiştir. Kireç ilavesi ile

bu artış ve azalmaların daha belirgin olduğu görülmektedir.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Afşin-Elbistan termik santrali uçucu külü kullanılarak yapılan deneylerde katkı maddesi miktarının artması ile likit limit değerinin, plastisite indisinin ve şişme basıncının azaldığı, bunlara karşın plastik limit değerinin,

maksimum kuru birim hacim ağırlığın, optimum su muhtevasının (genellikle) ve serbest basınç mukavemetinin arttığı belirlenmiştir. İdeal uçucu kül oranı katkı miktarı ağırlıkça %15 olduğu bulunmuştur.

Kil-uçucu kül karışımlarına ağırlıkça %6 kireç eklenerek aynı deney serisi devam ettirilmiştir. Kil-uçucu kül-%6 kireç karışımlarında uçucu kül miktarının artması ile likit limit değerinin, plastisite indisinin, maksimum kuru birim hacim ağırlığın ve şişme basıncının azaldığı, bunlara karşın plastik limit değerinin, optimum su muhtevasının ve serbest basınç mukavemetinin arttığı belirlenmiştir. Kireçli ideal uçucu kül oranı katkı miktarının ağırlıkça yine %15 olduğu bulunmuştur. Bulgular literatür ile uyumlu elde edilmiştir.

Afşin-Elbistan uçucu külü, Eşen kilinin yapısındaki boşluklu yapıyı azaltarak maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve serbest basınç mukavemetini artırmıştır. Ayrıca, kil mineralleri ile kireç ve Afşin-Elbistan uçucu

külü arasında kimyasal reaksiyonlar meydana gelmiş ve bu reaksiyon, Eşen kilinin serbest basınç mukavemetini oldukça fazla artırmıştır.

Serbest basınç mukavemeti artması ile şişme basıncının azalması, kildeki katyon değiştirme kapasitesi, flokülasyon ve aglomerasyon reaksiyonlarından ve zemin katkı karışımındaki puzolanik reaksiyonlardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Afşin-Elbistan uçucu külü ve kireç ilavesi ile kil tanelerinde topaklanmalar meydana gelmiş ve kil taneleri daha iri bir zemin tanesi gibi davranmaya başlamış, bu da likit limit değerini azaltmıştır.

Yapılan deneyler neticesinde Afşin-Elbistan uçucu külü ve kireç katkı malzemelerinin yüksek plastisiteli kil zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılabileceği belirlenmiştir. En ideal karışım %15 Afşin-Elbistan uçucu külü ile %6 kireç katkısında elde edilmiştir.

5. SİMGELER

ASTM	American society for testing and materials
A.Za	Ateş zayıtı
CH	Yüksek plastisiteli kil zemin
UK	Afşin-Elbistan termik santralı uçucu külü
K	Kireç
PI	Plastisite indisi değeri
Ps	Sabit hacimli şişme basıncı
WL	Likit limit değeri
WP	Plastik limit değeri
ω_{opt}	Optimum su muhtevası
qu	Serbest basınç mukavemeti
γ_k	Kuru birim hacim ağırlığı
γ_{kmax}	Maksimum kuru birim hacim ağırlığı
ω	Su muhtevası
σ	Eksenel gerilme
ϵ	Eksenel şekil değiştirme
Ps	Şişme basıncı

TEŞEKKÜR

FYL-2020-7401 no'lu proje kapsamında maddi destekte bulunan Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Açaz, A., 2011. Magnezyum Klorür Solüsyonunun Problemlili Kil Zeminin Şişme, Dispersibilite ve Dayanım Karakteristiklerine Etkisi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 154s, Eskişehir.
- ASTM D 4546-90, 1993. Standard Test Method for One-Dimensional Swell or Settlement Percent of Cohesive Soils. ASTM, USA.
- ASTM D 698-07 E1, 2009. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort. ASTM, USA.
- ASTM D 4318-05, 2010. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. ASTM, USA.
- ASTM D 2166 / D2166M-13, 2013. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, ASTM International, USA.
- Basha, E., Hashim, R., Mahmud, H., Muntohar, A., 2005. Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement. Construction and Building Materials, 19(6), 448-453.
- Baykal, G., Erdinçliler, A., Saygılı, A., 2004. Highway Embankment Construction Using Fly Ash In Cold Regions, Resources. Conservation and Recycling, 42(3), 209-222.

Bilgen, G. 2011., Öğütülmüş Çelikhane Cürufu, Kireç ve Deniz Suyunun Killerin İyileştirilmesinde Kullanımı. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 278s. Kocaeli.

Bhardwaj, A. and Sharma, R.K. 2020. Effect of industrial wastes and lime on strength characteristics of clayey soil, Journal of Engineering, Design and Technology, 18(6), 1749-1772.

Civelekoğlu, B., 2009. Şişebilen Killi Zeminlerin Doğal Jips Katkısı Kullanılarak İyileştirilmesi. Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 53 s. Sivas.

Cömert, A., 2005. Uçucu Küllerin Zemin Stabilizasyonuna Etkileri. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 43s, Sakarya.

Çalık, Ü., 2012. Perlitin Puzolanik Katkı Olarak Kireç İle Birlikte Zemin Stabilizasyonunda Kullanımı. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 159s. Trabzon.

Çetin, A., 2011. Yüksek Plastisiteli Kil Zeminlerin Alternatif Malzemeler İle Yüzeysel Zemin Stabilizasyonu. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 121 s. İstanbul.

Çokca, E., Yılmaz, Z., 2004. Use of rubber and bentonite added fly ash as a liner material. Waste Management, 24(2), 153-164.

Çimen, Ö., Günaydın, H.İ., Keskin, S., 2017. Yüksek plastisiteli kil zeminin mühendislik özelliklerine inşaat atıklarının Etkisi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 23(3), 250-253.

Dereli, B., 2013. Bor Ve Amorf Silikanın Bentonitin Mühendislik Özelliklerine Etkisi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 62 s. Isparta.

Erdoğan, T., 1993. Atık hammaddelerin inşaat endüstrisinde kullanımı uçucu kül ve yüksek fırın cürufu. Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanımı Sempozyumu, 1-8s. Ankara.

Eroğlu, H., 2003. Orman Yollarında Kağıt Fabrikası Atığının (Kireç Çamuru) Stabilizasyon Amaçlı Kullanımı Üzerine Bir Araştırma. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 172s. Trabzon.

Gencer, G., 2018. Biyopolimer İle Etkileştirilmiş Kil/Pomza Tozu Karışımlarının Bazı Geoteknik Özelliklerinin Araştırılması. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 65s. Erzurum.

Güçek, S., 2011. Mermer Tozu Ve Uçucu Külün Kil Zeminlerin İyileştirilmesinde Kullanımı. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 86s. Afyon.

Holtz, R., Kovacs, W., 1981. An Introduction to Geotechnical Engineering. New Jersey, USA. Prentice Hall Inc.

Kalay, E. 2010. Sıkıştırılmış Yüksek Plastisiteli Kil Zemin Sstabilizasyonunda Pomza, Mermer Tozu Ve Kirecin Kullanılması. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 54s. Isparta.

Kalem, Z., 2015. Kentsel Dönüşümdeki İnşaat Ve Yıkıntı Atıklarının Killi Zeminlerde İyileştirmeye Etkilerinin Araştırılması. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 56s. Sakarya.

Kılıç, G., 2008. Çimento İle Zemin Stabilizasyonu. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans Tezi, 102s. İstanbul.

Mahmoudi Moghaddam, M., 2011. Elektrik Ark Fırını (EAF) Cürufu Katkısının Zeminlerin Mühendislik Özellikleri Üzerine Etkisi. Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 74s. İzmir.

Oweiss, I., Bowman, J., 1981. Geotechnical considerations for construction in Saudi Arabia. ASCE, Journal of Geotechnical Engineering Division., (107).

Öksüz, K., 2006. Afşin – Elbistan Termik Santral Uçucu Külünün Zemin Stabilizasyonunda Kullanılması. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 91s. Adana.

Özaydın, K., 2011. Zemin Mekaniği. Birsen Yayınevi, 350s. İstanbul.

Pekdemir, Y., 2013. Silis Dumani, Kırmızı Çamur Ve Kireç İle Muamele Edilmiş Mikronize Bir Kilin Bazı Geoteknik Özelliklerinin İncelenmesi. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 55s. Erzurum.

Şenol, A., Edil, T., Bin-Shafique, M., H.A., Benson, C. H., 2006. Soft subgrades stabilization by using various fly ashes. Resources, Conservation and Recycling, 46(4), 365-376.

Taşçı, G., 2011. Problemlili Kil Zeminin Geoteknik Özelliklerine Silis Dumanı ve Kireç Katkısının Etkisi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 91s. Eskişehir.

Tokyay, M., Erdoğan, K., 1998. Türkiye Termik Santrallerinden Elde Edilen Uçucu Küllerin Karakterizasyonu. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği / AR-GE/ Y 98.3.

Türkel, U. 2019. Bazalt Fiber Ve Çimento Katkısının Zayıf Zeminlerin Geoteknik Özelliklerine Etkisinin Araştırılması. Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. 94s. Düzce.

Türköz, M., Savaş, H., Tasci, G. 2018. The effect of silica fume and lime on geotechnical properties of a clay soil

showing both swelling and dispersive features. Arab J Geosci., 11(735).

Yeşilççek, H., 2016. Kolemitin Zemin Stabilizasyonunda Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 110s. Trabzon.

Yıldız, A., 2008. Mermer Toz Atıklarının Yol İnşaatında Değerlendirilmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi 172s. Isparta.

Yılmaz, F., 2015. Tüfit Taşların Zemin Stabilizasyonunda Kireçle Birlikte Kullanılabilirliğinin Standart Deneyler Ve Bilgisayarlı Tomografi Tekniği İle Araştırılması. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 181s. Trabzon.

Detection of the Brain Tumor Existence Using a Traditional Deep Learning Technique and Determination of Exact Tumor Locations Using K-Means Segmentation from MR Images

Muhammed Oğuz TAŞ*¹ , Semih ERGİN*² 

*Eskişehir Osmangazi University, Engineering Faculty, Department of Electrical Electronics Engineering, Eskişehir, 26040, Turkey

Research Article, Received Date: 23.09.2020, Accepted Date: 09.11.2020

Abstract

Tumors occur in the brain as the cells in the brain tissue grow abnormally. Since a large amount of tumors in the brain are cancerous, it can have consequences until the death of the sick person. Magnetic Resonance (MR) imaging is widely used as a means of imaging brain tumors. MR images can distinguish diseased and healthy areas using the image's texture, contrast, brightness and boundary information. In this way, planning of the treatment process of the disease can be made by finding the shape, location, size and area of the brain tumor. In this study, the detection of the brain tumor in MR images by using deep learning and the segmentation with K-means are performed. As a result of the study, the accuracy obtained in detecting of the brain tumor is 84.45%, and the sensitivity is 95.04%. The study proposed detection and segmentation of the brain tumor and, extracting the tumor area automatically.

Keywords: Magnetic resonance imaging, Brain tumor detection, Brain tumor segmentation, Deep learning, K-means

Beyin Tümörü Varlığının Geleneksel Derin Öğrenme Tekniği Kullanılarak Tespiti ve MR Görüntülerinden K-Means Segmentasyonu Kullanılarak Kesin Tümör Konumlarının Belirlenmesi

Özet

Beyin dokusunda bulunan hücrelerin anormal bir şekilde büyümesi ile beyinde tümörler meydana gelmektedir. Beyinde bulunan tümörlerin büyük bir miktarı kanserli olduğu için, tümörlü beyin hasta kişinin ölümüne kadar sonuçlar doğurabilir. Beyin tümörlerinin görüntülenmesinde yaygın olarak Manyetik Rezonans (MR) görüntüleme araç olarak kullanılmaktadır. MR görüntüleri, görüntünün doku, karşıtlık, parlaklık ve sınır bilgilerini kullanarak hastalıklı ile sağlıklı bölgeleri ayırabilmektedir. Bu sayede, beyin tümörünün şekli, konumu, büyüklüğü, alanı bulunarak hastalığın tedavi sürecinin planlaması yapılabilmektedir. Bu çalışmada, derin öğrenme yardımı ile MR görüntülerinde beyin tümörünün tespit edilmesi ve K-means ile bölütlenmesi işlemi yapılmaktadır. Çalışma sonucunda beyin tümörünün tespit edilmesinde elde edilen doğruluk oranı %84,45, hassasiyet %95,04 olarak bulunmuştur. Çalışma ile, tam otomatik bir beyin tümörü tespit etme ve bölütleme önerilerek, tümörlü bölgenin doğru bir şekilde çıkarılması amaçlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Manyetik rezonans görüntüleme, Beyin tümör tanıma, Beyin tümörü bölütleme, Derin öğrenme, K-means

¹Sorumlu yazar motas@ogu.edu.tr, ²sergin@ogu.edu.tr

1. INTRODUCTION

A brain tumor is an abnormal growth of cells in the brain tissue. Although some of the tumors occurring in the brain are benign, some are cancerous and can have consequences until the death of the person. Brain tumors can be shown in detail by imaging methods such as Ultrasonography, Computed Tomography (CT), Magnetic Resonance Imaging (MRI), and can provide medical doctor who study the case to understand the tumors and know the location of tumors.

Magnetic Resonance Imaging (MRI) is one of the most used methods for imaging the build of the human body. In particular, it has an important place in detecting diseases that may occur in the brain, as it can offer much more contrast between the soft tissues of the body. It can give higher resolution and less harm than CT. By using brain MR images, brain diseases such as Alzheimer's, Epilepsy, Schizophrenia, Multiple Sclerosis (MS), and brain tumor can be recognized and used for treatment. Four standard MRI sequences (T1-weighted, T2-weighted, T1-Gd-gadolinium enhanced and FLAIR - Fluid Attenuated Inversion Recovery) can be used for brain tumor diagnoses that are given in Figure 1. The data produced by MR imaging is quite large, which makes it very difficult to process, store, and segment the data.

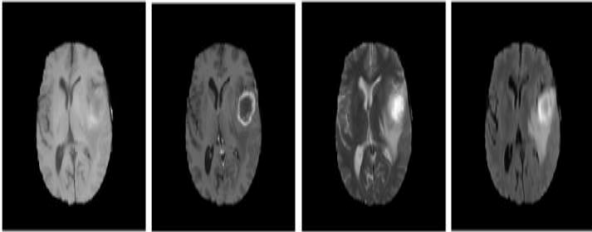


Figure 1. 4 different MR modalities. From left to right: T1-weighted, T2-weighted, T1-Gd and FLAIR. Images taken from BRATS 2013 dataset (Menze et al., 2015).

Detection and segmentation of brain tumor by using MR images is an important issue. Treatment can be planned for the disease by detecting and marking the tumor, and treatment can be tailored according to the structure of the tumor. In the segmentation process, normal brain tissues can be separated from diseased tissues, the location of the tumor region can be determined and the area of the region can be calculated by using different features of the image, such as tissue, contrast, brightness and borders. Segmentation of tumors in MR images can be quite difficult due to factors such as shape, size, and location of the tumor.

In this study, brain tumor detection has been made on MR images with deep learning, and after the brain tumor has been detected, marking of the tumor area has been performed by K-means segmentation. In the section 2, literature review is given, and the section 3, proposed method is explained in detail. The test results obtained in section 4 are given and performance of the study is measured with evaluation criteria. In the last chapter, the results are interpreted and future studies are mentioned.

2. LITERATURE REVIEW

The detection and location of the brain tumor is very important in the treatment process of the disease. Thanks to the deep learning algorithms developed in recent years, a lot of work has been done on the subject (Havaei et al. (2017), Soltaninejad et al. (2019), Damodharan and Raghavan (2015), Pereira et al. (2016), Gurusamy and Subramaniam (2017), Arunkumar et al. (2019), Iqbal et al. (2018), Khan et al. (2019)). Kaya et al., (2017) focused on T1-weighted MR images for brain tumor segmentation using different Principal Component Analysis (PCA) algorithms (CPCA, PPCA, EM-PCA, GHA, APEX). They made a comparison between the differences in PCA algorithms in MR images. Saouli et al., (2018) proposed a fully automated end-to-end method for segmentation of a brain tumor using three deep learning models (2CNet, 3CNet, EnsembleNet). Cabria and Gondra (2017), presented an algorithm based on the analogy of the concept of potential fields in physics. They proposed a new approach by combining the new algorithm called Potential Field Segmentation with other segmentation algorithms and tested the work on the BRATS dataset. Dong et al., (2017) performed the U-net based (Ronneberger et al. (2015)) which is very popular and fast in biomedical image segmentation, brain tumor segmentation in the BRATS 2015 dataset. Nazir et al., (2019) firstly, decomposed the image into wavelet subbands, and then divided it into high-energy subband blocks. Finally, the high variance properties of each block were selected by separate cosine transforms and sent to the neural network for classification. Bahadure et al., (2017) proposed a method for image segmentation based on the Berkeley wavelet transform. They also analyzed images with a Support Vector Machine (SVM) based classifier. Bobotov and Bene (2016), proposed automatic tumor segmentation. Firstly, they removed the cranium region. Later, they analyzed histogram parameters with the mixture of Gaussians and applied morphological reconstruction and threshold applications. Finally, they performed segmentation with the Grab Cut algorithm.

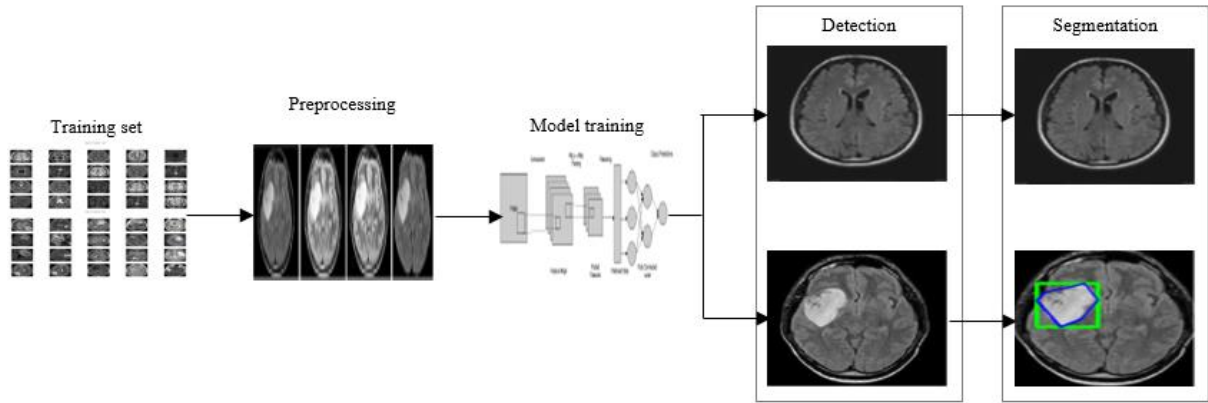


Figure 2. Proposed method flow diagram

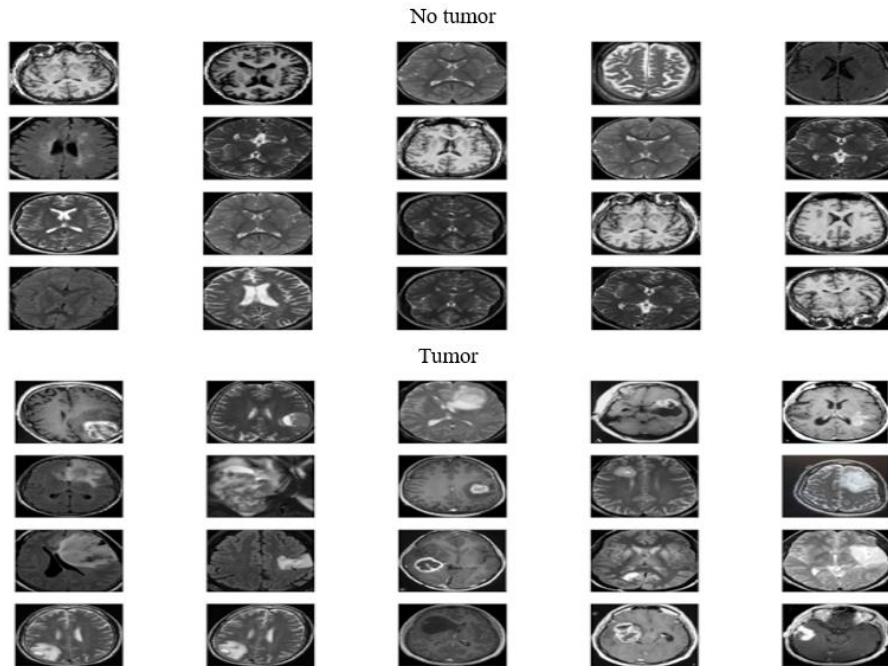


Figure 3. Samples randomly taken from the database. Top side displays negative samples, bottom side displays positive samples

3. PROPOSED METHOD

Detecting the brain tumor and its location in the brain, determining the shape, size and type of the tumor are very important in terms of planning the treatment process. In this study, the dataset consisting of MR images have been preprocessed, a deep learning model has been created and training has been performed. The trained model has been tested with images from the test sets and it has been determined whether there is a tumor in the MR image. At the last stage, the segmentation of the tumor region performed on the images determined to be tumors. The general flow diagram of the study is given in Figure 2; details are explained in the following sub-sections.

3.1. Dataset and Its Augmentation

In the study, the database in Kaggle (2019) was modified and additionally, The Whole Brain Atlas (2019) resource from Harvard University were used. 101 of the 277 MR images in total consist of negative images (without brain tumor) and 176 of positive images (with brain tumor). In order to increase the success of the trainings with a small number of images, data augmentation is frequently used, especially in the biomedical research. New data samples are generated by applying random operations (scale changing, density changing, rotating the image, etc.) in data augmentation. In this study, the data augmentation has been done by flipping the images horizontally and vertically, rotating the images and extending along the axes. With the data augmentation, there are 2486 images

in the database, 1476 positive and 1010 negative. Random samples of both classes are given in Figure 3 in the augmented dataset.

3.2. Preprocessing MR Images

Some pre-processing steps have been implemented before starting the training of MR images. First, the image has been converted to a gray level. In the image converted to gray level, the Otsu's thresholding method was used to remove the cranium region from the image. In the new image obtained, the histogram equalization method used to contrast enhancement. Thus, the difference between contrasts in the brain MRI image increased, making it possible to see the possible tumor region and the brain region more clearly. After histogram equalization, a 5x5 Gauss filter used to eliminate small noises in the image and the image blurred. Erosion is applied to remove small noisy areas. Then, by performing the dilation process, the image was restored to its original shape after the noise removed. The MR images obtained were converted to 256x256x3 size and made ready for training. The original MR image and the performed preprocess steps on the image are given in Figure 4.

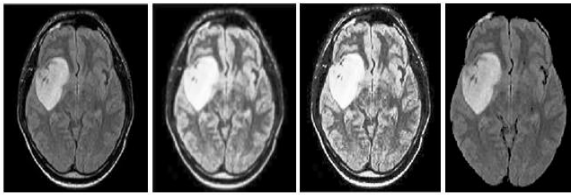


Figure 4. Pre-processing steps. From left to right: gray level image, histogram equalization and image blurring, applying morphological processes, removing cranium region from image.

3.3. Model Building and Training Phase

2486 MR images in the augmented dataset splitted randomly for the 70% for training phase, 15% for the validation phase and 15% for the test phase. Images for training phase are brought to size 256x256, they first go through 64 convolution filters with size 5x5, then normalize the filter outputs and activate with the Rectified Linear Unit (ReLU) activation function. After this stage, it passes through the maximum pooling layer to reduce computational complexity. These stages were done 2 more times and at the last stage, the data flattened and the model gives output. 211,585 parameters are available in the model, 211,201 parameters are trainable and 384 parameters are non-trainable.

3.4. Testing and Segmentation Processes

Using the trained model, the presence of tumor in the MR image for testing detected and the results are evaluated with performance criteria. Then, in the MR images where the tumor detected, the region of the tumor is segmented and marked on the original image. Before performing the segmentation process, the test images passed through the preprocessing stages used for training. The resulting image is segmented by using the K-means algorithm. The K-means is one of the well-known data clustering method for unsupervised learning. In this study, there are three classes to segmentate the MR images into background, tumor and the non-tumor areas. By using these different 3-class tumor location is easily extracted from the MR images. After the K-Means method, a black-and-white image obtained with the threshold method in the image, small noises in the obtained image eliminated with some morphological processes. Finally, the location of the tumor region was found and removed from the image. The tumor area in the segmented image is marked in the original image. The steps applied in the segmentation process are given in Figure 5.

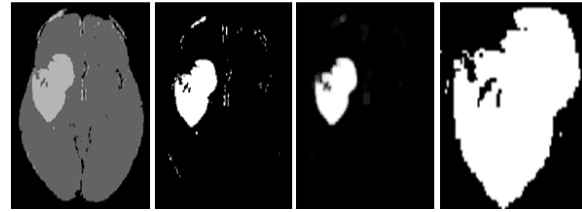


Figure 5. Segmentation steps. From left to right: Using the K-means algorithm, white regions obtained as a result of segmentation, application of morphological processes, application of the threshold method

4. EXPERIMENTAL WORKS

The study was performed on a PC with Ubuntu 16.04 and Nvidia GeForce GTX 1050 graphics card. The created model is trained to batch size 16 and epoch 25. The training took 9 minutes and 32 seconds on the GPU. The graph of the loss functions and accuracy functions for the training set and the validation set at the end of the training is given in Figure 6. As you seen in the Figure 6 that, the validation loss and accuracy is converged when they are reached to the sufficient epoch size.

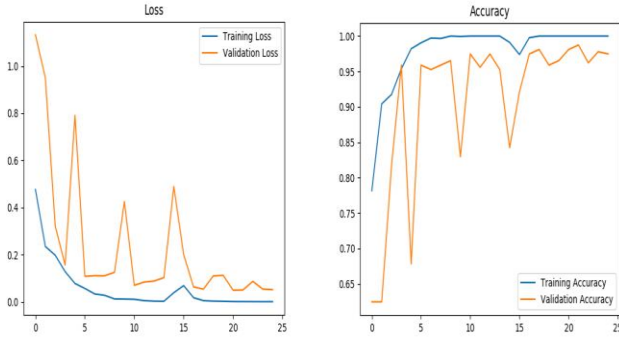


Figure 6. Loss function (left), accuracy function (right) for training and validation sets

According to the results obtained at the end of the training, the test MR images (221 tumors – positive, 152 healthy – negative) evaluated according to the following performance criteria.

Confusion matrix: The confusion matrix includes True Positive - TP (tumor with a tumor MRI image), False Positive - FP (tumor with a healthy MR image), False Negative - FN (healthy with a MR image with tumor), and True Negative - TN (healthy to a healthy MR image). At the end of the study, the confusion matrix formed as follows.

$$\text{Confusion Matrix} = \begin{bmatrix} 211 & 47 \\ 11 & 104 \end{bmatrix}$$

The accuracy of the study (whether there is a tumor in the MR image or not) calculated according to the following equation.

$$\text{Accuracy} = \frac{TP+TN}{(P+N)} = \frac{211+104}{211+47+11+104} = 0.8445 \quad (1)$$

Precision in the study (how many of the images called tumors are actually tumors) calculated according to the following equation.

$$\text{Precision} = \frac{TP}{(TP+FP)} = \frac{211}{211+47} = 0.8178 \quad (2)$$

Sensitivity in the study (the rate of accurately detecting tumor MR images) calculated according to the following equation.

$$\text{Sensitivity} = \frac{TP}{(TP+FN)} = \frac{211}{211+11} = 0.9504 \quad (3)$$

The F1 score (harmonic mean of precision and sensitivity) in the study calculated according to the following equation.

$$F1 = 2 * \frac{\text{precision} * \text{sensitivity}}{\text{precision} + \text{sensitivity}} = \frac{0.8178 \times 0.9504}{0.8178 + 0.9504} = 0.8792 \quad (4)$$

A comparison between the proposed method and some studies found in especially the recent literature is given in the Table 1 by considering the metrics of accuracy, sensitivity and F1 score.

Table 1. Comparison between our proposed method and studies found in the recent literature by considering three different performance metrics.

Research Paper (Year)	Performance Metrics		
	Accuracy	Sensitivity	F1 Score
Damadhoran and Raghavan (2015)	83.00%	100%	-
Akkus et al. (2016)	87.70%	93.30%	-
Hussain et al. (2017)	-	82.00%	80.00%
Soltaninejad et.al (2018)	-	96.00%	89.00%
Thaha et al. (2019)	92.00%	90.00%	-
Proposed Method (2020)	84.45%	95.04%	87.92%

When we examined the table given above, it was observed that the accuracy obtained in our study is less successful than the other studies specifically the recent literature (2015-2020); but higher values have been evaluated with respect to the metrics of sensitivity and F1 score. The accuracy is a kind of metric that measures whether there is a tumor in an MR image or not, and therefore it is not sufficient to express the success of any study alone. Along with the accuracy, the sensitivity, indicating that the proportion of positives that are correctly identified (e.g., the percentage of MR images with tumor which are correctly classified as having cancer), is a frequently used metric to measure the comprehensive success of a research study. Considering 95.04% as sensitivity metric obtained in the proposed study, MR images with tumor in the database was detected with a very high ratio. It has been also observed that the F1 score, which is the harmonic mean of the precision and sensitivity metrics, gives quite close results compared with the studies given in the Table 1. As it is understood from the evaluation criteria, it has been determined that the presence of a brain tumor in MR images is high with the built model.

After the information that the test image contains a tumor, the image segmented to find the location of the tumor area. In Figure 7, there are examples for accurate and false tumor region segmentation.

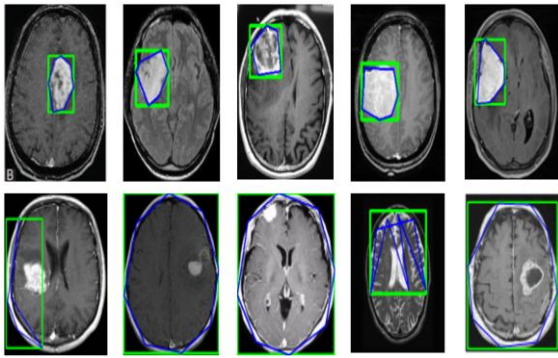


Figure 7. Accurate segmentation results (top), false segmentation results (bottom) in test MR image

It was observed that main causes of the false segmentation results in MR images are removal cranium area and different MR images modalities.

5. CONCLUSION

In this study, by using MR images, determined whether there is a brain tumor in the image, and then, in the test images with tumor, segmentation and display of the tumor region with the K-means algorithm is realized. A brain tumor is detected with 84.45% accuracy and 95.04% sensitivity in the study. In images containing the detected brain tumor, segmentation has been successfully performed. With the study, it has been aimed to plan disease treatment more easily by making a fully automatic tumor detection and segmentation. In future studies, it is aimed to increase the accuracy of the system by combining segmentation algorithms that include more than one method.

REFERENCES

Akkus, Z., Ali, I., Sedlar, J., Kline, T. L., Agrawal, J. P., Parney, I. F., ... Erickson, B. J. (2016). Predicting 1p19q chromosomal deletion of low-grade gliomas from MR images using deep learning. arXiv preprint arXiv:1611.06939.

Arunkumar, N., Mohammed, M. A., Ghani, M. K. A., Ibrahim, D. A., Abdulhay, E., Ramirez-Gonzalez, G., ... Albuquerque, V. H. C. (2019). K-means clustering and neural network for object detecting and identifying abnormality of brain tumor. *Soft Computing*, 23(19), 9083-9096.

Bahadure, N. B., Ray, A. K., Thethi, H. P. (2017). Image analysis for MRI based brain tumor detection and feature

extraction using biologically inspired BWT and SVM. *International journal of biomedical imaging*, 2017,1-12, <https://doi.org/10.1155/2017/9749108> 1-12.

Bobotov, Z. and Bene, W. S. (2016). Segmentation of Brain Tumors from Magnetic Resonance Images using Adaptive Thresholding and Graph Cut Algorithm. *In The 20th Central European Seminar on Computer Graphics*, April 24-27, Slovakia.

Cabria, I. and Gondra, I. (2017). MRI segmentation fusion for brain tumor detection. *Information Fusion*, 36, 1-9.

Damodharan, S. and Raghavan, D. (2015). Combining Tissue Segmentation and Neural Network for Brain Tumor Detection. *International Arab Journal of Information Technology (IAJIT)*, 12(1), 42-52.

Dong, H., Yang, G., Liu, F., Mo, Y., Guo, Y. (2017). Automatic brain tumor detection and segmentation using U-Net based fully convolutional networks. *In annual conference on medical image understanding and analysis*, pp. 506-517. July 11-13, UK.

Gurusamy, R. and Subramaniam, V. (2017). A machine learning approach for MRI brain tumor classification. *Computers, Materials & Continua*, 53(2), 91-108.

Havaei, M., Davy, A., Warde-Farley, D., Biard, A., Courville, A., Bengio, Y., ... Larochelle, H. (2017). Brain tumor segmentation with deep neural networks. *Medical image analysis*, 35, 18-31.

Hussain, S., Anwar, S. M., Majid, M. (2017). Brain tumor segmentation using cascaded deep convolutional neural network. *In 39th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, pp. 1998-2001, 11-15 July, South Korea.

Iqbal, S., Ghani, M. U., Saba, T., Rehman, A. (2018). Brain tumor segmentation in multi-spectral MRI using convolutional neural networks (CNN). *Microscopy research and technique*, 81(4), 419-427.

Kaggle. 2019. Internet: <https://www.kaggle.com/navoneel/brain-mri-images-for-brain-tumor-detection>

Kaya, I. E., Pehlivanlı, A. Ç., Sekizkardeş, E. G., İbrikci, T. (2017). PCA based clustering for brain tumor segmentation of T1w MRI images. *Computer methods and programs in biomedicine*, 140, 19-28.

Khan, M. A., Lali, I. U., Rehman, A., Ishaq, M., Sharif, M., Saba, T., ... Akram, T. (2019). Brain tumor detection and classification: A framework of marker-based watershed algorithm and multilevel priority features selection. *Microscopy research and technique*, 82(6), 909-922.

Menze B., Jakab A., Bauer S., Kalpathy-Cramer J., Farahani K., Kirby J., ... Leemput K.V. (2015). The Multimodal brain tumor image segmentation benchmark (brats). *IEEE Trans Med Imaging*, 34(10):1993-2024.

Nazir, M., Khan, M. A., Saba, T., Rehman, A. (2019). Brain Tumor Detection from MRI images using Multi-level Wavelets. *In 2019 International Conference on Computer and Information Sciences (ICCIS)*, pp. 1-5, 3-4 April, Saudi Arabia.

Pereira, S., Pinto, A., Alves, V., Silva, C. A. (2016). Brain tumor segmentation using convolutional neural networks in MRI images. *IEEE transactions on medical imaging*, 35(5), 1240-1251.

Ronneberger, O., Fischer, P., Brox, T. (2015). U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. *In International Conference on Medical image computing and computer-assisted intervention*, pp. 234-241, October 5-9, Germany.

Saouli, R., Akil, M., Kachouri, R. (2018). Fully automatic brain tumor segmentation using end-to-end incremental deep neural networks in MRI images. *Computer methods and programs in biomedicine*, 166, 39-49.

Soltaninejad, M., Yang, G., Lambrou, T., Allinson, N., Jones, T. L., Barrick, T. R., ... Ye, X. (2018). Supervised learning based multimodal MRI brain tumour segmentation using texture features from supervoxels. *Computer methods and programs in biomedicine*, 157, 69-84.

Soltaninejad, M., Zhang, L., Lambrou, T., Yang, G., Allinson, N., Ye, X. (2019). MRI brain tumor segmentation using random forests and fully convolutional networks. *arXiv preprint arXiv:1909.06337*.

Thaha, M. M., Kumar, K. P. M., Murugan, B. S., Dhanasekeran, S., Vijayakarhick, P., Selvi, A. S. (2019). Brain tumor segmentation using convolutional neural networks in MRI images. *Journal of medical systems*, 43(9), 294.

The Whole Brain Atlas. 2019. Internet: <http://www.med.harvard.edu/AANLIB/home.html>

İLERİ MÜHENDİSLİK ÇALIŞMALARI VE TEKNOLOJİLERİ DERGİSİ

Data Analysis of the Factors Related with Covid-19 Death Ratios: Cases in Spain, Italy, UK, Germany and Portugal

Orkun TEKE¹ , Tolga DEPCI² , Aytemis DEPCI³ 

¹Manisa Celal Bayar University, Manisa Vocational School of Technical Sciences, Manisa, 45140, Turkey

²İskenderun Technical University, Faculty of Engineering, Petroleum and Natural Gas Engineering, Hatay, 31200, Turkey

³İskenderun Technical University, School of Foreign Languages, Hatay, 31200, Turkey

Research Article, Received Date: 30.09.2020, Accepted Date: 09.11.2020

Abstract

Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus- 2 (COVID-19) pandemic has been created worldwide chaos and also great pressure on the health systems of countries at the same time. While some countries are able to cope with the pandemic successfully, on the other hand, some countries have taken insufficient measures to prevent the spread of the pandemic. In this study, the data of some European Union Region countries, which had distressful days with this pandemic, have been used and analyzed. The main purpose of this study is to argue the effect of some factors causing different death ratios such as sugar consumption, vaccination of TBC, and air pollution, between Italy, Spain and United Kingdom which have been suffering from this crisis severely and Germany and Portugal which have been exhibited relatively better conditions than others and expected to get normalized quickly during this pandemic. General evaluation of the factors that can increase the effect of the pandemic is discussed among the focused group countries.

Keywords: Covid-19, Sugar consumption, TBC vaccine, Air pollution.

Covid-19 Kaynaklı Ölüm Oranlarının Seçili Faktörlerle İlgisine Yönelik Data Analizi: İspanya, İtalya, Birleşik Krallık, Almanya ve Portekiz Örnekleri

Özet

Şiddetli Akut Solunum Sendromu Koronavirüs-2 (COVID-19) salgını dünya çapında bir kaos yaratırken aynı zamanda ülkelerin sağlık sistemleri üzerinde de büyük bir baskı yaratmıştır. Bazı ülkeler pandemiyle başarılı bir şekilde başa çıkarken, diğer taraftan bazı ülkeler pandeminin yayılmasını önlemede yetersiz kalmıştır. Bu çalışmada, pandemi sürecinde sıkıntılı günler geçiren bazı Avrupa Birliği Bölgesi ülkelerinin verileri kullanılmış ve analiz edilmiştir. Bu çalışmanın temel amacı, bu krizden ciddi şekilde etkilenen İtalya, İspanya ve Birleşik Krallık ile diğerlerine nispeten daha iyi bir durum sergileyen ve hızla normale dönmesi beklenen Almanya ve Portekiz arasında şeker tüketimi, TBC aşısı, hava kirliliği gibi farklı ölüm oranlarına neden olan bazı faktörlerin etkisini tartışmaktır. Pandeminin etkisini artıracak faktörlerin genel değerlendirmesi, odak grup ülkeleri arasında karşılaştırmalar yapılarak tartışılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Covid-19, Şeker tüketimi, TBC aşısı, Hava kirliliği.

¹Corresponding author orkunteke@gmail.com, ²tolga.depci@iste.edu.tr, ³aytemis.depci@iste.edu.tr

1. INTRODUCTION

Since ancient times, it had been faced with many virutic or bacterial diseases which are invisible enemies of humanity such as plague, Spanish Flu, SARS (Severe acute respiratory syndrome) MERS (Middle East Respiratory Syndrome), Ebola pandemics causing massive deaths. Nowadays, humanity is in trouble with another invisible enemy called COVID-19 and struggling global scale. In the future, as long as the humanity continues to harm the nature and pillage the wildlife, it seems that such zoonotic pandemics will follow on.

COVID-19, which causes lethal effects, especially in the elderly and people with chronic disease, has been identified as the same family and zoonotic with SARS and MERS viruses (Wang et al. 2020). As known, this pandemic started at Wuhan region in China in the last days of December 2019 also deaths were reported at the end of 2019. The virus, which had spreading rate that increased as exponentially globally, spread to almost the whole world (Fig. 1 and Fig. 2).

Some countries ignored this pandemic at first and their health system reached maximum capacity rapidly and they became inadequate to provide even basic health care services. However, some countries took precautions like “social distancing, isolation, curfew etc.” and targeted “Controlled spreading” which means spreading the number of infected people in time and not putting pressure on their health system.

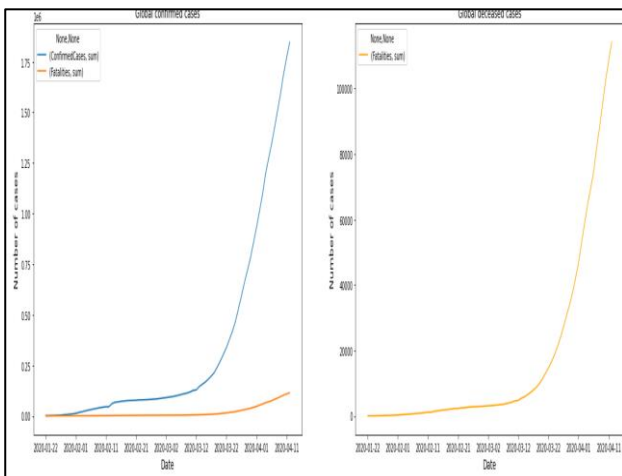


Figure 1. Global Confirmed cases and fatalities (Until 14.04.2020)

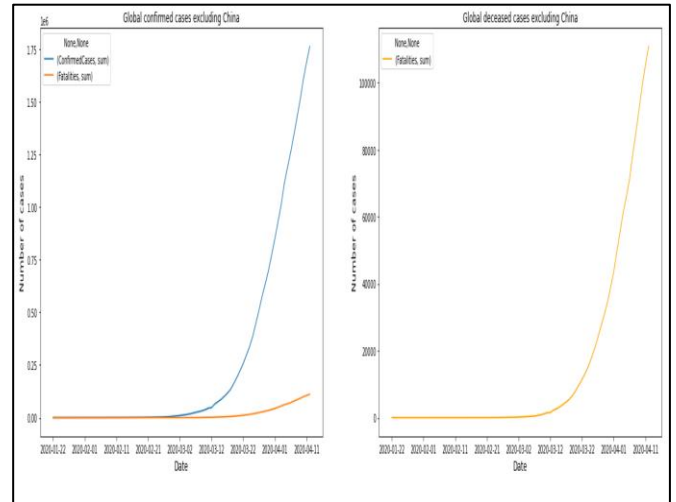


Figure 2. Global Confirmed cases and fatalities excluded China (Until 14.04.2020)

Italy, Spain and United Kingdom announced much more cases and deaths than other European region countries. Day by day their numbers are increasing. Also, in the three countries, the ratio of mortality to the confirmed cases is constantly increasing due to the pressure on the health care systems. However, in countries such as Germany and Portugal, although the number of cases has been increased, mortality rates and spreading rates remain stable.

With the COVID-19 epidemic, the number of cases and cases and intensive care unit needs are increased. Therefore, the suppression of health systems occurred to great concerns about the health system capacities of European countries and the effective response for patients, who needs treatment, ability. Europe has become a new epicenter with the United States. The mortality rate, which is 4% in China, is 13% in Italy and 11% in Spain (Ceylan, 2020).

In this study, in addition to precautions taken by countries, it has been tried to analyze whether there is a relationship between the death resulted by COVID-19 in terms of vaccine calendars, air pollution and sugar consumption.

2. SPREADING PROCESS OF COVID-19 PANDEMIC IN FOCUSED COUNTRIES

2.1. The Short History of Covid-19 Pandemic in Italy

After announcing this outbreak as “Pandemic”, the first official cases were seen in Italy with the positive tests of 2 tourists coming from China on 31 st January 2020. This date has been confirmed by Italian government as the starting date of the spread of the virus all around the country. After this case, as the global scale, the disease factor spread, throughout the country with exponential velocity and almost in one and half months, nearly two hundred thousand people were infected.

On 31 st of January 2020 Italian government firstly suspended all flights from China and a few weeks later, all domestic and international flights were suspended to prevent spreading. After, the first day of March, the government made some regulations regarding the social life such as social distancing, isolation and quarantine.

By April 15, Italy had conducted about 1,117,400 tests for the virus. Due to the limited numbers of tests performed, the real number of infected people in Italy, as in other countries, is estimated to be higher than the official count (Lau etc. 2020).

Recent days with the isolation and quarantine, the situation is getting quite better than before. One of the most important scale for normalization is “recovery rate vs date rate”. This rate is decreased positively in Italy (Fig. 3).

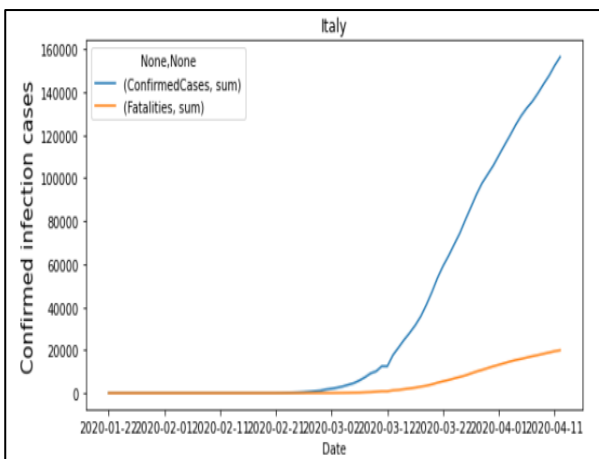


Figure 3. Total Confirmed cases and fatalities in Italy (Until 14.04.2020)

Confirmed cases and daily deaths decrease with precautions (curfew, quarantine etc.) taken by the government (Fig. 4-5). While the death rate decreases due to the decrease in the number of cases and the pressure on the health system, the recovery rates increase (Fig. 6).

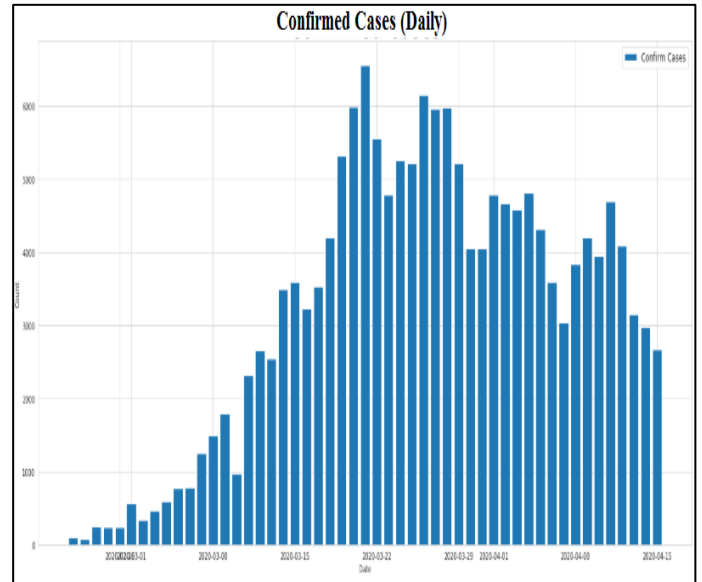


Figure 4. Confirmed cases day by day Italy (Until 15.04.2020)

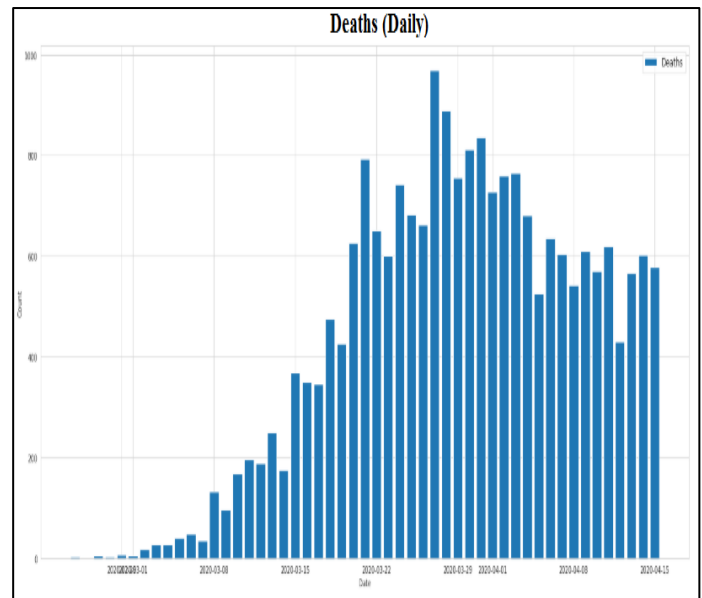


Figure 5. Deaths day by day Italy (Until 15.04.2020)

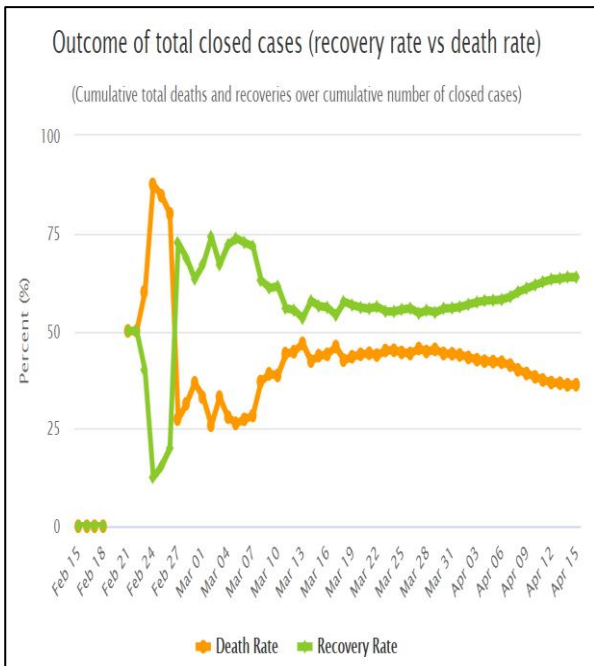


Figure 6. Recovery rate vs. death rate in Italy (Worldometers, 2020)

2.2. The Short History of Covid-19 Pandemic in Spain

Spain is one of the countries which have been affected much more from COVID-19 pandemic. The first case was confirmed on 31st of January 2020, with the test result of a German tourist in Canary Islands. On 14th of March 2020 national lockdown was announced and still continues.

Between 26st of February- 13th of March 2020 period was recorded as the fastest spreading period in the country. During this period, almost 120.000 people attended to “International Women’s Day” celebration in Madrid. In addition, various gatherings, events and organizations made a lot of people infected. After this period, death numbers and confirmed cases decreased constantly. Until the mid of April, almost more than 10.000 confirmed cases and more than 900 deaths reported daily. The country declared state of emergency until 26 April 2020.

It was stated that confirmed cases, infected numbers and deaths periodically decreased in Spain which is one of the countries with the highest number of cases and the most affected by the Covid 19 epidemic in Europe until the mid of April. Until 16 April 2020, there have been 182,816 confirmed cases and 19,130 deaths in Spain (Fig. 7).

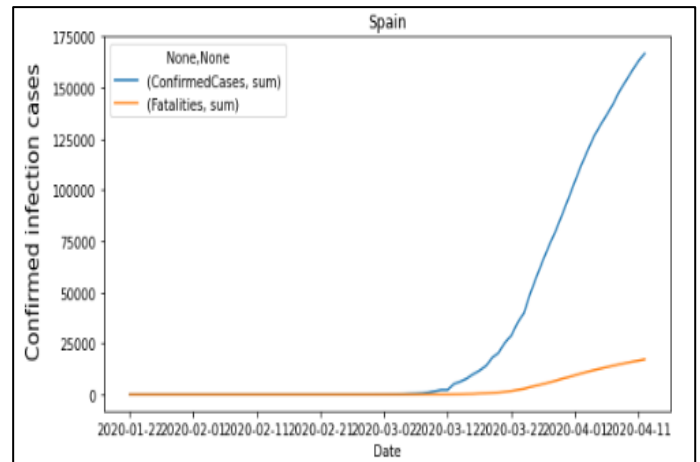


Figure 7. Confirmed cases and fatalities in Spain (Until 15.04.2020)

Daily new cases and deaths are still at high numbers. Spain has an irregular daily cases and deaths chart. This situation also suppresses the recovery rate-death rate chart, which shows that countries are on the right direction in the COVID-19 struggle (Fig. 8, Fig. 9 and Fig. 10).

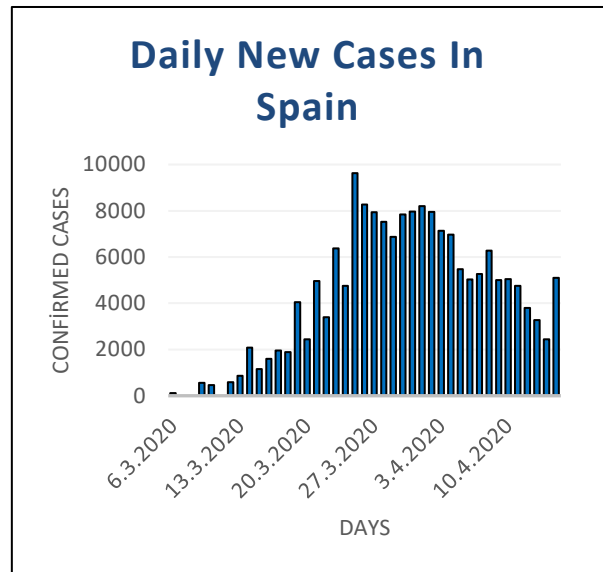


Figure 8. Confirmed daily cases in Spain (Until 15.04.2020)

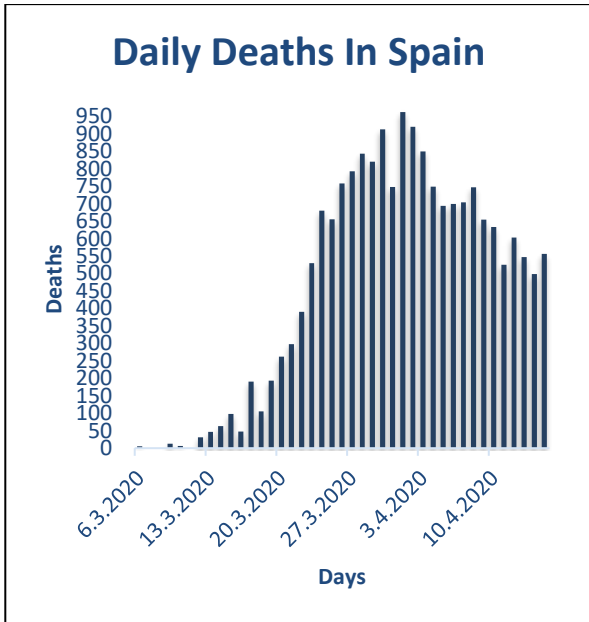


Figure 9. Daily Deaths in Spain (Until 15.04.2020)

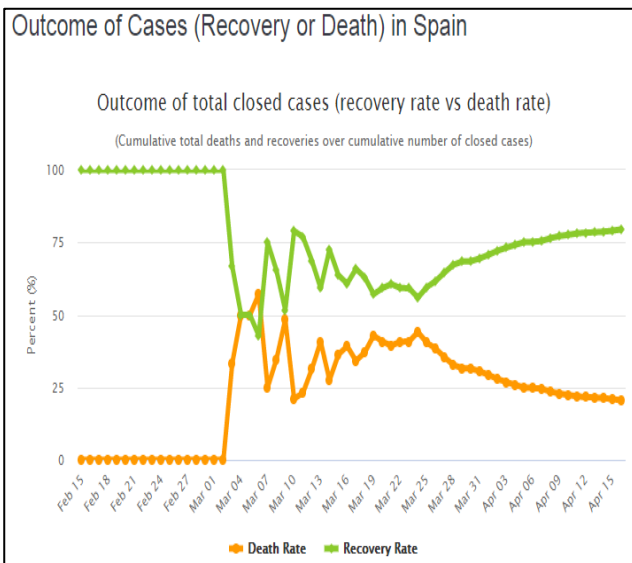


Figure 10. Recovery rate vs. death rate in Spain (Worldometers, 2020)

2.3. The Short History of Covid-19 Pandemic in United Kingdom (UK)

In UK, first confirmed case was identified last week of January, transmission was announced in February and the number of confirmed cases increased rapidly in March. When novel coronavirus outbreak was announced as “Pandemic” by World Health Organization, British Government did not take this situation seriously and tried “Herd Immunity”. However, with the acceleration of transmission of the virus, almost

more than 100.000 people were infected in a really short time and this situation was threatened UK Health Care System because of the inadequate capacity of hospitals and as a result the mortality rate increased around the Kingdom.

Because of the rapid increase of confirmed cases and deaths, the government made some legal arrangements regarding domestic and international flights, closure of schools and universities, imposing travel restrictions and cancelation of organizations which people can join collectively and brought rules about social distancing and self-isolation. On 18 March 2020, British government announced “Lockdown” across the country. Also, mid of March, Crown Prince Charles and late March UK Prime Minister Boris Johnson tested positive for the virus. In April 5th, the Prime Minister hospitalized and needed intensive care due to the disease. Boris Johnson left hospital on 12 April 2020.

Mid of April, UK has had almost more than 100.000 confirmed cases and 13.000 deaths (Fig. 11). The number of cases and deaths continue to increase in UK, whose massive outbreak cannot be controlled down (Fig. 12).

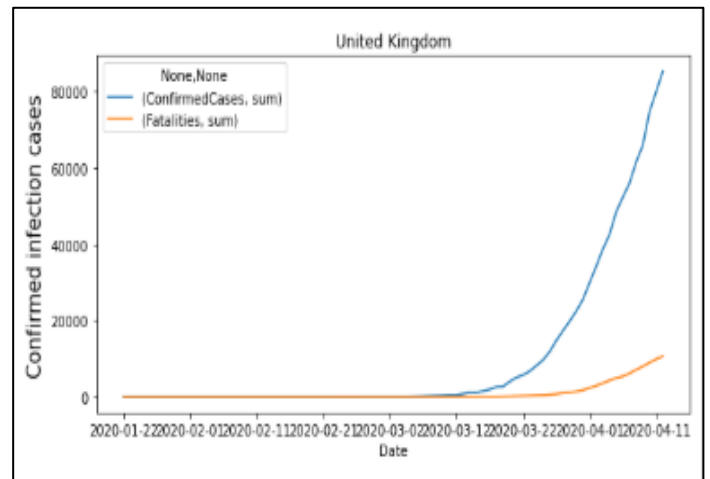


Figure 11. Total Confirmed cases and fatalities in UK (Until 14.04.2020)

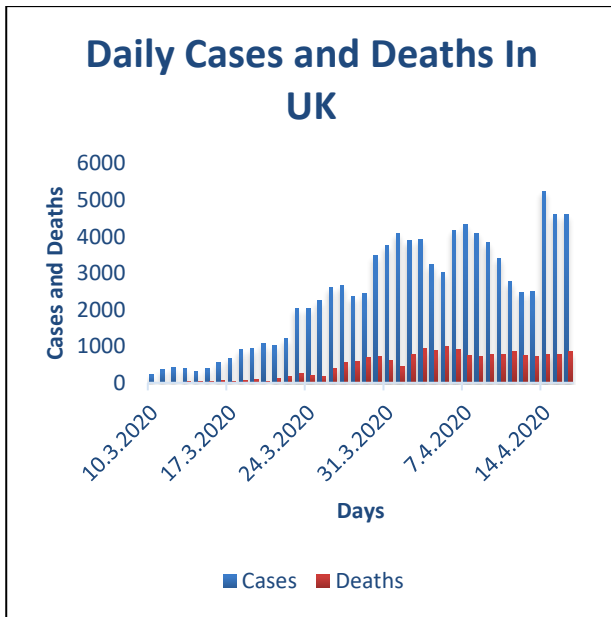


Figure 12. Daily confirmed cases and deaths in UK (Until 16.04.2020)

2.4. The Short History of Covid-19 Pandemic in Germany

COVID-19 Pandemic reached to Germany 27 January 2020 that confirmed first case Bavaria, Munich. Germany is one of the most successful countries in Europe that can control the pandemic. Transmission of disease is getting under control day by day with cooperation of the government policies and Robert Koch Institute (RKI). RKI created Pandemic Master Plan which is about precautions and upper level surveillance and test applications as much as possible.

According to RKI plan which started in February, prohibiting travels, closure of schools- kinder gardens and institutes, closing of borders to five neighborhood countries, cancellation of all flights, social distancing- isolation and solid quarantine protocols were regulated and done. By these means, German government moved one step ahead and announced “National Curfew” on 22 March 2020.

Despite the increasing number of cases, Germany seems to be the most successful crisis coordinator among European countries with its low mortality rate and less pressure of the health system. With almost 2 million tests are done in a short time (20629 tests per 1 million people) Germany has the highest test numbers in Europe. Thus, early diagnosis and quarantine procedures of infected people are provided (Fig. 13 and Fig. 14).

Within those countries, Germany has one of the best recovery rate- death rate numbers in Europe (Fig. 15).

With the advantage of Prime Minister Angelina Merkel who is a scientist, Germany, which combines scientific data with German discipline, is one of the countries that can overcome this pandemic with minimum damage compared to the other European Countries.

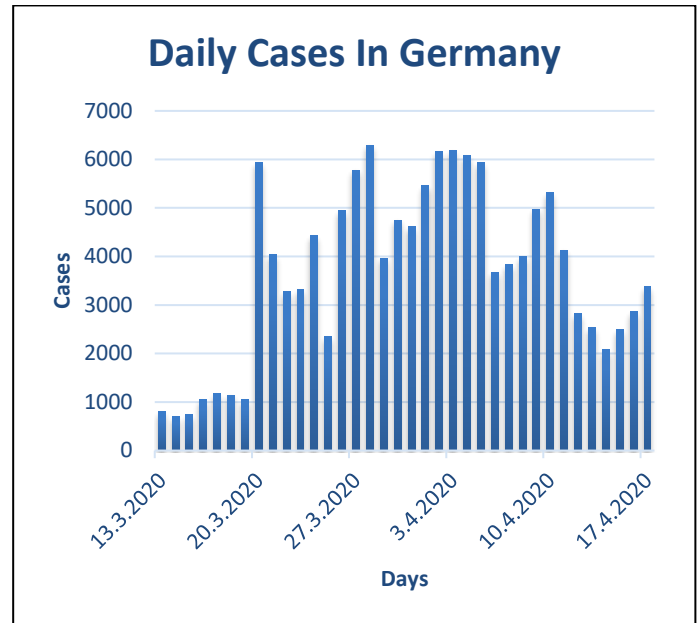


Figure 13. Daily confirmed cases and deaths in UK (Until 16.04.2020)



Figure 14. Daily confirmed cases and deaths in UK (Until 16.04.2020)

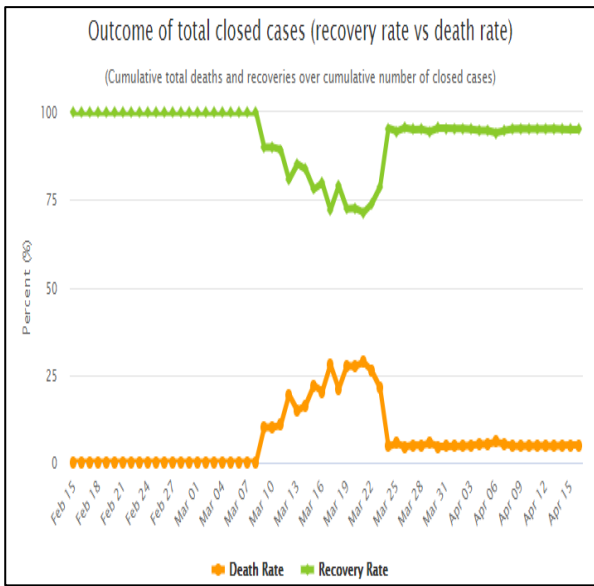


Figure 15. Daily confirmed cases and deaths in UK (Until 16.04.2020) (Worldometers, 2020)

2.5. The Short History of Covid-19 Pandemic in Portugal

Portugal is one of the smallest countries in Eurasia Region with its high potential tourism destinations and therefore naturally affected from this pandemic like the other European Countries. However, this pandemic reached to Portugal on mid of March. On 24 March, the Portuguese Government admitted that the country could not struggle with COVID-19 any more, as it is widespread, and, on 26 March, the country entered the Mitigation Stage. The health care sites dedicated to fight the disease started including the Portugal Health center groups. Portuguese Government decreed special measures in restricting people movements between municipalities with very few exceptions, closing all airports to civil transportation and increased control in the national borders.

Compared to the population of Portugal, they have a similar profile with Germany. They took precautions early and determined their policies according to this scientific examination and modeling. Their number of tests approached 250.000 in a period of 1 month (21.678 in 1 million people- Third in Europe) and they applied strict quarantine procedures prevailing over the chaos seen in other Mediterranean countries. The number of cases and deaths are lower in Portugal along with Germany. Daily cases and deaths are in a decreasing trend (Fig. 16 and Fig.17).

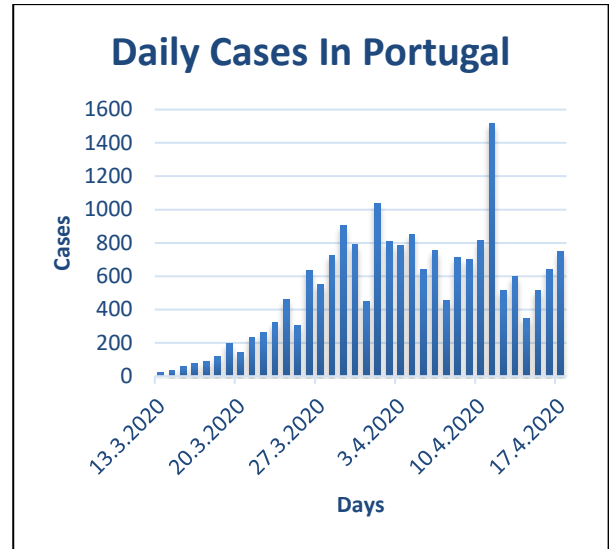


Figure 16. Daily confirmed cases in Portugal

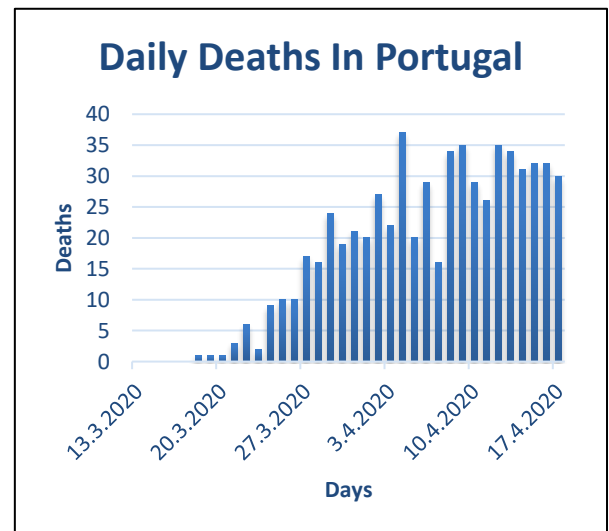


Figure 17. Daily deaths in Portugal

3. COUNTRY BASIS ANALYSIS OF FACTORS THAT CAN INCREASE THE IMPACT OF THE PANDEMIC

3.1. Sugar Consumption, Obesity and Diabetes of Focused Countries

After the 2005 sugar reform in Europe, sugar production and consumption were tried to be regulated by introducing certain quotas to the market (El Behri et al., 2008). Although the European Commission, WHO and other health organizations have also tried to prevent excessive consumption of sugar, obesity and diabetes are still one of the most important metabolic disorders that threaten Europe.

Food and beverage consumption with corn-derived fructose plays an important role which increases childhood and youth chronic diseases rapidly in the modern world (Malik, Schulze, Hu, 2006; Korkmaz, 2008; Tam et al., 2006; Moreno and Rodriguez 2007; Ochoa, Moreno-Aliaga, Martinez-Gonzalez, Martinez, Marti, 2007). High fructose intake increases insulin resistance and causes impaired glucose tolerance triggering the development of chronic diseases such as hyperinsulinemia, hypertriglyceridemia and hypertension (İşgüzar et al. 2016).

It can be said that healthy nutritional habits have a positive effect on people's immune systems. However, the conditions of countries' access to food, the welfare level of citizens, and their purchasing power of food in terms of balanced nutrition is different for each country. Also, sugar consumption is another controversial topic. Some studies show that there is a negative relationship between the excessive sugar consumption and the strength of the immune system. According to a study conducted at Warwick Medical School (WMS); high blood sugar levels reduce the sensitivity of special receptors that recognize bacteria and viruses. Rising sugar levels block the receptors that play a role in the immune system, making the body susceptible to bacterial and virutic infections (WMS,20011).

The effects of sugar on human health are examined under 3 main headings. The first suggests that sugar is the main cause of dental caries, and a noticeable decrease in caries incidents were observed with the lower sugar consumption. Secondly, it suggests that the excessive consumption of sugar causes obesity and diabetes in the future, with the storage of sugar as fat in the body. Thirdly, it argues that excessive sugar intake could displace micronutrient-dense foods from the diet,

resulting of vitamin and mineral deficiency (Ruxton et al. 1999).

The World Health Organization (WHO) emphasizes that a maximum of 5% of the daily intake of energy should consist of simple sugar, and health problems may begin above this amount (WHO, 2019).

In this part, the nutritional habits and sugar consumption of the 5 countries have been investigated since the pandemic spreading rate may have an effect on this. According to International Diabetes Federation (IDF) 2016 data, sugar intake in adults' ranges from about 16-17% in Spain and in the United Kingdom. Worryingly, sugar intake is much higher among children to nearly 25% in Portugal (de Sabata et.al. 2016). There may be a relationship between immune system disorders and COVID-19 deaths due to the obesity and sugar consumption.

Between focused countries, Germany is the lead on table with high sugar consumption than others. It is clearly seen that they are above the EU average which is around 20 kg / capita. In focused countries, only Portugal has below average consumption value among adults (Table. 1).

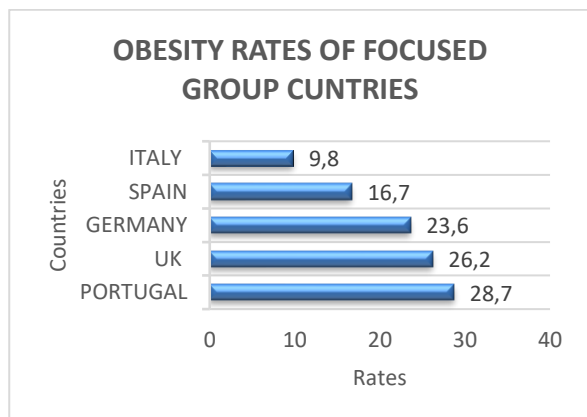
Table 1. Countries Sugar Consumption in 2018 (Protectivity Insurance, 2019)

Country	Population	Consumption (metric tonnes)	Consumption (kg /capita)	Consumption (gs)	Teaspoons (4g)
Germany	82,665,600	2,645	32	32000	8
UK	65,648,054	2	25	30465	7.618
Italy	60,497,174	1,706	28	28200	7,05
Spain	46,549,045	1,215	26	26097	6,524
Portugal	10,309,73	1,95	19	18907	4,72

As known, Spain- Italy and UK have higher mortality rates than other European countries. Especially Spain has almost 429 deaths/ 1M Pop. When the table is analyzed according to COVID 19 mortality rates, Germany's low mortality rate contradicts the relation between sugar consumption and possible COVID-19 deaths.

Having relatively high mortality rates, Italy, Spain and UK are among the countries with high sugar consumption ratios and this cause-effect relationship may have investigated further as a possible field of study. According to OECD data, the country with the highest obesity rate in focused group countries is Portugal (Fig. 18). UK is the second and Germany is the third. Italy has the lowest obesity rate. When COVID 19 related deaths are analyzed, UK, Italy and Spain have higher mortality rates than Portugal and Germany.

“Past- Today and Future Projection for Countries” Publication of International Diabetes Federation, suggest that diabetes, which is a chronic disease, is seen in Germany much higher than other focused group countries in 2010 and 2019 (Fig. 19) (IDF, 2020). In the future, it is thought that Germany will take the lead in this matter. In addition, although the diabetes rate of Spain was low in 2010, it is another important conclusion drawn from the data that it increased in 2019 and reached almost the same level with Italy. When the future projection is examined, it is thought that Spain will surpass Italy. UK has followed a stable rate over the years. This rate is not expected to change in the future. Portugal has a low level of diabetes rate despite the intense sugar consumption. This is not expected to undergo a critical change in the coming period.

**Figure 18.** Obesity Rates of Focused Group Countries (OECD, 2020)

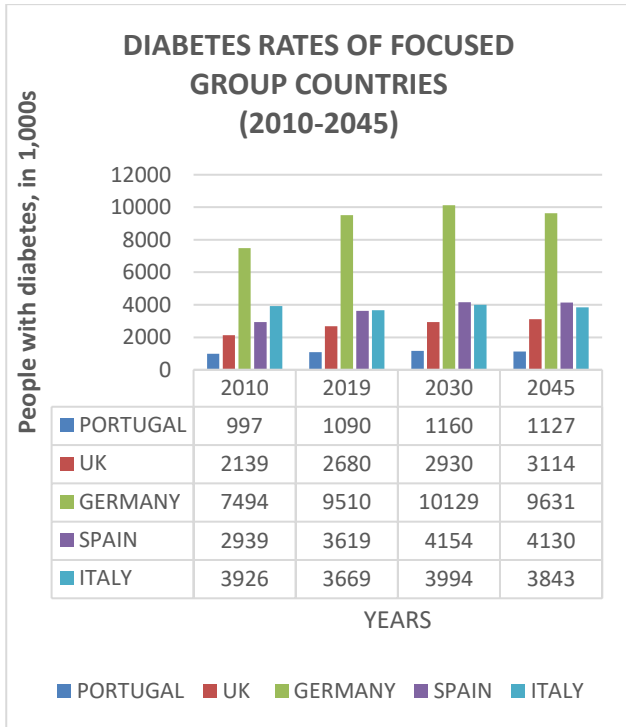


Figure 19. Diabetes Rates of Focused Group Countries (IDF, 2020)

3.2. Vaccine Calendars of Focused Countries

It is well known that vaccine is very significant as a primary protection of the public health for virutic and bacterial diseases. The immunization with vaccines against preventable infections and other diseases which can be contagious is the best defense mechanism we have. In the past, immunization with vaccines proved its success with smallpox and other success with smallpox and other diseases as such. Thanks to widespread vaccination, Europe and most of the places around the world are pollution- free now.

The application of the vaccines, which cause various discussions around the world, differs from country to country. While some countries necessarily add some vaccines to their vaccine calendars, some countries do not need to.

If considered within the scope of COVID-19, the existed vaccines related to the other viral illnesses and lung diseases may cause some countries to survive from the pandemic process with lesser damage.

Scientists and researchers work on the vaccine for COVID-19 across the world but only a few started first phase trial which indicates producing the safe and effective vaccine may take months, even years.

Looking at the focus group countries, we see an interesting picture. In the focus group, only the UK and Portugal included tuberculosis (TBC) vaccine in their vaccine calendars. As known, TBC is a really dangerous and contagious disease. European Union Recommended Vaccine Calendars are given for focused group (Fig. 20, Fig. 21, Fig. 22, Fig. 23and Fig.24) (European Centre for Disease Prevention and Control (ECDC), 2020).

<input checked="" type="checkbox"/> General recommendation <input checked="" type="checkbox"/> Recommendation for specific groups only <input checked="" type="checkbox"/> Catch-up (e.g. if previous doses missed) <input type="checkbox"/> Vaccination not funded by the National Health system <input type="checkbox"/> Mandatory vaccination													
PORTUGAL RECOMMENDED VACCINE CALENDAR													
	Birth	Months					Years						
		2	4	6	12	18	5	10	15	25	65	≥ 66	
tuberculosis	BCG												
diphtheria		D	D	D		D	D	d		d ²			
tetanus		TT	TT	TT		TT	TT	TT		TT ²			
pertussis		acP	acP	acP		acP	acP		acp ³				
poliomyelitis		IPV	IPV	IPV		IPV	IPV						
Haemophilus influenzae type b infection		Hib	Hib	Hib		Hib							
hepatitis B	HepB	HepB		HepB									
pneumococcal disease ¹		PCV13	PCV13		PCV13								
meningococcal disease					MenC								
measles					MEAS		MEAS						
mumps					MUMPS		MUMPS						
rubella					RUBE		RUBE						
human papillomavirus infection								HPV (F) ⁴					
influenza											IIV3		

Figure 20. Portugal Recommended Vaccine Calendar (ECDC, 2020)

<input checked="" type="checkbox"/> General recommendation <input checked="" type="checkbox"/> Recommendation for specific groups only <input checked="" type="checkbox"/> Catch-up (e.g. if previous doses missed) <input type="checkbox"/> Vaccination not funded by the National Health system <input type="checkbox"/> Mandatory vaccination															
SPAIN RECOMMENDED VACCINE CALENDAR															
	Birth	Months					Years								
		2	4	11	12	15	3-4	6	12	13	14	15	18	64	≥ 65
diphtheria		D	D	D				D			d		d ¹		d ²
tetanus		TT	TT	TT				TT			TT		TT ¹		TT ²
pertussis		acP ³	acP ³	acP ³				acP ³					acp ⁴		
poliomyelitis		IPV	IPV	IPV				IPV							
Haemophilus influenzae type b infection		Hib	Hib	Hib											
hepatitis B	HepB ⁵	HepB	HepB	HepB						HepB ⁵					
pneumococcal disease		PCV ⁷	PCV ⁷	PCV ⁷							PPSV23 / PCV+PPSV23 ⁸				PPSV23 ⁷
meningococcal disease			MenC ⁹		MenC ⁹				MCV4 ¹⁰		MCV4 ¹¹				
measles					MEAS		MEAS			MEAS ¹²					
mumps					MUMPS		MUMPS			MUMPS ¹²					
rubella					RUBE		RUBE			RUBE ¹²					
varicella					VAR		VAR			VAR ¹³					
human papillomavirus infection									HPV (F) ¹⁴		HPV (F) ¹⁵				
influenza													IIV ¹⁶		IIV ¹⁷

Figure 21. Spain Recommended Vaccine Calendar (ECDC, 2020)

<input checked="" type="checkbox"/> General recommendation <input checked="" type="checkbox"/> Recommendation for specific groups only <input checked="" type="checkbox"/> Catch-up (e.g. if previous doses missed) <input type="checkbox"/> Vaccination not funded by the National Health system <input type="checkbox"/> Mandatory vaccination																	
UK RECOMMENDED VACCINE CALENDAR																	
	Birth	Months					Years										
		2	3	4	6	12	2	3	10	11	12-13	14	15-45	64	65	70	≥ 71
tuberculosis	BCG ²																
rotavirus infection		RV1 ³	RV1 ⁴														
diphtheria		D ³	D ⁴	D ⁵				D ⁶				d	d ⁷				
tetanus		TT ³	TT ⁴	TT ⁵				TT ⁶				TT	TT ⁷				
pertussis		acp ³	acp ⁴	acp ⁵				acp ⁶					acp ⁸				
poliomyelitis		IPV ³	IPV ⁴	IPV ⁵				IPV ⁶				IPV	IPV ⁷				
Haemophilus influenzae type b infection		Hib ³	Hib ⁴	Hib ⁵		Hib ⁹											
hepatitis B	HepB ¹⁰	HepB ³	HepB ⁴	HepB ⁵													
pneumococcal disease ¹			PCV13 ⁴			PCV13											PPSV23
meningococcal disease		MenB ³		MenB ⁵		MenB - MenC ⁹							MCV4 ¹¹				
measles						MEAS		MEAS ⁵									
mumps						MUMPS		MUMPS ⁶									
rubella						RUBE		RUBE ⁶									
human papillomavirus infection													HPV (F/M) ¹²				

Figure 22. UK Recommended Vaccine Calendar (ECDC, 2020)

<input checked="" type="checkbox"/> General recommendation <input checked="" type="checkbox"/> Recommendation for specific groups only <input checked="" type="checkbox"/> Catch-up (e.g. if previous doses missed) <input type="checkbox"/> Vaccination not funded by the National Health system <input type="checkbox"/> Mandatory vaccination																			
ITALY RECOMMENDED VACCINE CALENDAR																			
	Birth	Months										Years							
		3	4	5	6	7	11	13	14	15	18	6	12	18	19	49	50-64	≥ 65	
rotavirus infection		ROTA ¹																	
diphtheria		D		D			D				D	d					d ²		
tetanus		TT		TT			TT				TT	TT					TT ²		
pertussis		acP		acP			acP				acP	acp					acp ²		
poliomyelitis		IPV		IPV			IPV				IPV	IPV							
Haemophilus influenzae type b infection		Hib		Hib			Hib												
hepatitis B	HepB ³	HepB		HepB			HepB												
pneumococcal disease		PCV		PCV			PCV											PCV13+PPSV23 ⁴	
meningococcal disease		MenB ⁵	MenB ⁵		MenB ⁵			MenB ⁵	MenC ⁶					MCV4 ⁶					
measles								MEAS			MEAS								
mumps								MUMPS			MUMPS								
rubella								RUBE			RUBE								
varicella								VAR			VAR								
human papillomavirus infection																		HPV (F/M) ⁷	

Figure 23. Italy Recommended Vaccine Calendar (ECDC, 2020)

GERMANY RECOMMENDED VACCINE CALENDAR																		
<input checked="" type="checkbox"/> General recommendation																		
<input checked="" type="checkbox"/> Recommendation for specific groups only																		
<input checked="" type="checkbox"/> Catch-up (e.g. if previous doses missed)																		
Vaccination not funded by the National Health system																		
Mandatory vaccination																		
	Weeks	Months								Years								
	6	2	3	4	11	12-14	15	23	2	4	5-6	9	14	15	17	18	60	≥ 61
Rotavirus infection	ROTA	ROTA	ROTA ³															
Diphtheria		D	D	D	D	D			d	d			d ⁴					
Tetanus		TT	TT	TT	TT	TT			TT	TT			TT ⁴					
Certussis		acP	acP	acP	acP	acP			acp	acp			acp ⁵					
Poliomyelitis		IPV	IPV ⁶	IPV	IPV	IPV			IPV			IPV ⁷						
Haemophilus influenzae type b infection		Hib	Hib ⁶	Hib	Hib	Hib ⁶												
Hepatitis B		HepB	HepB ⁶	HepB	HepB	HepB												
Pneumococcal disease ¹		PCV		PCV	PCV	PCV ⁶										PPSV23 ⁹		
Meningococcal disease						MenC			MenC									
Measles						MEAS ¹⁰	MEAS		MEAS					MEAS ¹¹				
Mumps						MUMPS ¹⁰	MUMPS		MUMPS									
Rubella						RUBE ¹⁰	RUBE		RUBE									
Varicella						VAR	VAR		VAR									
Human papillomavirus infection										HPV (F/M) ¹²		HPV (F) ¹³						

Figure 24. Germany Recommended Vaccine Calendar (ECDC, 2020)

In Germany; TBC vaccine is neither mandatory nor recommended and Mass Vaccination was applied between 1961- 1998. The vaccination policy that performed between these years may also be an important data for COVID-19 related deaths which is lesser than other countries. It can be considered that people who have been vaccinated in this period will be more resistant to COVID-19 (Zwerling A. Et.al.: 2011).

Like Germany, TBC vaccine is neither mandatory nor recommended in Italy and Spain. There was no any information about mass vaccination in the past years for Italy. In Spain, Catalonia suspended TBC in 1971 and last TBC policy of Spain performed between 1965 and 1981 (Asociación Española de Vacunología, 2018). Lack of TBC vaccine policy may have triggered high COVID-19 related deaths (Zwerling A. Et.al.: 2011).

In Portugal, National Vaccination Programme has existed since 1965. TBC was given to all newborns in hospitals (Portugal Ministry of Health, 2020).

UK launched the TBC vaccine policy in 1953. Among the focused group countries, UK is the first country to integrate TBC policy into its health system. Until 2005, all school children aged 10-14 and newborns at risk were vaccinated. All children were given a single dose (there is no evidence of an extra protection of the second or

more doses). This vaccine policy was terminated in 2005 due to the costs. However, the recommended vaccination schedule of UK still includes the TBC vaccine for new births. The UK, which is on the TBC vaccination schedule as such preventive activity, has been one of the countries most affected by COVID-19 related deaths (NHS, 2016).

Although TBC vaccination is mandatory in UK and Portugal, mortality rates are lower in Portugal than UK. In addition, in Germany, which is not compulsory, low mortality rates are seen in Portugal compared to the other countries. Miller et al (2019) found that countries without a universal TBC vaccination policy (Italy, the Netherlands, USA) are more severely affected than countries with long-standing TBC policies.

Especially, in Iberian Peninsula, analyze to COVID-19 related mortality rates between Spain and Portugal, the fact that, TBC vaccine is on the calendar in Portugal and the vaccination was applied to masses. In these countries, which have similar geography and physical characteristics, TBC vaccine may have been an advantage

3.1.3. Air Pollution of Focused Group

Air pollution, which can be defined as the unfavorable amount and density of foreign substances in the air, negatively affects the health of people, animals and other life forms. Widespread using of low-calorie and high sulfur coals for heating purposes and application of wrong combustion techniques cause air pollution. In addition, high population, mass consumerism and mass production among with the exhaust gases coming out of the motor vehicles whose number is increasing rapidly can be considered as the significant factors of air pollution. Wrong selection of location for the establishment of industrial facilities, ignoring to take necessary measures to protect the environment (no chimney filter, no treatment plant, etc.) and not using appropriate technologies boost the air pollution.

Air pollution causes an increase in respiratory diseases in humans. For example; it is known that it prevents the development and maturation of blood cells, negatively affects the accumulation in the blood and urine, and carbon monoxide (CO) combines with hemoglobin in the blood disrupting oxygen transport. Also, sulfur dioxide (SO₂) has sharp, suffocating and irritating effects on the upper respiratory tract. Especially the smoke penetrates from the lungs to the alveolus which has a negative effect.

Air pollution sources;

- Burning fossil fuels in heating, electricity generation, transportation and related sectors
- Solvent use and industrial processes (chemical and mining sectors)
- Disorganized waste management.
- Unconscious agricultural applications (excessive using of pesticides)
- Natural sources: Volcanic eruptions, sea salt spraying, dust storms etc.

Although decrease in the urban population exposed to air pollutants in Europe until 2017 (Fig. 25), increasing industrialization and improper practices in agriculture and other related industrial process still put pressure on the air pollutants data (IEA, 2020). WHO declares that these numbers which are related to urban population exposed to air pollution is much more (Fig. 26) (WHO, 2020).

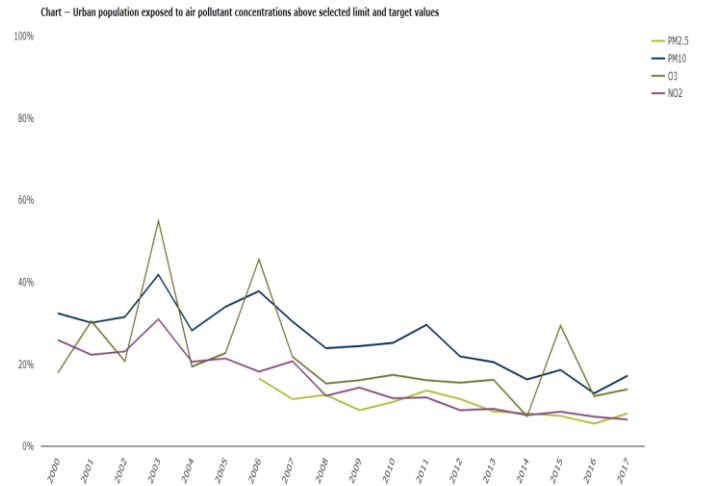


Figure 25. Urban population exposed to air pollutant concentrations

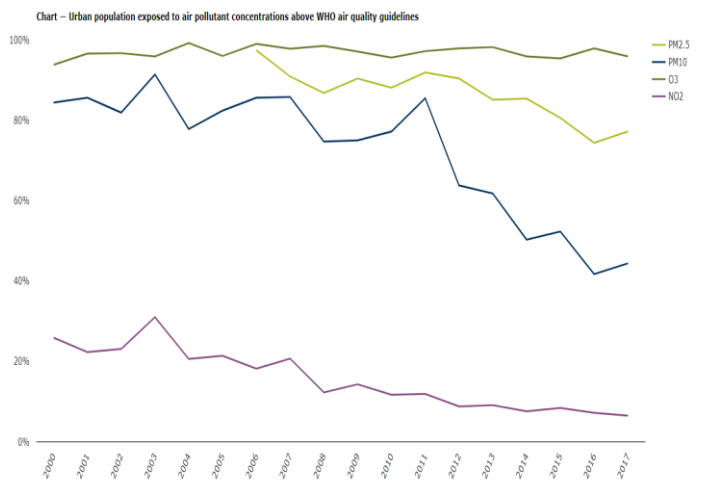


Figure 26. Urban population exposed to air pollutant concentrations above WHO air quality guidelines

Considering the air pollution data at the end of 2018 (Fig. 27), it is seen that Italy, one of the focus group countries, is the most polluted of all. It is a remarkable detail that Germany has an average level in the list due to the heavy industry and it is below Italy. The other countries such as Spain and UK do not have a high value. The best air quality country of the focus group is Portugal (WHO, 2020).

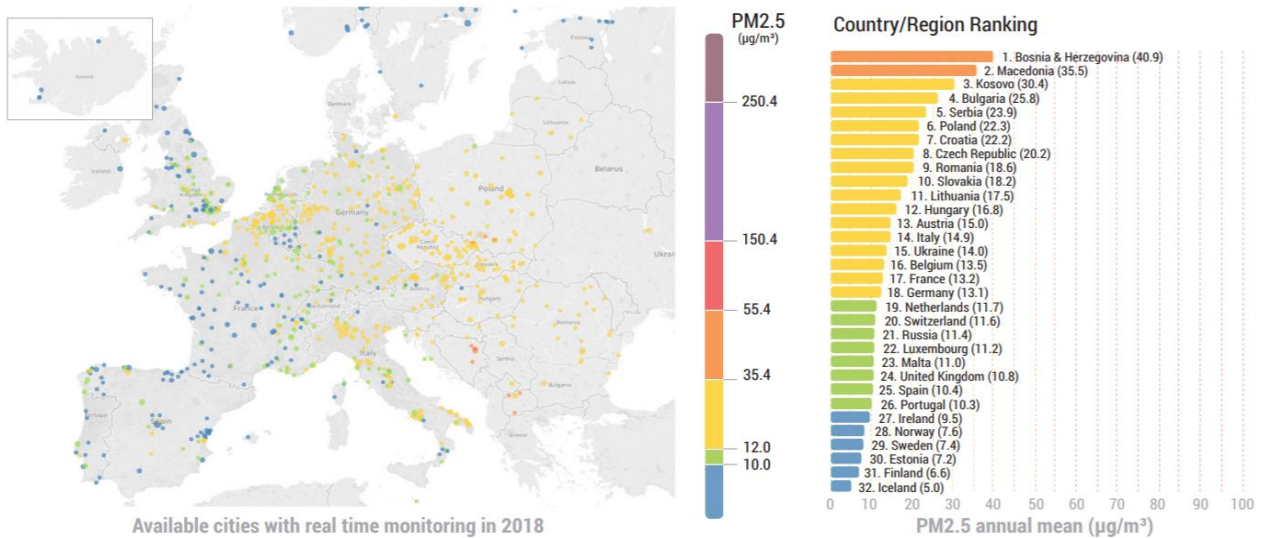


Figure 27. Air pollution monitoring of Europe (WHO, 2020)

As is well known, many European countries have declared a lockdown to stop the spread of COVID-19. Therefore, activities that cause daily air pollution have stopped and there has been a noticeable change in air quality in Europe.

4. DISCUSSION

The COVID-19 outbreak, which started from China and spread all over the world and declared as Pandemic by WHO, affected the whole world and over two million people were infected. As a result, it has reached a death rate of nearly two hundred thousand people.

As the direction of the pandemic graph begins to normalize in some countries day by day, high cases and mortality rates continue in the countries examined within the scope of the study such as UK, Spain and Italy. However, in Germany and Portugal, which are the other focused countries of the study, although the number of cases increased, it is observed that these countries may enter normalization processes in a shorter period of time. The mortality rate is lower in these countries comparing with the others.

In this study, which factors might cause mortality rate difference among focused group countries is investigated and selected factors include sugar consumption, vaccine calendars and air pollution.

Germany has a lower mortality rate than other countries during the pandemic, although it has more sugar consumption than other countries. On the other hand, UK, Spain and Italy faced higher mortality rates, even

though they had less consumption value than Germany. Portugal, which draws a similar epidemic curve with Germany, is in opposition to Germany in terms of sugar consumption.

Also, vaccination calendars of focused group countries are examined. This study particularly dwells on the vaccination of TBC which is a dangerous lung disease and found out that it is only in the calendar of the UK and Portugal among other focused group countries.

Although there is not a great difference between vaccines for other viral diseases in vaccine calendars, this subject is also an issue that needs to be investigated further. One of the reasons for the huge difference at COVID-19 related mortality rates between Spain and Portugal which are both in the Iberian Peninsula can be explained with the TBC vaccine which is in Portugal's vaccination calendar and the country suffer less COVID-19 related deaths.

Although Germany does not have the TBC vaccine in its calendar, it seems to be the country with the lowest mortality rate with Portugal when compared with the other focused group countries. When the TBC vaccine and COVID-19 related deaths are examined, this parameter should be evaluated definitely.

Along with Italy and Spain, UK is one of the countries with the highest mortality rate in the focused group, although the TBC vaccine is on the calendar and the existing negative situation contrasts between the relationship between TBC vaccine and COVID-19 related deaths.

In terms of air pollution, Italy has the dirtiest air than other focused group countries. This may cause to have higher mortality rates in Italy during the COVID-19 outbreak. UK and Spain have average air pollution rates. Despite Germany's heavy and developed industry, it is cleaner than Italy. Portugal with its low air pollution and low death ratios of COVID-19 can prove the significance of good air quality on our endurance to the virus.

5. CONCLUSION

Having less sugar consumption and less air pollution, Portugal exhibits less mortality rates during this pandemic which proves that there could be a possible relationship between these variables with the death ratios of COVID-19. It should not be overlooked, however, that Germany, having high sugar consumptions and moderate air pollution, gives lower mortality rate values when compared with the other focused group EU countries. Sugar intake of UK, Italy and Spain should not be underestimated since those countries also have numbers above standards. Nevertheless, more detailed analysis regarding the relationship between sugar consumption and COVID-19 deaths will be essential in the future.

Portugal, included the vaccination of TBC in their vaccine calendar and suffers less COVID-19 related deaths when compared with Spain. It is noteworthy that both being Iberian Peninsula countries, the two country exhibit different death ratios of COVID-19. More detailed research should be done to understand the relationship between COVID-19 deaths and TBC Vaccine.

Not having TBC vaccine in its calendar, Germany is one of the lowest mortality rates in the focused countries. Therefore, the effectiveness of TBC vaccine is concerned for COVID-19, this parameter should be evaluated separately.

Most particularly, Italy and then UK and Spain have high air pollution rates which is accordance with the high COVID-19 death ratios. In this regard, as a study subject it can be investigated by associating with the deaths from COVID-19 in future studies.

Compliance with Ethical Standards:

Funding: No Funding

Conflict of Interest: The authors declare that they have no conflict of interest.

REFERENCES

- Asociación Española de Vacunología. 2018. Vacunas disponibles. <https://www.vacunas.org/vacunas-disponibles-rubeola/> (accessed: 26 April 2020)
- Ceylan, Z. 2020. Estimation of COVID-19 prevalence in Italy, Spain, and France. *Journal of Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138817>.
- El Behri, A, Umstaetter, J, Kelch, D. 2008. The EU Sugar Policy Regime and Implications of Reform. *Economic Research Report*. No: 59. doi:10.2139/ssrn.1359035.
- European Centre for Disease Prevention and Control. 2020. <https://www.ecdc.europa.eu/en> (accessed 19 April 2020).
- International Environment Agency Data, 2020. Time to Reach Data: 20/04/2020
- Isguzar, Y, Akbulut G. 2016. High-Fructose Consumption And Cancer, *Izmir Katip Celebi University Health Sciences Faculty Journal*, Vol:1 Issue: 2.
- Korkmaz A. 2008. Fruktoz Kronik Hastalıklar İçin Gizli Bir Tehdit. *TAF Prev Med Bull*.7: 343-6.
- Lau, H., Khosrawipour, V., Kocbach, P., Mikolajczyk A., Ichii, H., Schubert, J., Bania, J., Khosrawipour, T. 2020. "Internationally lost COVID-19 cases". *Journal of Microbiology, Immunology and Infection*. doi:10.1016/j.jmii.2020.03.013. ISSN 1684-1182. PMC 7102572. PMID 32205091.
- Malik, V.S, Schulze, M.B, Hu, F.B. 2006. Intake of sugar-sweetened beverages and weight gain: a systematic review. *Am J Clin Nutr*. 84: 274-88.
- Miller, A. Raendelar, M. J. Fasciglione, K. Roumenova, V. Yan, L. Otazu, G.H. Correlation between universal BCG vaccination policy and reduced morbidity and mortality for COVID-19: an epidemiological study. doi: <https://doi.org/10.1101/2020.03.24.20042937>
- Moreno LA, Rodriguez G. 2007. Dietary risk factors for development of childhood obesity. *Curr Opin Clin Nutr Metab Care*.10: 336-41.
- NHS Archives. 2016. BCG tuberculosis (TB) vaccine overview.

<https://www.nhs.uk/conditions/vaccinations/bcg-tuberculosis-tb-vaccine/>

Ochoa, M.C, Moreno-Aliaga, M.J, Martinez-Gonzalez, M.A, Martinez, J.A, Marti A. 2007. Predictor factors for childhood obesity in a Spanish case-control study. *Nutrition*. 23: 379-84.

Portugal Ministry of Health, 2020. <http://www.min-saude.pt/> (accessed: 26 April 2020)

Roxton, C.H.S, Garceau, F.J.S, Cotrell, R.J. 1999. Guidelines for sugar consumption in Europe: Is a quantitative approach justified? *European Journal of Clinical Nutrition*. 53, 503±513

de Sabata, M. S., L'Heveder R., Makrilakis, K., Lalic, N. 2016. IDF Europe Position on Added Sugar. <file:///C:/Users/iste%20pc/Downloads/IDF%20Europe%20Position%20on%20Added%20Sugar.pdf>

Tam CS, Garnett SP, Cowell CT, Campbell K, Cabrera G, Baur LA. 2006. Soft drink consumption and excess weight gain in Australian school students: results from the Nepean study. *Int J Obes (Lond)*. 30: 1091-3.

Wang, L., Li, J., Guo, S., Xie, N., Yao, L., Day, S.W., Howard, S.C., Graff, J.C., Gu, T., 2020. *Journal of Science of the Total Environment*, 138394 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138394>.

Warwick Medical School Researches, 2011. <https://warwick.ac.uk/fac/sci/med/research/> (accessed:15 April 2020)

World Health Organization. 2020. <https://www.who.int/> (accessed:15 April 2020)

Worldometers. Coronavirus Updates. 2020. www.worldometers.info (accessed:15 April 2020)

Zwerling A, Behr MA, Verma A, Brewer TF, Menzies D, Pai M. 2011. The BCG World Atlas: A Database of Global BCG Vaccination Policies and Practices. *PLoS Med*. 8(3): e1001012. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1001012> (accessed 4 April 2020).

Kablosuz Güç Transferi Sisteminin Genelleştirilmiş Düğüm Denklemleri ile Analizi

Ahmet Numan KOCACIK*¹ , Ali Bekir YILDIZ*² 

*Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, 41380, Türkiye

Araştırma Makalesi, Geliş Tarihi: 01.10.2020, Kabul Tarihi: 10.11.2020

Özet

Bu çalışmada kablosuz güç transferi yapan bir sistemin analizi için etkin bir yöntem önerilmiştir. Bu amaçla sistemin yapısı incelenmiş ve analizi için genelleştirilmiş düğüm denklemleri yönteminin nasıl uygulanacağı gösterilmiştir. Kablosuz güç transferi yapan sistem seri rezonans devresi topolojisi üzerine kurulmuştur. Analiz yöntemi örnek bir sistem üzerinde uygulanmıştır. Sistemin en temel elemanı olan bobinin tasarımı, Ansys Maxwell programı ile gerçekleştirilmiştir. Uygulanan yöntemle devrenin sistem denklemleri analitik olarak kolay bir şekilde çıkarılmıştır. Sistem denklemleri Laplace bölgesinde çözülerek, devrenin dinamiği, zaman sabitleri ve geçici haldeki durumu hakkında yorumlar yapılmıştır. Daha sonra, sistem denklemleri zaman bölgesine aktarılarak, devrenin sayısal analizi elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kablosuz Güç Transferi, Analiz, Genelleştirilmiş Düğüm Denklemleri, Rezonans Devresi.

Analysis of Wireless Power Transfer System with Modified Nodal Equations Approach

Abstract

In this study, an effective method is proposed for the analysis of a system that transfers wireless power. For this purpose, the structure of the system is examined and it is shown how to apply the generalized nodal equations method for analysis. The system that transfers wireless power is based on the series resonance circuit topology. The analysis method is applied to a sample system. The design of the coil, the most basic element of the system, is realized with the Ansys Maxwell program. System equations of the circuit are easily obtained analytically with the applied method. By solving system equations in Laplace domain, comments are made about the dynamics of the circuit, time constants and its transient state. Then, system equations are transferred to the time domain and numerical analysis of the circuit is obtained.

Keywords: Wireless Power Transfer, Analysis, Modified Nodal Equations, Resonance Circuit.

¹Sorumlu yazar ahmetnumankocacik@gmail.com, ²abyildiz@kocaeli.edu.tr

1. GİRİŞ

Günlük hayatımızda kullandığımız cihazların çoğu elektrik enerjisi ile çalışmaktadır. Özellikle telefon, bilgisayar, tablet gibi cihazların günlük yaşantımızın ayrılmaz bir parçası olduğunu düşündüğümüzde, bu cihazların şarj durumları, şarj edilebilirliği ve şarj edilme süreleri gibi konular büyük önem taşımaktadır. Elektrikli cihazların hemen hemen hepsi şarj edilebilmek için kabloya ihtiyaç duymaktadır. Bu cihazların kablo ile şarjı esnasında, kullanımının getirdiği kısıtlamalar ve kablo ihtiyacını ortadan kaldırmak için, kablosuz şarj sistemleri geliştirilmiş ve şu anda piyasada kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır. Sadece elektronik cihazlar için değil elektrikli araçların şarj edilmesi için de büyük güçler seviyesinde aktarma yapabilen üretimler bulunmaktadır.

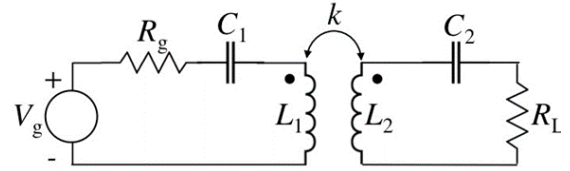
Sistemde, şarj mesafesi ve verimin artırılması en temel problemidir. Kabul edilebilir mesafe ve yüksek güç iletim verimi özelliklerinden dolayı, manyetik rezonans teknikleri gelecek vadede çözümlerdir (Yang, May 2017) (Avisire , Shahat, & Sharaf, Oct. 2018) (Youn & Choi, June 2015) (Tang, Nov. 2018) (Choi , Kwak, & Kim, Sept. 2016). Enerji transferinin ana elemanlarını oluşturan alıcı ve verici devresindeki bobinler arasındaki manyetik etkileşim mesafeyle ve konumla değişir. (Ağcal, Bekiroğlu, & Özçira, 2018) çalışmasında sistemdeki alıcı ve verici bobinlerin konumsal ve açısal olarak hizalanmış ve hizalanmamış durumlarına göre verimi incelemiştir. Kablosuz güç transferinin elektrikli araçlara uygulanması ile ilgili çalışmalar yoğunlaşmaya başlamıştır (Liu, Field circuit coupling analysis of dynamic wireless charging for electric vehicle, Nov. 2018) (Niculae & Iordache, 2019) (Liu, Jiang, & Qiu, Overview of coil designs for wireless charging of electric vehicle, May 2017) (Khutwat & Gaur, Oct. 2016).

Bu çalışmada, kablosuz güç transferi sisteminin analizine etkin bir katkı sağlanmıştır. Bu amaçla, sistem denklemlerinin analitik olarak daha kolay ve sistematik bir şekilde elde edilmesine olanak sağlayan Genelleştirilmiş Düğüm denklemleri (GDD) yaklaşımının nasıl kullanılacağı açıklanmıştır. Ayrıca, elde edilen devre denklemlerinden, sistemin dinamik analizi de yapılmıştır.

2. SİSTEM YAPISI

Kablosuz güç transferi yapan sistemler genel olarak verici (transmitter) ve alıcı (receiver) devrelerinden oluşmaktadır. Bu devreler genel itibarıyla yüksek frekansta çalıştırılırken maksimum verimi sağlamak için

bir rezonans devre topolojisi ile tasarlanmaktadır. Sisteme ilişkin devre topolojisi Şekil 1’de verilmiştir. Bu topolojiye göre, rezonans frekansında yükün endüktif (L_2) ve kapasitif (C_2) bileşenlerinin empedansları birbirlerini sıfırlar ve yük empedansı sadece bobinin omik direncinden oluşur. Dolayısıyla, toplam empedans en düşük seviyede olur. Bu da akımının genliğinin ve gücün maksimum olmasını sağlar (Fincan, 2015).



Şekil 1. Kablosuz güç aktarım devresi

Kablosuz güç aktarım devresi, aslında hava nüveli karşılıklı endüktans içeren manyetik etkileşimli bir devredir. Bu tür devreler genel itibarıyla yüksek frekansta çalıştıkları için kablosuz güç aktarım yapan devrelerin beslenmesi güç elektroniği devreleri kullanılarak yapılmaktadır. Güç elektroniği elemanlarının anahtarlama durumları da göz önüne alındığında devrenin yapısı daha karmaşık hale gelmektedir. Bu nedenle devrenin analizi durum değişkenleri ile yapılırsa matematiksel denklemlerin ifade edilmesinde bazı zorluklar ile karşılaşılabilir. (İşak, Kelebekler, & Yıldız, Kasım 2007) çalışmasında karşılıklı endüktansın etkisinin anahtarlama devrelerinde nasıl ifade edildiği incelenmiştir. Çalışmada hem karşılıklı endüktansın hem de anahtarlama modelinin genelleştirilmiş düğüm denklemleriyle Laplace ve zaman bölgesinde kolayca ifade edildiği belirtilmiştir.

Genelleştirilmiş düğüm denklemleriyle (GDD) devre analizi yapılırken, durum değişkenleri yöntemine nazaran daha fazla bilinmeyen ve denklem elde edilmesine karşın, denklemlerin elde edilmesi ve çözülmesi daha kolay olmaktadır. GDD yöntemi çok karmaşık devrelerin modellenmesini ve analizini kolaylaştırdığı için birçok paket program ve bilimsel çalışmalarda kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, devrede kullanılacak bobinlerin öz endüktansları ve ortak endüktans değerleri Ansys Maxwell programından elde edilmiştir. Daha sonra belli bir frekans değeri seçilip devrenin rezonansa girmesi için gerekli kapasite değerleri belirlenerek devre tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan devrenin analizi ise, açıklanan avantajlarından dolayı genelleştirilmiş düğüm denklemleri ile yapılmıştır.

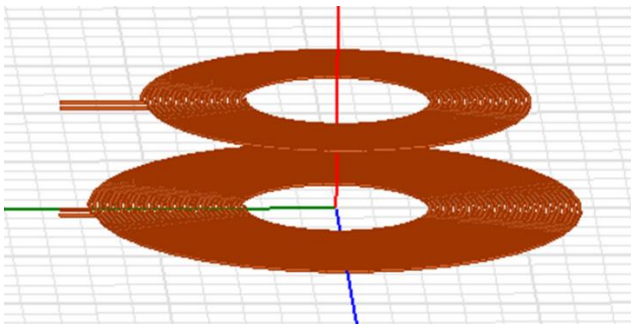
3. BOBİN VE DEVRE TASARIMI

Kablosuz güç aktarımında, bobin tasarımı ve manyetik güç aktarımı en önemli kısımdır. Verici taraftaki bobinden geçen alternatif akım sonucu bobinin üzerinde bir manyetik alan oluşturmaktadır. Bu manyetik alan verici (transmitter) taraftaki bobin (L_1) ile etkileşime giren alıcı (receiver) taraftaki bobinin (L_2) bulunduğu devrede bir akım akmasını sağlamaktadır. Bu nedenle uygun bobin seçimi yapılırken iletkenin endüktansı, kesiti ve bobin boyutları dikkate alınması gereken parametrelerdir.

Ansys Maxwell programı ile tasarlanan 10 kHz'deki bobinin (Şekil 2) parametreleri Tablo 1'de verilmiştir ve bobinlerin sargı dirençleri ihmal edilmiştir.

Tablo 1. Ansys Maxwell programı ile tasarlanan bobinin parametreleri

Bobin Parametreleri	Verici Bobini (L_1)	Alıcı Bobini (L_2)
İç çap	50 mm	50 mm
Dış çap	132.8 mm	105.6 mm
Sarım sayısı	30	20
İletkenler arası mesafe	0.687 mm	0.687 mm
İletken kesiti	0.5 mm ²	0.5 mm ²
Öz endüktans	45.2 µH	32.4 µH
Ortak endüktans	6.37 µH	
Kublaj katsayısı, k	0.166372	
Bobinler arası mesafe	30 mm	



Şekil 2. Tasarlanan bobinlerin Ansys Maxwell'deki görünümü

Kablosuz güç aktarım sistemleri, hava nüveli bir transformatör gibi düşünülebilir. Buradan hareketle, akan

akımın yüksek frekansta zamanla değişmesi, iki bobin arasındaki ortak endüktansın olabildiğince yüksek olması ve bobinlerden akan akımdan doğacak güç kaybının en az olması yüksek verimli bir sistem için gereklidir.

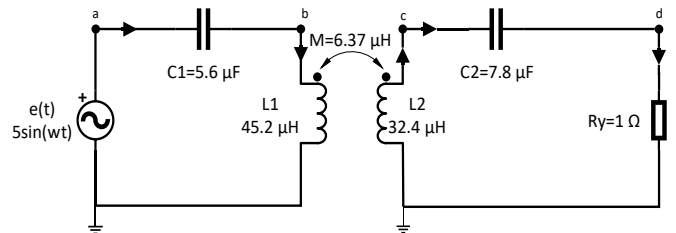
Rezonans devreleri, sistemin verimliliğini arttırmak için kullanılır. Eğer devreye endüktif reaktans ile kapasitif reaktansı birbirine eşitleyecek frekansta bir gerilim uygulanırsa, devredeki toplam empedans sadece omik özellik gösterecek ve akım maksimum seviyede olacaktır. Verilen bu frekansa rezonans frekansı (f_r) denir. Rezonans frekansının eşitliği denklem 1'de verilmiştir.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

Tasarlanan sistem için rezonans frekansı $f_r = 10\text{kHz}$ seçilmiştir. Ansys Maxwell programı ile tasarlanan bobinlerin parametre değerleri de Tablo 1'de verilmiştir. Denklem 1 kullanılarak, gerekli olan kapasite değeri belirlenebilir. Denklem 1'den gerekli kapasite değeri aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$C = \left(\frac{1}{2\pi f}\right)^2 \frac{1}{L} \quad (2)$$

Denklem 2'ye göre elde edilen, alıcı ve verici taraftaki kapasite değerleri $C_1 = 5.6 \mu\text{F}$, $C_2 = 7.8 \mu\text{F}$ olarak elde edilir. Belirlenen değerler sonucunda sistemin eşdeğer devresi Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Sistemin elektriksel eşdeğer devresi

4. GENELLEŞTİRİLMİŞ DÜĞÜM DENKLEMLERİ İLE ANALİZ

Şekil 3'te gösterilen kablosuz güç aktarımı devresinin analizi GDD yöntemiyle yapılacaktır. Verici devresine bağlı gerilim kaynağı L_1 bobini üzerinde manyetik alan oluşmasını sağlar. Bu manyetik alan alıcı devresindeki L_2 bobininde bir gerilim indükleyerek, verici devresinden alıcı devresine manyetik olarak enerji aktarılmış olur.

Devreye ait temel düğüm denklemleri Laplace bölgesinde aşağıda verilmiştir.

$$a \rightarrow i_{C_1} + i_e = 0 \Rightarrow sC_1(U_a - U_b) + i_e = 0 \quad (3)$$

$$b \rightarrow i_{L_1} - i_{C_1} = 0 \Rightarrow i_{L_1} - sC_1(U_a - U_b) = 0 \quad (4)$$

$$c \rightarrow i_{C_2} - i_{L_2} = 0 \Rightarrow sC_2(U_c - U_d) - i_{L_2} = 0 \quad (5)$$

$$d \rightarrow i_{R_y} - i_{C_2} = 0 \Rightarrow G_{R_y}(U_d) - sC_2(U_c - U_d) = 0 \quad (6)$$

Denklem sisteminin çözümlenebilmesi için bilinmeyen sayısı kadar denklemin oluşturulması gerekmektedir. GDD sistemi için gerekli olan ek denklemler aşağıda verilmiştir.

$$L_1 \rightarrow U_b = sL_1 i_{L_1} - sM i_{L_2} \quad (7)$$

$$L_2 \rightarrow -U_c = sL_2 i_{L_2} - sM i_{L_1} \quad (8)$$

$$e(t) = U_a \quad (9)$$

Denklem sistemi,

$$\begin{bmatrix} sC_1 & -sC_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -sC_1 & sC_1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & sC_2 & -sC_2 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -sC_2 & sC_2 + G_{R_y} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -sL_1 & sM & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & sM & -sL_2 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \\ U_d \\ i_{L_1} \\ i_{L_2} \\ i_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} e_t$$

Bu sistemin genel yapısı, Laplace bölgesinde denklem 10'da verilmiştir.

$$(G + sC)X(s) = BU(s) \rightarrow A(s)X(s) = BU(s) \quad (10)$$

Burada G, C, B matrisleri katsayı matrisleridir. Tüm iletkenlikler ve frekanstan bağımsız değerler G matrisini oluşturur. Frekans ile ilgili olan endüktans ve kapasite değerleri C matrisinde yer alır. U matrisi ise bağımsız akım ve gerilim kaynakları ile sıfırdan farklı kapasite ve endüktansların başlangıç koşullarını içeren vektördür.

Sistemin çözümü, denklem 11'deki gibi ifade edilir.

$$X(s) = (G + sC)^{-1}BU(s) = A(s)^{-1}BU(s) \quad (11)$$

Burada $A(s) = (G + sC)$ matrisine devrenin karakteristik matrisi denir. Denklem 11'deki $A(s)$ matrisinin tersi denklem 12'deki gibidir.

$$A(s)^{-1} = \left(\frac{1}{\det(A(s))} \text{Adj}(A(s)) \right) \quad (12)$$

$$\det(A(s)) = \frac{Q(s)}{R(s)} \quad (13)$$

Denklem 12 ve 13'teki ifadeler denklem 11'de yerine konur.

$$X(s) = \left(\frac{Adj(A(s))BR(s)}{Q(s)} \right) U(s) \quad (14)$$

Denklem 14'deki $Q(s)$ polinomu tüm devre değişkenlerinin paydasında ortak olarak görülür. Bu polinoma devrenin karakteristik denklemi denir. Bu denklem, devrenin karakteristik davranışı hakkında önemli bilgiler içerir. Karakteristik denklemin kökleri devrenin kutuplarını (özdeğerlerini) verir. Kutupların çarpımına göre tersi devrenin zaman sabitini belirler.

$Q(s)$ polinomunun kökleri devrenin kutuplarını (özdeğerlerini) vermektedir. Şekil 3'de verilen devre elemanlarının sayısal değerlerine göre, devrenin kökleri aşağıda verilmiştir.

$$\alpha_1 = (-1.3853 + 6.2441i) \times 10^4$$

$$\alpha_2 = (-1.3853 - 6.2441i) \times 10^4$$

$$\alpha_3 = (-0.2019 + 6.2660i) \times 10^4$$

$$\alpha_4 = (-0.2019 - 6.2660i) \times 10^4$$

Sistemin kökleri kompleks ($a \pm bi$ ve $a < 0$) yapıda olduğundan, devre geçici hal bölgesinde titreşimli bir hareket yaparak kararlı hale gelir. Sistemin geçici hal süresi, devrenin zaman sabitleri, dolayısıyla devrenin kutupları ile bulunabilir. Devrenin zaman sabitleri aşağıda verilmiştir.

$$\tau_1 = \frac{1}{|-1.3853 \times 10^4|} \cong 72.2 \mu s$$

$$\tau_2 = \frac{1}{|-0.2019 \times 10^4|} \cong 0.495 ms$$

Sistemin geçici hal süresi yani kararlı hale gelme süresi $5\tau_{max}$ süresi kadardır. Burada $\tau_2 > \tau_1$ olduğundan, devrenin geçici hal süresi süresi, $5\tau_2 = 2.475 ms$ dir.

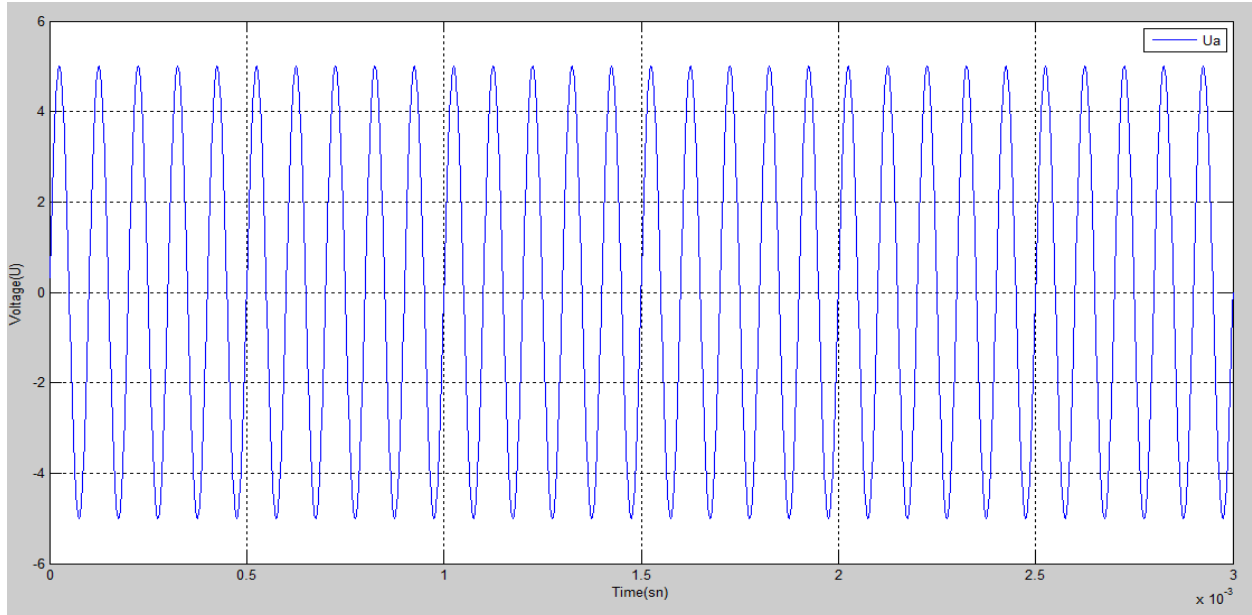
Sistemin zaman bölgesindeki analizi için, Laplace bölgesinden zaman bölgesine kolay bir işlemle geçilebilir. Bunun için $(G + sC)$ matrisi $\left(G + \frac{d}{dt}C\right)$ matrisine çevrilerek yapılır. Sistemin zaman bölgesindeki düzenlenmiş hali denklem 15'te verilmiştir.

$$GX(t) + C \frac{dX(t)}{dt} = BU(t) \quad (15)$$

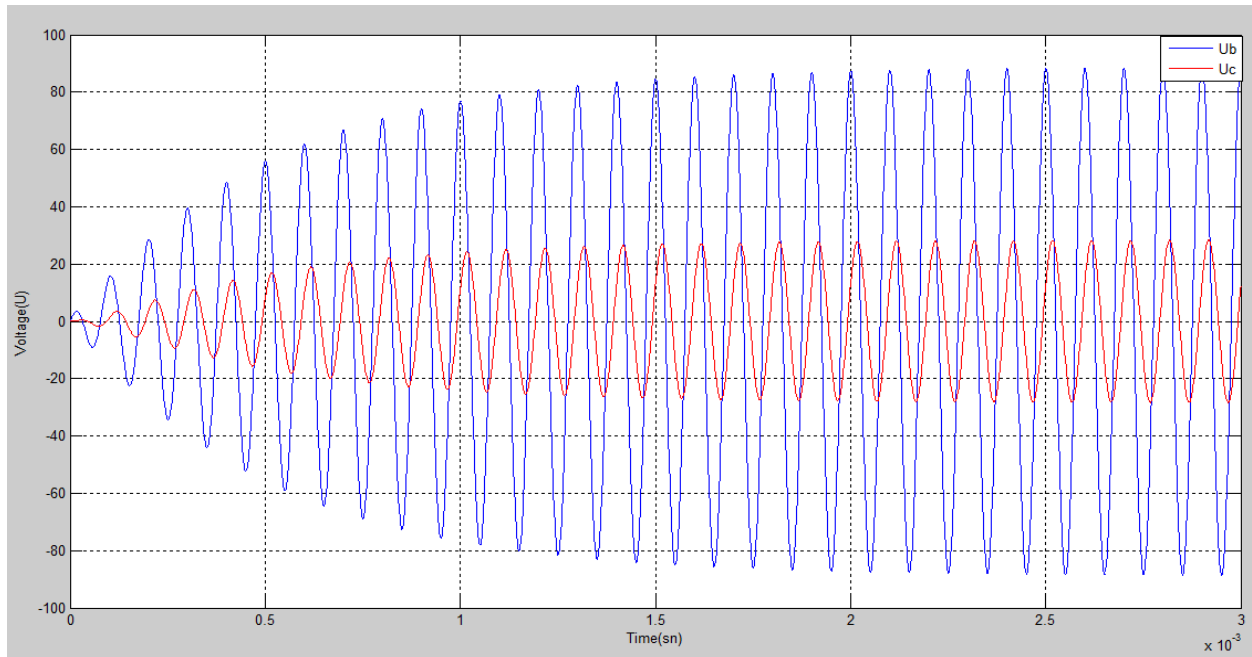
Devredeki elemanların değerleri Şekil 3'te verilmiştir. Devrenin zaman bölgesi denklemleri denklem 16'da gösterilmiştir. Sayısal çözümler Trapez yöntemi elde edilmiştir. Analiz sonucu elde edilen grafikler Şekil 4, Şekil 5 ve Şekil 6'da verilmiştir.

Şekil 4'te devreye uygulanan gerilimin değişimi verilmiştir. Şekil 5'te, verici ve alıcı devrelerindeki bobinlerin üzerindeki gerilimlerin değişimi verilmiştir. Bu gerilim değerleri aynı zamanda Şekil 3'teki b ve c düğümlerinin gerilimleridir.

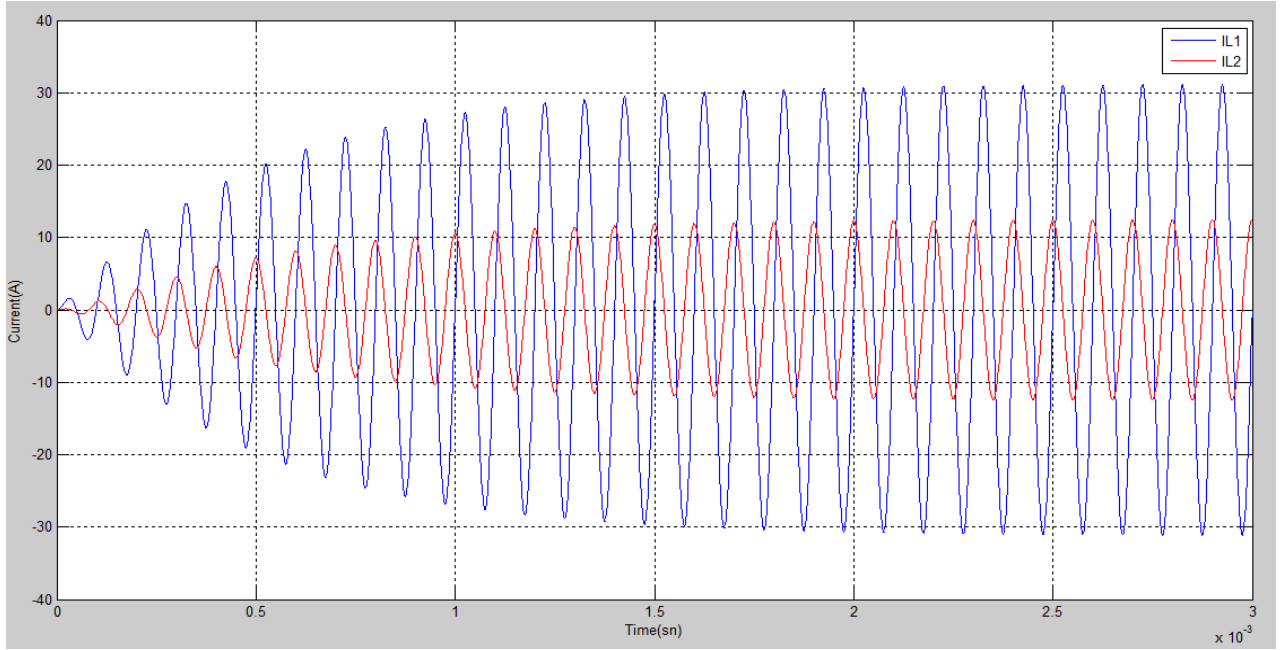
$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{Ry} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \\ U_d \\ i_{L1} \\ i_{L2} \\ i_e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1 & -C_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -C_1 & sC_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_2 & -C_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -C_2 & C_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -L_1 & M & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M & -L_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \\ U_d \\ i_{L1} \\ i_{L2} \\ i_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} U(t) \quad (16)$$



Şekil 4. Giriş gerilimi (U_a)



Şekil 5. Verici ve alıcı devrelerindeki bobinlerin gerilimleri (U_{L1} , U_{L2})



Şekil 6. Verici ve alıcı devrelerindeki bobinlerden akan akımlar (I_{L1} , I_{L2})

Şekil 6’da verici ve alıcı devrelerindeki bobinlerden akan akımların değişimi verilmiştir. Akım değerlerinin yüksek çıkması, verici ve alıcı devrelerindeki rezonans yapısından kaynaklanmaktadır.

Kablosuz güç transferi yapan sistemlerde kaçak akımların yüksek olmasından dolayı alıcı (sekonder) tarafa aktarılacak güç miktarı önemli miktarda azalmaktadır. Bunun ana sebebi oluşan ortak akının manyetik direnci yüksek olan havadan devresini tamamlamasıdır.

Şekil 5’de alıcı taraftaki bobin üzerindeki gerilimin beklenildiği üzere verici taraftaki bobinin geriliminden daha düşük değerdedir. Ancak Şekil 6’da alıcı taraftaki bobinden akan akımın verici taraftaki akan akımdan daha düşük çıkması, hem alıcı devresindeki yük direncinin olması hem de kaçak akı miktarının fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Laplace bölgesinde hesaplanan geçici hal süresinin Şekil 5 ve Şekil 6’da grafiklerde de görüldüğü gibi 2.475 ms civarındadır.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada kablosuz güç aktarımı yapan bir devrenin analizi için etkin bir yöntem önerilmiştir. Kullanılan yöntem ile kolay bir şekilde sistemin denklemleri elde edilmiş ve devre karakteristiği belirlenmiştir. Devrenin s-bölgesinde ve t-bölgesinde analizi yapılmıştır. Laplace bölgesinde devrenin karakteristik matrisi çıkarıldıktan sonra devrenin kutupları, zaman sabitleri, geçici hal süresi ve karakteristik yapısı belirlenmiştir. Zaman bölgesinde devrenin sayısal analizi gerçekleştirilip, devrenin dinamik cevabı doğrulanmıştır.

KAYNAKLAR

Ağcal, A., Bekiroğlu, N., ve Özçira, S. (2018). Manyetik rezonanslı kuplaj ile kablosuz enerji transferinde hizalanmış ve hizalanmamış durumların limitlerinin incelenmesi. *Fırat Üniv. Fen Bilimleri Dergisi*, 3(30), 67-73.

Avisire, E., Shahat, A., and Sharaf, A. (Oct. 2018). Magnetic resonance coupling modelling for electric vehicles. *IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC)*. USA.

Choi , Y., Kwak, B., and Kim, M. (Sept. 2016). 4kW magnetic resonance wireless power transfer system. *IEEE Int. Conference on Power System Technology (POWERCON)*. Australia.

Fincan, B. (2015). Elektrikli Araçlar için Kablosuz Şarj Cihazı Tasarımı. *Yüksek Lisans Tezi*. İstanbul.

İşak, P., Kelebekler, E., ve Yıldız, A. B. (Kasım 2007). Karşılıklı Endüktans Etkisinin Anahtarlamalı Devrelerde İfade Edilmesi. *Kaynak Elektrik*.

Khutwat, S., and Gaur, S. (Oct. 2016). Wireless charging system for electric vehicle. *IEEE Int. Conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System (SCOPES)*. India.

Liu, C. (Nov. 2018). Field circuit coupling analysis of dynamic wireless charging for electric vehicle. *IEEE 2nd Int. Electrical and Energy Conference (CIEEC)*. China.

Liu, C., Jiang, C., and Qiu, C. (May 2017). Overview of coil designs for wireless charging of electric vehicle. *IEEE*

PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW). China.

Niculae, D., and Iordache, M. (2019). A Review of Electric Vehicles Charging Technologies Stationary and Dynamic. *The 11th International Symposium On Advanced Topics In Electrical Engineering*. Bükreş, Romanya.

Tang, G. (Nov. 2018). Study on frequency Splitting of SS magnetic resonance wireless charging. *IEEE Int. Conference on Power System Technology (POWERCON)*. China.

Yang, Q. (May 2017). Max. power transfer scheme for magnetic resonance charging system. *IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC)*. Taiwan.

Youn, J., and Choi, J. (June 2015). High efficiency magnetic resonance wireless power transfer system and charging IC for mobile devices. *IEEE 11th Conference on Ph.D. Research in Microelectronics and Electronics (PRIME)*. UK.

Kazıklı Radye Temel Boyutlarının Oturma Davranışı Dikkate Alınarak Optimum Tasarımı

Raziye BOZKURT*¹ , Atila DEMİRÖZ*² 

*Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 42250, Konya

Araştırma Makalesi, Geliş Tarihi: 17.10.2020, Kabul Tarihi: 13.12.2020

Özet

Günümüzde gelişen teknoloji ve artan nüfus oranına bağlı olarak, yüksek katlı yapıların inşası zorunlu hale gelmiştir. Bu durum yapı ve temel güvenliği açısından çalışmaların arttırılmasını da gerekli kılmaktadır. Çünkü, genellikle yüksek katlı binalar için tasarlanan kazıklı radye temeller maliyet açısından beklenmedik rakamlar sunabilmektedir. Bu durumun önüne geçebilmek amacı ile uygun boyutlandırmanın seçilmesi gerekir. Kazık ve radye boyutlarının hem ekonomik hem de güvenli tarafta kalabilecek şekilde doğru tasarlanması gerekir. Dolayısıyla boyutların, taşıma kapasitesi ve oturma miktarları üzerindeki etkileri bilinmelidir. Bu amaçla, bu çalışmada, kazık uzunluğu, kazık çapı ve kazık sayısının kazıklı radye temellerdeki oturma davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Geliştirilen örnek bir matematik model dikkate alınarak, Randolph metodu esaslı bir hesap kodu yazılmış, boyutlandırma değişimine bağlı olarak maksimum oturma ve farklı oturma değerleri analiz edilmiştir. Analiz sonuçları grafiksel olarak sunulmuştur. Çalışma sonucunda, optimum çözümün kazık boyunun ve çapının arttırılmasına bağlı olduğu gösterilmiştir. Ayrıca kazık sayısı ve lokasyonunun oturma davranışına etkisi araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kazıklı radye temeller, Oturma esaslı boyutlandırma, Kazık uzunluğu, Randolph metodu.

Optimum Design by Considering the Settlement Behavior of Pile Raft Foundation Dimensions

Abstract

Due to the developing technology and the increasing population rate today, the construction of high-rise buildings has become mandatory. This situation makes it necessary to increase the studies in terms of structure and foundation safety. Because piled raft foundations, which are generally designed for high-rise buildings, can offer unexpected figures in terms of cost. In order to prevent this situation, proper sizing should be chosen. Pile and raft sizes must be designed correctly so that they can remain both economical and safe. Therefore, the effects of dimensions on bearing capacity and settlement amounts should be known. For this purpose, in this study, the effects of pile length, pile diameter and pile number on pile raft foundation settlement behavior were investigated. Considering a sample mathematical model developed, an account code based on the Randolph method was written, and the maximum settlement and different settlement values were analyzed depending on the sizing change. Analysis results are presented graphically. As a result of the study, it was shown that the optimum solution depends on increasing the pile length and diameter. In addition, the effect of the number and location of the pile on the settlement behavior was investigated.

Keywords: Distributed Pile raft foundations, Settlement based sizing, Pile length, Randolph method.

¹Sorumlu yazar drraziyebozkurt@gmail.com, ²ademiroz@ktun.edu.tr

1. GİRİŞ

Kazıklı radye temeller, radye temelin tek başına güvenlik kriterlerini sağlamadığı durumlarda, mümkün olduğunca az sayıda kazığın radye temele uygun lokasyonla yerleştirilmesidir. Özellikleri itibari ile tahmin edilemeyen değişkenler nedeniyle, kazıklı radye temeller karmaşık bir yapıya sahiptir. Sonlu elemanlar ve sonlu farklar gibi sayısal analiz yöntemleri günümüzde kazıklı radye temellerin çözümü için uygun çözümler sunmaktadır (Önalp, 2010). Radye temeller yük taşıma kapasitesi açısından yeterli güvenlik kriterlerini sağlasa dahi, zaman içerisinde aşırı oturmalar oluşabilir. Yapı güvenliği açısından, oturmaların önüne geçebilmek için toplam ve farklı oturmaları kontrol altına alan alternatif çözümler bulunmuştur (Alver, 2015).

Radyenin boyutlarının artırılması çoğu durumda yapı alanı içerisinde mümkün olamamaktadır. Ayrıca ekonomik anlamda problem teşkil etmektedir. Radye temellerde, oturmaların hizmet görülebilirlik durumu için kabul edilebilir sınırlara çekilebilmesi konusunda hem taşıma gücünü arttırmak hem de oturmaların minimize edilmesi için kazıkların ilavesi önerilmektedir. Limit durum analizi, deformasyon analizi ve yapısal analiz kazıkların tasarımı için üç aşamadır (Fellenius, 1976).

Radye temelin zeminle etkileştiği, yani radye temel zemin temasının kesilmediği durumda yük, radye temel ve kazıklar arasında paylaşılarak zemine aktarılır. Bütün yükün kazıklar tarafından taşınmadığı, radye temelin de belirli oranlarda yük taşıdığı bilinmektedir. Bu durumda esas konu yükün hangi oranlarda kazık ve radye arasında paylaşıldığıdır. Bu noktada, amaç, toplam ve farklı oturmalar kontrol altında tutularak, taşıma gücü açısından güvenliğin sağlanması ve aynı zamanda ekonomik bir çözüm sunulması gerekmektedir. Ekonomik tasarım için, farklı ve toplam oturmaları kontrol altında tutan, yeterli sayıda kazığın, çapı (D), uzunluğu (L), aralığı (s) ile radye temelin kalınlığının (t) belirlenmesi gerekir. Dolayısı ile kazık sayısının hesaplanmasında ve boyutlarının belirlenmesinde oturma miktarında ki azalma en belirleyici parametre olmaktadır. Bu nedenle bu çalışma da geliştirilen bir zemin örneği üzerinden, boyutlandırılmalara bağlı değişen oturma değerleri ekonomiklik gözetilerek yorumlanmıştır. Kazıklı radye temelin oturma esaslı tasarımına yönelik bir analiz yapılmıştır.

Oturma hesabı zeminin elastik özellikleri ile ilgilidir. Bu parametreler elastisite modülü (E), kayma modülü (G) ve poisson oranıdır (ν). Yöntem olarak Randolph yöntemi seçilmiştir. Çalışmada, ilk aşamada kazık boyu (L) ve

kazık sayısı sabit tutularak, kazık çapının (D) değişimine bağlı oluşan maksimum oturma (S_{max}) ve farklı oturma (diff (S)) değerleri, ikinci aşamada kazık çapı (D) ve kazık sayısı sabit tutularak, kazık uzunluğu (L) değişimine bağlı oluşan oturma değerleri, üçüncü aşamada ise kazık çapı (D) ve kazık boyu (L) sabit tutularak kazık sayısına ve yerleşimine bağlı olarak oluşan oturma değerleri incelenmiştir. Son aşamada ise radye kalınlığı (t) değişimi sonucunda oturmanın nasıl değiştiği yorumlanmıştır. Çalışmanın amacı, kazıklı radye temellerin oturma esaslı tasarım ilkeleri dikkate alınarak, Randolph metodu ile yazılan bir kod ile optimizasyonudur. Güvenli bir şekilde, oturmayı belli sınırlar içerisinde tutarak, kazıklı radye temelin ekonomiklik açısından optimize edilmesidir.

2. YÖNTEM

Kazıklı radye temellerin oturma hesabı için birçok yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemler basitleştirilmiş, yaklaşık ve bilgisayar tasarımlı kesin yöntemlerdir. Çalışmada basitleştirilmiş yöntemlerden olan Randolph yöntemi kullanılmıştır. Randolph yönteminin temelini oluşturan formülasyonlar ile Eşdeğer Radye yöntemi benimsenmiştir. Randolph yönteminde farklı zemin tabakalarını dikkate almak yerine, ortalama bir zemin, tek bir tabaka gibi düşünülmektedir. Bu tabakanın kayma modülü (G), ağırlıklı ortalama ve maksimum kayma modülünün %25'i alınarak hesaplanmıştır. MATLAB programında yazılan bir kod kullanılarak kazık sayısı, uzunluğu, kazık sayısı ve radye kalınlığı için çözüm yapılmıştır. Problemin esas amacı, her bir kazığın rijitliğini ve kazıklar arasındaki etkileşimi göz önüne alarak, boyutların optimum sınırlarda minimize edilerek ekonomik çözümlerin sunulmasıdır.

Radyenin tamamen elastik olduğu kabulü yapılmıştır. Bu kabul ile üst yapı, yükü kazıklar arasında eşit olarak paylaşabilir. Bir kazıklı radye temel sistemi matematiksel olarak tanımlanmış ve izah edilen yöntemler kullanılarak analizler yapılmış ve boyut değişimlerine bağlı oturma değerleri tablolar yardımı ile grafiksel olarak gösterilmiştir. Geçmişten bugüne, kazık grubu ve radye temel arasındaki yük paylaşımı için birçok denklem önerilmiştir. Radye temelin taşıdığı yükün kazık grubunun taşıdığı yüke oranı, P_r/P_p Denklem (1), yardımı ile hesaplanabilir (Randolph vd. 1993). Burada radyenin tamamen rijit olduğu kabul edilmiştir. Kabule göre radyenin oturması ile kazık grubunun oturmasının eşit olmasıdır. Fakat bu kabul gerçek radye davranışı ile farklılık göstermektedir.

$$\frac{P_r}{P_p} = \frac{0.2}{1-0.8(K_r/K_p)} \cdot \frac{K_r}{K_p} \quad (1)$$

P_r: Radye temelin taşıdığı yük, **P_p**: Kazık grubunun taşıdığı yük, **K_r**: Radyenin rijitliği, **K_p**: Kazık grubunun rijitliği

$$\frac{P_i}{G_1 \cdot r_0 \cdot w_i} = \frac{\frac{4\eta}{(1-\nu)\xi} + \rho \frac{2\pi}{\xi} \cdot \frac{\tanh\mu_1}{\mu_1} \cdot \frac{1}{r_0}}{1 + \frac{1}{\pi \cdot \lambda} \frac{4\eta}{(1-\nu)\xi} \cdot \frac{\tanh\mu_1}{\mu_1} \cdot \frac{1}{r_0}} \quad (2)$$

P_i: Kazığa gelen yük, **W_i**: Kazığın oturması, **L_p**: Kazığın uzunluğu, **r₀**: Kazığın yarıçapı, **G₁**: Kazık ucundaki zeminin kayma modülü

Formülde kullanılan diğer parametreler denklem (3)'deki şekilde hesaplanır.

$$\begin{aligned} \eta &= r_b / r_0 \\ \xi &= G_1 / G_b \\ \rho &= G_{avg} / G_1 \\ \lambda &= E_p / G_1 \\ \xi &= \ln(r_m / r_0) \\ r_m &= \{0.25 + \xi[2.5 \rho(1-\nu) - 0.25]\} L_p \\ \mu_1 &= (1/r_0) \left(2 / (\xi\lambda)^{1/2}\right) \end{aligned} \quad (3)$$

G_{avg}: zeminin ortalama kayma modülü, **E_p**: kazığın elastisite modülü, **r_b**: kazık taban yarıçapı, **ν**: Poisson oranı

Kazıklar arası etkileşimden dolayı, kazık grubunun rijitliği için verimlilik katsayısı olarak adlandırılan bir faktör kullanılmaktadır. Şu şekilde denklem (4) yardımı ile hesaplanır.

$$\eta = 1 / \sum_{i,j=1}^n \alpha_{ij} \quad (4)$$

η: Verimlilik katsayısı, **α_{ij}**: Her bir kazığın diğer kazık üzerinde ki etkisi, **n**: Kazık sayısı

Bir kazığın rijitliği verimlilik faktörüne bağlı olarak Denklem (5) yardımı ile şu şekilde hesaplanabilir.

$$K_p = n \cdot K_1 \cdot \eta \quad (5)$$

K_p: kazık grubunun rijitliği, **n**: kazık sayısı,

K₁: bir kazığın rijitliği, **η**: verimlilik katsayısı

Randolph tarafından her bir kazığın diğer kazık üzerindeki etkisi şu şekilde hesaplanabilir.

$$\alpha_{ij} = \frac{\ln\left(\frac{r_m}{S}\right)}{\ln\left(\frac{2r_m}{D_0}\right)} F_\alpha \quad (6)$$

D₀: Kazık çapı, **S**: Kazıklar arası mesafe, **r_m**: Etki yarıçapı

$$r_m = \{0.25 + \xi[2.5 \rho(1-\nu) - 0.25]\} L_p \quad (7)$$

F_α kazıkların zemini iyileştirici etkisinden dolayı hesaplanmaktadır. Burada α, kazıklar arasında ki etkileşimi ifade etmektedir.

$$F_\alpha = \frac{2\mu L_p + \sin(2\mu L_p) + \Omega^2 [\sinh(2\mu L_p) - 2\mu L_p] + 2\Omega [\cosh(2\mu L_p) - 1]}{[2 + 2\Omega^2] \sinh(2\mu L_p) + 4\Omega \cosh(2\mu L_p)} \quad (8)$$

L_p kazık boyunu ifade etmektedir ve diğer parametreler şu şekilde hesaplanabilir.

$$\mu = \sqrt{\frac{2\pi\bar{G}}{\ln\left(\frac{2r_m}{D_0}\right)} \cdot E_p \cdot A_p} \quad (9)$$

E_p: kazığın elastisite modülü, **A_p**: kazığın enkesit alanı, **G**: zeminin ortalama kayma modülü

$$\Omega = \frac{K_{bi}}{E_p \cdot A_p \cdot \mu} \quad (10)$$

K_{bi}: kazığın taban rijitliği, **D₀**: kazık çapı

$$K_{bi} = \frac{\pi}{2I_s} \left(\frac{D_0 \cdot G}{1-\nu}\right) \quad (11)$$

I_s: şekil faktörü

Temel sistemi bir bütün olarak düşünülürse, bir kazığın doğrusal olmayan davranışı tüm sistemin davranışını etkilemektedir. Bu yüzden Caputo ve Viggiani' ye göre i=j durumunda, denklem (12) dikkate alınmalıdır (Caputo ve Viggiani, 1984). Bu denklem incelendiğinde görülmektedir ki, kazığa etki eden yük arttıkça, doğrusal olmayan davranış temel sistemine daha çok etki ettirilmiştir

olmaktadır.

$$\alpha_{ii} = \frac{1}{1 - \frac{Q_i}{Q_{i,limit}}} \quad (12)$$

$Q_{i,limit}$: tekil kazığın taşıma kapasitesi

Terzaghi ve Peck, kazık gruplarının oturma hesabında kullanılan Eşdeğer radye yöntemini geliştirmişlerdir (Terzaghi ve Peck, 1967). Bu yöntemle göre, kazık grubunun oturması, kazık uzunluğuna ve tarafsız eksene bağlıdır. Kazık uzunluğunun üçte biri yaklaşık olarak tarafsız eksen olarak ifade edilir (Tomlinson, 2008).

Tarafsız eksenin yerinin belirlenmesi önemli bir etkidir. Eşdeğer radye seviyesi belirlenerek, oturma hesabı sığ temellerde ki gibi yapılabilir. Oturma hesabında gerçekte karşılan durumla, hesaplarda elde edilen değerler arasında, farklılık oluşmaktadır. Bunun nedeni, oturmanın tek yönde olduğu varsayılırken, sahada üç boyutta deformasyonların oluşmasıdır. Bu durum dikkate alınarak, bir düzeltme faktörü uygulanır.

$$S_i = \frac{\mu_1 \mu_0 \cdot q_n \cdot B}{E} \quad (13)$$

μ_1, μ_0 : etki faktörü

q_n : yayılı yük, B : radye genişliği, E : zeminin Elastisite modülü

Bu düzeltmelerin yanı sıra, derinlik düzeltmesi de yapılarak elde edilen oturma analizi değeri şu şekilde ifade edilebilir. Düzeltme değerleri abaklardan elde edilmektedir.

$$S = S_i \times \mu_g \times \mu_d \quad (14)$$

μ_g : üçüncü boyut düzeltmesi,

μ_d : derinlik düzeltmesi

3. KAZIKLI RADYE TEMELLERİN OTURMA TABANLI OPTİMUM BOYUTLANDIRILMASI

Tasarım değişkenlerine göre, Randolph metodu dikkate alınarak yazılan bir MATLAB kodu ile boyutlandırmaya bağlı oturma analizi yapılmıştır. Kazık çapı, kazık uzunluğu, radye kalınlığı ve kazık sayısı değiştirilerek, oturma davranışına etkileri araştırılmıştır.

3.1. Tasarım Değişkenleri

Tasarım değişkenleri tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Tasarım değişkenleri ve değerleri

Parametreler	Değerler
Kazık çapı (D) m	0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8
Kazık uzunluğu (L) m	20, 24, 28, 32, 36, 40
Kazık sayısı	30, 32, 36, 40, 50, 64, 100

3.2. Problemin Tanımlanması

Tasarlanan kazıklı radye temele ait genel özellikler Tablo 2'de verilmiştir. Bu değerlere göre kazık uzunluğu, kazık çapı, kazık sayısı ve radye kalınlığı değiştirilerek, elde edilen analiz sonuçları şu şekilde tanımlanabilir.

Tablo 2. Tasarım değişkenleri ve değerleri

Genel Özellikler	Değerler
Radye kalınlığı	1.2
Radye eni (m)	20
Radye uzunluğu (m)	50
Radyeye gelen üniform yük (kPa)	200
Tek bir kazığın taşıma kapasitesi (kPa)	50
Kazıklar arası x yönündeki mesafe (m)	1
Kazıklar arası y yönündeki mesafe (m)	1
Poisson oranı	0.2
Kazık uzunluğu ort kayma modülü (kPa)	120
Maksimum kayma modülü (kPa)	160

4. ANALİZ BULGULARI

Kapasite hesabı, yapısal ve oturma hesabı dikkate alınarak kazıklı radye temel hesabı yapılmaktadır. Belirtildiği üzere bu çalışma da oturma davranışı temel alınarak analiz yapılmıştır. Oturma davranışı zeminin elastik özelliklerini temsil eden parametreler, Elastisite modülü (E), Kayma modülü (G) ve Poisson oranına (v) bağlıdır. Çalışma da boyut etkisinin oturma davranışına etkisi araştırıldığı için, boyutlar sırası ile değiştirilerek oluşan maksimum oturma ve farklı oturma değerleri grafiksel olarak analiz edilmiştir.

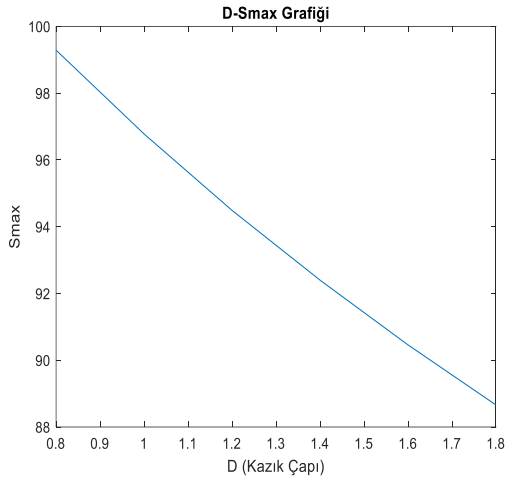
4.1. Kazık Çapı Değişiminin Oturma Davranışına Etkisi

Kazık çapı 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6 ve 1.8 aralığında değiştirilerek, radye kalınlığı t=1.2 m, kazık uzunluğu 20 m ve kazık yerleşimi 30 (5x6) olarak seçilmiştir. Tablo 3'de çap değişimine bağlı oluşan maksimum oturma ve farklı

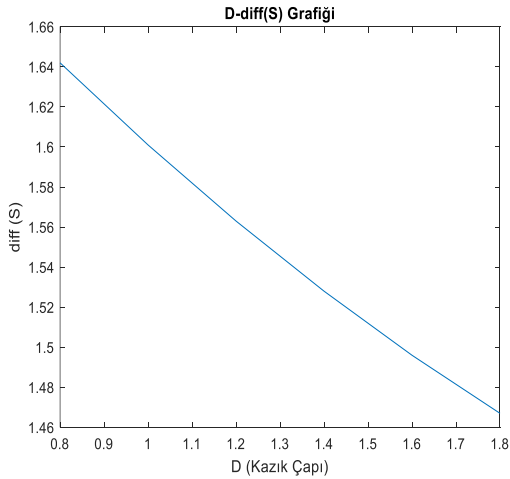
oturma değerleri verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde görülmektedir ki, kazık çapının arttırılması oturma değerlerinin azalması yönünde bir etki oluşturmaktadır. Fakat tasarım aşamasında, kazık çapının arttırılmasında ekonomiklik göz önünde bulundurulmalıdır.

Tablo 3. Kazık çapına bağlı maksimum oturma (S_{max}) ve farklı oturma (diff(S)) değerleri

Kazık Çapı (D) (m)	S_{max} (cm)	Diff (S) (cm)
0.8	9.92	1.64
1.0	9.67	1.60
1.2	9.44	1.56
1.4	9.24	1.52
1.6	9.04	1.49
1.8	8.86	1.46



Şekil 1. D- S_{max} grafiği



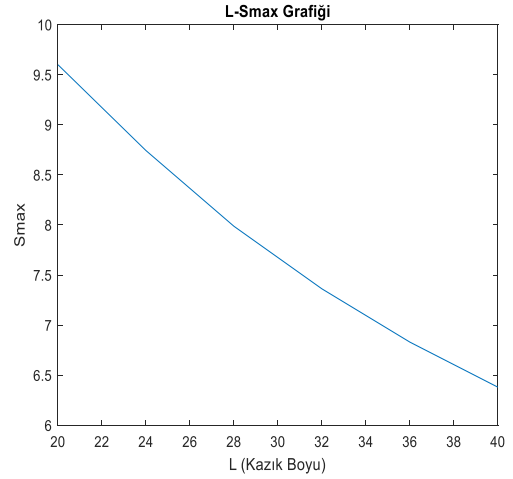
Şekil 2. D-diff(S) grafiği

4.2. Kazık Uzunluğunun Değişiminin Oturma Davranışına Etkisi

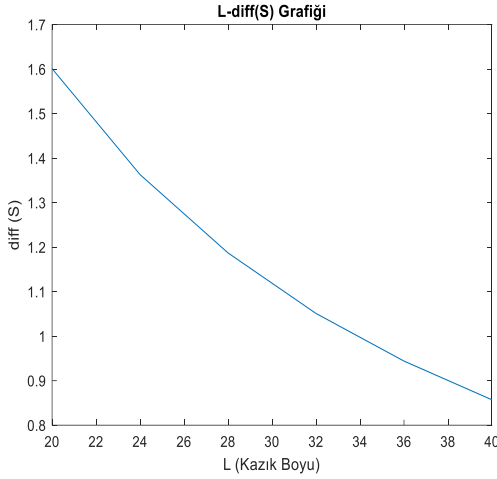
Kazık uzunlukları 20, 24, 28, 32, 36 ve 40 m, radye kalınlığı 1.2 m, kazık çapı 0.8 m ve kazık yerleşimi 30 (5×6) olarak seçilmiştir. Kazık taşıma kapasitesini arttırdığı ve zemine iyileştirme sağladığı bilinen kazık uzunluğunun arttırılması, oturma davranışı üzerinde de olumlu sonuçlar vermektedir. Bu sonuca göre, kazık uzunluğunun arttırılması ile oturma değerlerinin azalması arasında yaklaşık olarak doğrusal bir ilişki olduğu görülmektedir. Aynı zamanda, zeminin derinlik ile iyileşeceği düşünülürse, oturmaları azaltmanın en etkili yolunun kazık uzunluğunun arttırılması olduğu görülmektedir.

Tablo 4. Kazık uzunluğunuz bağlı maksimum oturma (S_{max}) ve farklı oturma (diff(S)) değerleri

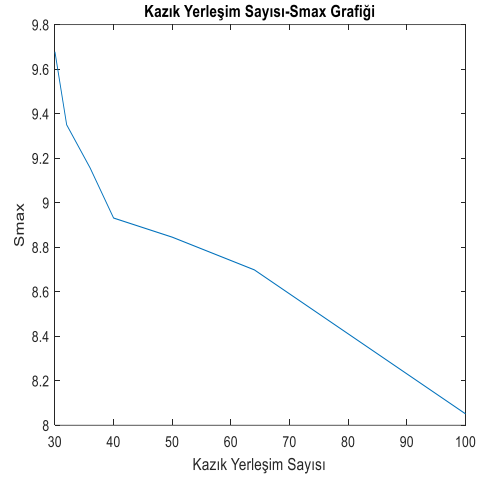
Kazık Uzunluğu (L) m	S_{max} (cm)	Diff (S) (cm)
20	9.60	1.60
24	8.74	1.36
28	7.98	1.18
32	7.36	1.05
36	6.83	0.94
40	6.38	0.85



Şekil 3. L- S_{max} grafiği



Şekil 4. L-diff (S) grafiği

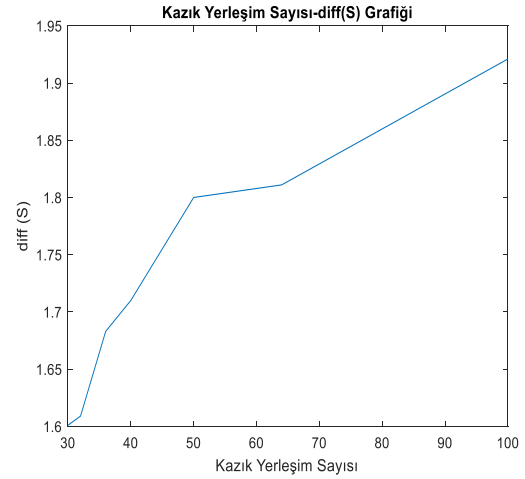
Şekil 5. Kazık yerleşim sayısı-S_{max} grafiği

4.3. Kazık Sayısı Değişiminin Oturma Davranışına Etkisi

$L=20\text{m}$, uzunluğunda $D=0.8\text{ m}$, çapında, 30, 32, 36, 40, 50, 64 ve 100 arasında değişen kazıklarda, radye kalınlığı 1.2 m olarak seçilmiştir. Kazık sayısına bağlı olarak oluşan oturma değerleri Tablo 5' te verilmiştir. Kazık sayısının artırılması ilk aşamada oturmaları azaltmaktadır. Fakat, kazık sayısının artışı, oturmalarda önemli bir azalmaya neden olmadığı gibi, farklı oturmalarında arttığı görülmektedir. Bu davranışın esas nedeni ise *Kazık-Zemin-Kazık* etkileşimidir. Kazık aralığı azaldıkça, kazıklar arası etkileşim artmakta ve kazık sayısının artışı olumsuz sonuçlar oluşturabilmektedir. Kazıklı radye temel in optimizasyon çalışmalarındaki esas amacın optimum kazık sayısının tespit edilmesi olduğunu söyleyebiliriz. Kazık sayısında artışa rağmen oturmalarda ortaya çıkan bu durum, Eşdeğer Radye yaklaşımını doğrular niteliktedir.

Tablo 5. Kazık sayısına bağlı maksimum oturma (S_{\max}) ve farklı oturma (diff(S)) değerleri

Kazık sayısı ve yerleşimi	S_{\max} (cm)	Diff (S) (cm)
30 (5×6)	9.67	1.59
32 (8×4)	9.35	1.60
36 (9×4)	9.15	1.68
40 (10×4)	8.93	1.71
50 (10×5)	8.84	1.80
64 (8×8)	8.69	1.81
100 (10×10)	8.05	1.92



Şekil 6. Kazık yerleşimi sayısı-diff (S) grafiği

4.4. Radye Kalınlığı Değişiminin Oturma Davranışına Etkisi

Radye kalınlığı, yazılan koda bağlı olarak 1-3 m arasında değişen değerlere göre hesaplanmıştır. Nümerik analiz anlamında maksimum oturma ve farklı oturma değerleri arasında çok fazla bir değişim görülmemiştir. Fakat sahada, radye temel kalınlığının artırılmasının oturma davranışı üzerinde pozitif etkileri olduğu göz ardı edilmemelidir. Yani oturma davranışını azaltan bir davranış sergilemektedir.

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Oturmaların belirli sınırlarda tutularak, maksimum ekonominin sağlanması, kazıklı radye temel tasarımının esas amaçlarından birisidir. Randolph metodu kullanılarak oluşturulan MATLAB koduna göre kazık çapı, uzunluğu, sayısına ve radye kalınlığı değişkenlerine göre oturma değerleri incelenmiştir. Oturmanın daha fazla azalmadığı kazık özelliklerinde, çözümün optimum

olduğu düşünülebilir. Dört aşamadan oluşan analizin sonuçları şu şekilde özetlenebilir:

- Kazık uzunluğunun artırılmasıyla taşıma kapasitesi artış ve oturmanın azalttığı için en optimum çözümü sağladığı düşünülebilir.
- Optimum çözüm, oturma değerlerinin çok farklılık göstermediği kazık sayısında elde edilmektedir.
- Kazık çapının artırılması maksimum ve farklı oturma davranışının azaltılması üzerinde doğrusal bir davranış sunmaktadır. Radye kalınlığının artırılması, sahada oturmaları kontrol eden sonuçlar sunmaktadır. Fakat yapılan Randolph yöntemi esaslı nümerik analizlerde, radye kalınlığının artırılmasının gözle görülür bir etki oluşturmadığı tespit edilmiştir.
- Kazık sayısının artırılmasına bağlı olarak kazıklar arası etkileşim artmaktadır. Ortaya çıkan bu duruma göre, kazık sayısının artırılması, belirli bir noktadan sonra oturma davranışı üzerinde değişmeyen bir etki oluşturmaktadır.
- Kazık sayısının, ekonomiklik dikkate alınarak, doğru tespit edilmesi önem arz etmektedir.
- Kazık sayısının artırılması, kazıklar arası grup etkisinden dolayı, farklı oturmaları arttırmaktadır.

Tomlinson M., Woodward J., 2008, *Pile design and construction practice* (5th ed.). New York: Taylor & Francis.

KAYNAKLAR

Alver O., Özden G., 2015, “Tabakalı Zeminlerde Kazıklı Radye Temellerin Optimum Tasarımı” Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, Vol. 17, No:1, 13-26.

Caputo V., Viggiani C., 1984, “Pile foundation analysis: a simple approach to nonlinearity effects”, Riv. It. Di Geotecnica, Vol. 18, No.1, p. 32-51.

Fellenius BH. “Pile Foundations-Analytical”, in Analysis and design of building foundations, ed. H.Y. Fah,1976.

Önalp A., 2010, “Geoteknik Bilgisi 3 Bina Temelleri”, 426 s. Birsen yayınevi, İstanbul.

Randolph MF., Clancy P., 1993, “An approximate analysis procedure for piled raft foundation”. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 17 (12), s.849-869.

Terzaghi K., Peck RB., 1967, “Soil mechanics in engineering practice (Second Edition). John Wiley and Sons.

A 100% Renewable Energy System: The Case of Turkey In The Year 2050

Hasan Hüseyin ÇOBAN*¹ 

*Ardahan University, Engineering Faculty, Department of Electrical Electronics Engineering, Ardahan, 75002, Turkey

Research Article, Received Date: 29.10.2020, Accepted Date: 23.11.2020

Abstract

Energy demand is increasing rapidly in developing countries (Turkey is one of them) and fossil fuels play an important role in meeting this demand. In terms of pricing, it seems unlikely that energy produced by fossil fuels can compete with renewable energy sources. This paper investigates whether the possibility of converting to a 100% renewable energy system for the current energy system. A simulation tool, EnergyPLAN, was used to investigate the implementation of 100% renewable energy system. EnergyPLAN is a computer-based tool that models a country's energy system and predicts system behavior and explores future energy systems to identify trends for energy use and emissions. The study has been performed for renewable scenarios designed for 2050. Turkey is used as a case study; however, it reflects various energy systems today which use power plants for the heating, cooling, industry, electricity, and transport sectors. There are five analysis steps which are: 1) a reference model of the current Turkish energy system was constructed, 2) increase and install new renewable energy generation to replace the remaining fossil fuels, 3) introduction of district heating, 4) removal of nuclear power plants, and finally, 5) the implementation of electric vehicles (EVs). These energy-systems were compared according to carbon emission and produced energy; so that the benefits from each could be used to create an 'optimum' scenario. The results are very promising since they indicate that the transition to a 100% renewable energy system can begin today, without increasing the fossil fuel power plants in the short- or long-term, if the generated power based on the volatile energy sources photovoltaics (PV), wind energy (onshore) and hydropower forecasted for 2050 become a reality.

Keywords: 100% renewable energy, Energy savings, Power system flexibility, Solar energy, Transport, Wind energy.

%100 Yenilenebilir Enerji Sistemi: 2050 Türkiye Örneği

Özet

Gelişmekte olan ülkelerde (Türkiye de bunlardan biri) enerji talebi hızla artmakta ve fosil yakıtlar bu talebin karşılanmasında önemli rol oynamaktadır. Enerji fiyatları açısından, fosil yakıtlar tarafından üretilen enerjinin yenilenebilir enerji kaynakları ile rekabet etmesi pek olası görünmemektedir. Bu makalede, mevcut enerji sistemi için %100 yenilenebilir bir enerji sistemine dönüştürme olasılığının olup olmadığını araştırılmaktadır. % 100 yenilenebilir enerji sisteminin uygulanmasını araştırmak için EnergyPLAN adlı bir yazılım simülasyon aracı kullanılmıştır. EnergyPLAN, bir ülkenin enerji sistemini modelleyen ve sistem davranışını tahmin eden, enerji kullanımı ve emisyon eğilimlerini belirlemek için gelecekteki enerji sistemlerini araştıran bilgisayar tabanlı bir yazılımdır. Çalışma, 2050 için tasarlanan yenilenebilir senaryolar için gerçekleştirilmiştir. Vaka çalışmasında Türkiye örneğinde; günümüzdeki ısıtma, soğutma, sanayi, elektrik ve ulaştırma sektörleri için enerji santrallerini kullanan çeşitli enerji sistemlerini yansıtılmıştır. Beş analiz adımı uygulanmıştır: 1) mevcut Türk enerji sistemi referans modeli olarak alınmış, 2) fosil yakıtların yerine yenilenebilir enerji üretiminin artırılması ve yeni santrallerin kurulması hedeflenmiş, 3) bölgesel ısıtmanın sistemlerinin hayata geçirilmesi amaçlanmış, 4) nükleer enerji santralleri kaldırılmış ve son olarak, 5) elektrikli araçlar uygulanmıştır. Her bir enerji sistemi için karbon salınımına ve üretilen enerjiye göre karşılaştırılmıştır; böylece her birinden elde edilen

¹Corresponding author huseyincoban@ardahan.edu.tr

sonuçlar "optimum" bir senaryo oluşturmak için kullanılmıştır. Sonuçlar, fosil yakıt santrallerini kısa veya uzun vadede arttırmadan; 2050 için öngörülen yenilenebilir enerji kaynakları fotovoltaik, rüzgar ve hidroelektrik enerjisine dayalı olarak üretilen güç gerçeğe dönüştürüldüğünde % 100 yenilenebilir enerji sistemine geçişin bugün umut verici olarak başlayabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: % 100 yenilenebilir enerji, Enerji tasarrufu, Güneş enerjisi, Elektrikli araçlar, Rüzgar enerjisi.

1. INTRODUCTION

As of 2018, global daily oil production has reached for the first time the amount of 100 million barrels (Hacquard, Simoën, Hache, 2019). The unsustainable massive scale of fossil fuel production and its dependence pollutes the Earth. According to the estimates of the American Energy Information Agency (EIA), as of the end of 2019; in the light of new technologies such as developing technologies, marine drilling and rock oil, global crude oil, biofuel, and liquid hydrocarbons have a life of up to 30 years ("International Energy Outlook", 2019). According to current estimates, at this rate, we'll run out of gas and oil in 50 years or so, and in about a century for coal (Agbulut, Bakir, 2019; Stolic, Pesic, Milosevic, Spasic, Lazic, 2018). Conversely, we have abundant sun, rain, and wind which are all renewable energy (Foley, 1992). What if we could replace fossil fuel dependence with an existence based completely on renewables?

The ecological debt began to form in the early 1970s in separate countries and large industrial cities. Now, almost all countries are debtors, and unfortunately, every year the day of exceeding the opportunities of the Earth comes ever earlier. Can we stop this huge conveyor? It may be possible but it's too difficult. The keyword in this mission is renewable resources!

Everyone likes electricity, technology, and being able to visit interesting parts of the world through the miracles of travel, television, the internet, all things that have now become commonplace, thanks to energy from fossil fuels. If fossil fuels have given us all these benefits, does that mean we should continue to use them forever? It's appropriate to acknowledge and be grateful for the benefits that coal, and gas, and oil have brought us, but what we know today that we didn't know all that much about 300 years ago, is that they also have significant drawbacks.

First, there's the simple issue of pollution due to usage of fossil fuels. Extracting and burning fossil fuels creates an enormous amount of pollution, choking our lungs, dirtying our air, and contaminating our water and our soil. Coal is the worst. Considering only the health costs

from air pollution, coal has not been economically viable for a long time. So why are we still using it? Because those who bear the costs are not those who reap the profits. Around the world it's estimated that almost four million people die prematurely every year from outdoor air pollution, 200,000 of those in the U.S. alone. In 2018, the State of Global Air report estimated that 95% of the world's population lives in areas that don't have healthy air according to World Health Organization standards. Imagine people who can afford to buy houses in nicer neighborhoods with better air quality. It's usually those who can't afford a better place to live who bear the brunt of the impacts. From mountaintop coal removal, to oil spills, and the tar sands, fossil fuels exert a massive cost that is subsidized by all of us who share the land, the water, and the air that they pollute, but things are changing. Everyone needs electricity, most of us would agree, and there are still nearly a billion people who don't have it, but did you know that most of the new energy growth is in renewables? Bloomberg's New Energy Outlook estimates that we'll be up to 50% by 2050, only counting wind and solar. Today, continuing to promote fossil fuels is like investing in horse farms and buggy businesses when Henry Ford is already turning out the Model-T Ford, or snapping up Blockbuster stocks and stockpiling DVDs, when Netflix is already taking over the market. The world is changing and even though it might seem scary sometimes, clinging to the past is not going to stop it.

One of the significant drawbacks of using fossil fuels is climate change. Extracting and burning coal, and gas, and oil releases carbon dioxide and other heat-trapping gases directly into the atmosphere that would otherwise take millions of years to reach it. These gases have built up to the point where they're increasing the temperature of the entire planet, and this is already affecting our lives and our economy in very serious ways. The world knows this and that's why, 195 countries met in Paris and agreed to keep warming below at least two degrees Celsius in 2015. This agreement has enormous implications for our energy sources, because, for countries that take this seriously, it means they have to do more to cut fossil fuel use faster and bump up clean energy. China, Britain, France, India plans to ban all gas and diesel vehicles by

2040 (Burch, Gilchrist, 2018). Wind turbines generate 47 % of Danish electricity (Reuters, 2020 January, 02), and the Netherlands plans to cut its emissions by 95% till 2050. Iceland ("The Energy Sector", 2011 November 11) and Norway (Hagos, Gebremedhin, Zethraeus, 2014) are already producing, its electricity from renewables. Many organizations are also divesting from fossil fuels for both practical and ethical reasons.

By 2018, a total of more than \$6 trillion had been diverted from fossil fuels, and that number continues to grow. The bottom line is that: fossil fuels got us to where we are today, but they take us further at our peril. Thankfully, now we have better, cleaner, and cheaper ways to get the energy we need, ways that don't pollute our air and our water, and don't change our climate. Imagine fuel without fear. No climate change. No oil spills, dead coal miners, dirty air, devastated lands, lost wildlife. No energy poverty.

At this point, we can increase our negative effects on our health and our planet by choosing to extend our dependence on fossil fuels. On the other hand, we can decide to adopt and invest in cleaner and sustainable opportunities, thereby ending some of our current habits and choices. This may mean: all land vehicles will become electrified in the years ahead, all roofs will be covered with solar panels, all buildings will be insulated to prevent heat loss, all products will be designed to last longer, and their reuse and recycling will be easily provided. This may also mean the discontinuation of fossil fuel use. This represents a major challenge, even if we ignore the relevant politics and focus on science and engineering. By understanding how we use energy, we can better understand the problem. We have thought about this question for decades, while renewable energy sources (RES) are considered an important resource in many countries around the world but currently still only provide about 14% of our needs (Pimentel, Herz, Glickstein, Zimmerman, Allen, Becker, Seidel, 2002). The biggest challenge is to increase the use of renewable resources to generate electrical energy in the supply system and to promote renewable energy production in a safe, economical (Akella, Saini, Sharma, 2009) and cost effective (Frondel, Ritter, Schmidt, Vance, 2010) manner.

The major challenge of sustainable development of RES is identified. Many RES (especially solar and wind and hydro) generate intermittent power. Wherever intermittent power sources reach high grid penetration levels, energy storage becomes a critical factor that can solve these issues to provide reliable energy services (El

Bassam, Maegaard, Schlichting, 2013). These intermittent resources have to integrate into the energy system, especially the electricity supply. Some sectors such as transportation may have more difficulty in transitioning to cleaner energy alternatives compared to other sectors (Kemfert, Breyer, Oei, 2020). Many liquid fuels play a primary role in the predominant type of transportation. The attitude we have is to say that this will be a game changer. Based on the example of Turkey, this article identifies and discusses possible solutions for energy problems and to transform it.

Foreign dependence in energy is an important problem not only economically but also politically. As a matter of fact, providing energy to a large extent from foreign sources may also lead to a national security weakness. In terms of Turkey, energy is a major risk threatening the high rate of dependence on foreign energy security. The subject of foreign dependence on energy (Uslu, 2008); in the past, it had become a serious impediment for Turkey's economy. Today, this dependence will continue to reduce at a certain rate primarily ensure achievement of higher growth rates then use that the economic potential of Turkey (Yıldız, 2010).

Despite some difficulties, the transition to clean energy is currently taking place across Europe. Companies, landlords, municipalities, local authorities, and the European Union (EU) are already taking action by building smart grids (Leal-Arcas, Lasniewska, Proedrou, 2017), installing solar (Šuri, Huld, Dunlop, Ossenbrink, 2007) and wind energy systems (González, Lacal-Arántegui, 2016), implementing corporate innovation programs to invest, setting standards and labels (Blok, 2006). Therefore, for sustainable development strategies in Turkey, there are still significant obstacles to overcome in order to increase renewable energy production, savings, efficiency improvements and abandon dependence on fossil fuels (Balat, 2010; Topallı, Alagöz, 2014). As a result, Turkey is now facing these problems from RES to increase the share of intermittent electricity, to improve the efficiency of existing power plants, and to include the transport sector for future strategies (Kaygusuz, 2002).

For sustainable development considering not only environmental but also social and economic aspects must be taken into account together by using RES, because there is no requirement of fuel (Vera, Langlois, 2007). Figure 1 is a diagram that shows the three portions that work together to make up sustainability (Chilán, Torres, Machuca, Cordova, Pérez, Gamez, 2018).

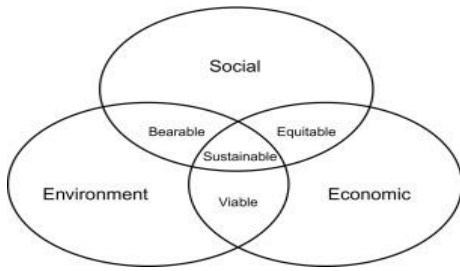


Figure 1. The three pillars of sustainability (Gyamfi, Derkyi, Asuamah, Aduako, 2018)

People could think to start figuring out how can we introduce the same flexibility in other parts of the energy system that we previously had the luxury of in the form of fossil fuels in the past. It is supposed that firstly it is

not just a great change because we're replacing fossil fuels but the tones are set that this is also a really good change because it's a very cost-effective thing to do, as illustrated in Figure 2 ("Lazard Levelized Cost of Energy Analysis", 2019, November) It is a pictorial overview in a very simple way about the Turkish energy system looks like today. They're all very dependent on fossil fuels. It is an obvious thing that's happening when it is done this type of change is that it is replacing some fossil fuels in the electricity sector with this new form of energy in the form of renewable energy. The two key things have to be added in Figure 2 which are to use RES and the transport on the demand side. The heat and transport are very separated from one another. There is a kind of have three layers in the energy demand system which are electricity, heating/cooling, and transport.

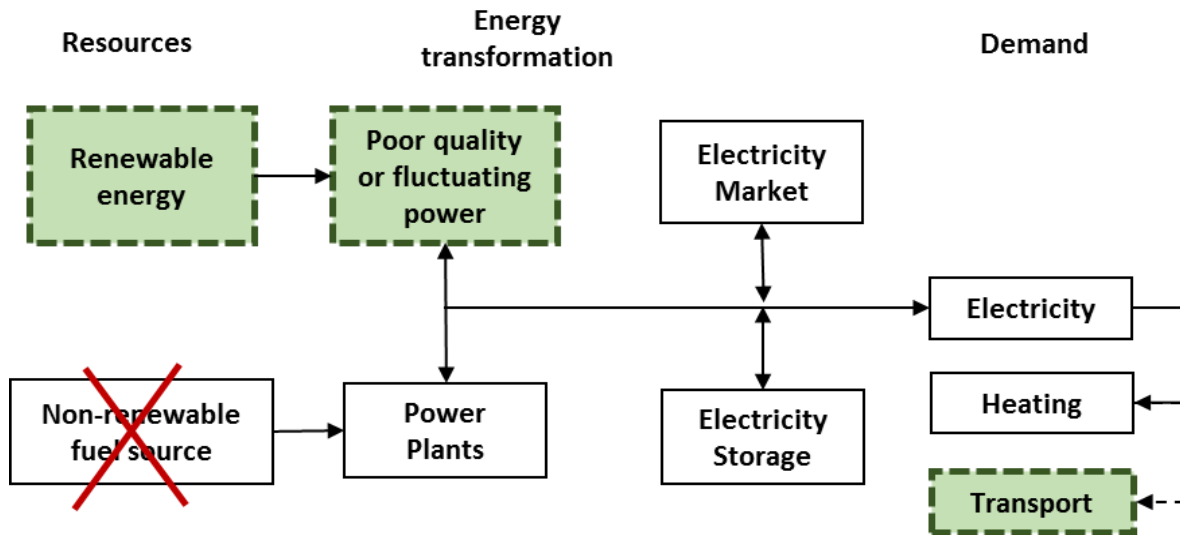


Figure 2. Interactions between technological innovation energy systems today and the future.

The cost of electricity production (Ragheb, 2017; Branker, Pathak, Pearce, 2011; Bemis, Doangelis, Michael, 1990) is based on existing technologies for producing electricity from three types of plants a wind farm, a baseload coal-fired power station, and a base loss combined cycle gas turbine power plant. If we do the calculations based on current technologies and current costs of construction and development wind turbines are now producing electricity at a similar price to baseload coal-fired power stations. That's power stations that have the luxury of operating almost all of the year-round which we know our power stations won't get to do as we bring in more and more wind power. Changing this energy system and the interaction from fossil fuels over to renewable energy can still be done at a cost-effective level. As seen in Figure 3; if we even have to introduce new storage technologies because the price of wind power is relatively cheap compared to what our

alternatives are. It's not a burden for countries; it's an opportunity to take a new form of energy production that we can produce ourselves at a very cheap price.

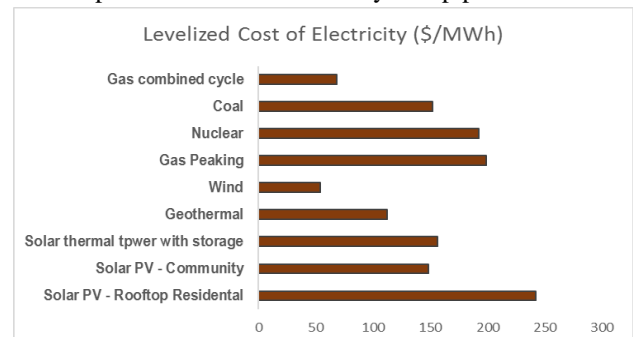


Figure 3. Benchmark Levelized Cost of Electricity

In Turkey, the theoretical hydroelectric potential is 433 billion kWh, while the technically usable potential is 216 billion kWh and the economic hydroelectric energy

potential is 140 billion kWh/year (Atalay, Ulu, 2018). Meanwhile, Turkey has considerable potential for other types of renewable energy, especially solar, geothermal, and wind power. Thus, Turkey is a great example of the situation in many ways: the transport sector uses completely liquid fuels, the hydro potential is not big enough to take the place of fossil fuels, but has great potential for intermittent renewable sources. The wind and photovoltaic energy potential of Turkey presented in Figure 4 and 5 respectively. As seen from the figures, there are many areas all over the country, especially in west parts for wind power, where the average wind speed is over 7 m/s at 50 m height and south parts for solar power where the photovoltaic power is over 5 kwh/kwp.

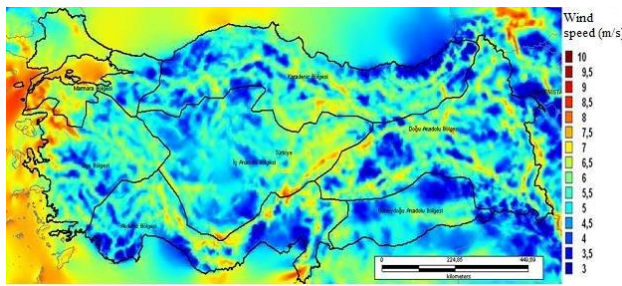


Figure 4. Wind energy potential atlas of Turkey (Kaya, Celik)

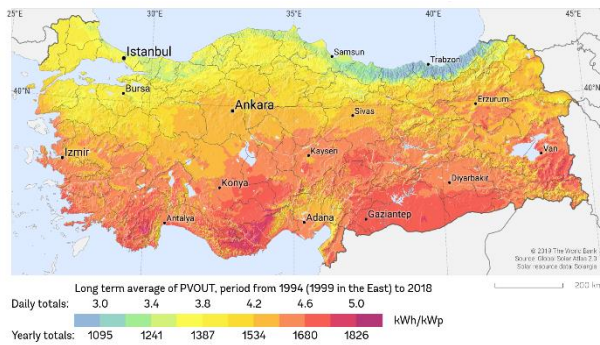


Figure 5. Photovoltaic electricity potential of Turkey (“The World Bank”, 2019)

In this study, examine problems and perspectives of energy conversion based on 100 % renewable energy for Turkey. Using 100% renewable energy was first proposed in the Science paper more than 45 years ago (Sørensen, 1975). Figure 6 shows the primary energy consumption in 2018 compared to the potential of RES in Turkey (Tmmob makina mühendisleri odası peport, MMO/691).

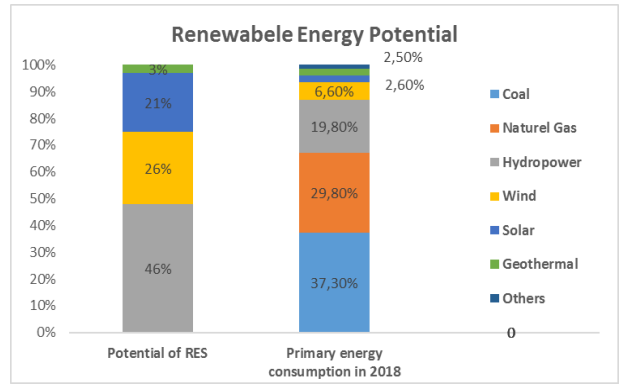


Figure 6. The primary energy consumption in 2018 compared to potential of RES in Turkey.

2. REFERENCE SCENARIO

Domestic resources mainly hydropower, geothermal, and coal reserves of Turkey are approximately 1% of the world’s total. The coal-based power plants that use extremely poor-quality lignite supply more than 40% of the total electric energy demand of Turkey (Kilic, 2006). Figure 7 and 8 show the development from 2010 to present and shows the future view up to 2050 according to the reference scenario.

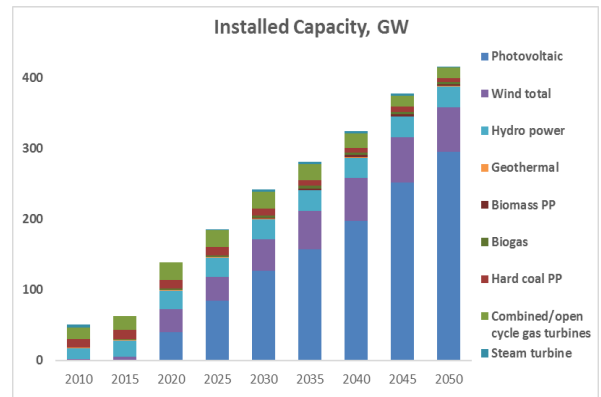


Figure 7. Forecast of installed power generation capacity

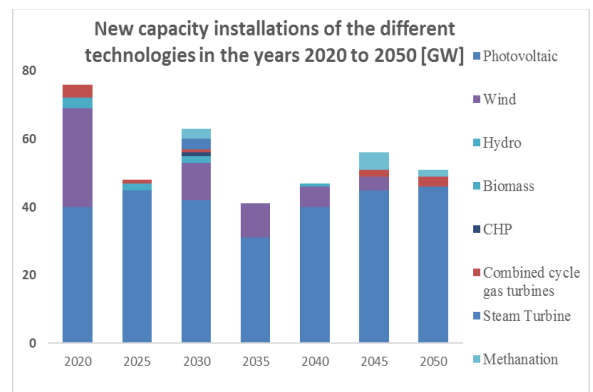


Figure 8. New capacity installations of the different technologies

Two problems arise when analyzing the possibilities of continuing development and replacing more fossil fuels with renewable energy.

First problem is today the transportation sector remains almost totally dependent on petroleum. The total number of vehicles in traffic by the year 2019 reached 2,339,551 in Turkey and 37.7% of these vehicles use Liquefied Petroleum Gas (LPG), while 37.3% use diesel, 24.6% use gasoline and only 0.1% use hybrid, and electric (Özer, Vural, 2021).

The other problem which consists of includes power grid operation, system flexibility requirements is the integration of electricity generation from a gas-fired power plant and wind and solar power. The gas-fired power plants have not been operated to balance fluctuations in renewables mostly small hydropower plants. Consequently, the most economical way to prevent the problems caused by fluctuations in electricity consumption during the day and year is to activate more renewable power plants (Akpınar, 2005).

In the workshop titled “Energy Security” which is organized by Presidential Security and Foreign Policy Committee, attended by members of the board of directors, representatives of relevant state institutions, academics, think tank representatives and experts the main elements of Turkey's energy strategy are summarized as follows:

- 1) Diversification of resources and routes in the supply of oil and natural gas, which are imported energy sources,
- 2) Increasing the share of domestic and renewable energy,
- 3) Increasing energy efficiency,
- 4) The nuclear is intended to be included in the energy basket.

When the situation in 2015 and the reference expected in 2050 are compared, it assumes the following development:

In 2015, the amount of electricity generation increased by 3.07% compared to 2014, reaching 259.69 TWh. Consumption amount increased by 2.69% compared to 2014 and reached 264,14 TWh. Turkey's demand for electricity at the rate of 126% between the years 2017-2050 due to increasing population and rising economic growth in 2050 will reach an annual level of 653 terawatts-hour.

Replacing all existing coal and oil-fired generation across the country by new natural gas-fired and hydropower plant units when the lifetime of the old plants exceeds.

The installed capacity of power in the year 2015 is expected to rise from 73147MW to 415GW in the year 2050. The increase will mainly constitute more than half of the installed power by solar and wind power plants.

2.1. Methodology

The main objective of the study is to evaluate whether it is probable to obtain all of the energy supply from RES until 2050 in Turkey through global transformations to be realized in technical, legal terms. The EnergyPLAN model which is a deterministic input/output tool that uses an hourly simulation over a period of one year is used for calculations. In the calculations, the features of the intermittent nature of RES have been taken into consideration. In recent years, a number of EnergyPLAN models (Lund, 1999; Koo, Park, Shin, Yoon, 2011; Østergaard, Mathiesen, Möller, Lund, 2010) have been proposed in order to analyze the energy, environmental, and economic impact of various energy strategies for large-scale integration of renewable energy.

Using EnergyPLAN results and monitoring data allows to produce realistic results of national energy systems and outline detailed scenarios. The following steps outline the basic steps required to create a reference with EnergyPLAN:

- 1) The total annual production/demand of electricity, district heating, electricity production from renewable energy and nuclear sources, Electrolysis and electricity storage systems in TWh/year;
- 2) Demand for heating and cooling systems in TWh/year;
- 3) Heat supply and distributed generation from individual buildings;
- 4) Fuel consumption and heat and power production for industry;
- 5) Annual fuel consumption (jet fuel, diesel, gasoline, natural gas) data in TWh/year. This may require local data collection.
- 6) Annual energy production conversion of waste in TWh/year;
- 7) Annual production from biomass conversion plants in TWh/year;
- 8) Installation costs (these costs include overall investments, fixed operations and maintenance, variable operation and maintenance, fuel, and transportation).

Outputs are total Carbon dioxide (CO₂) emission, costs, including energy balances and resulting annual productions, fuel consumption, electricity import / export, and income from electricity exchange. it is possible to see a block diagram in Figure 9 that describes the model used for the analysis and the construction of the scenarios.

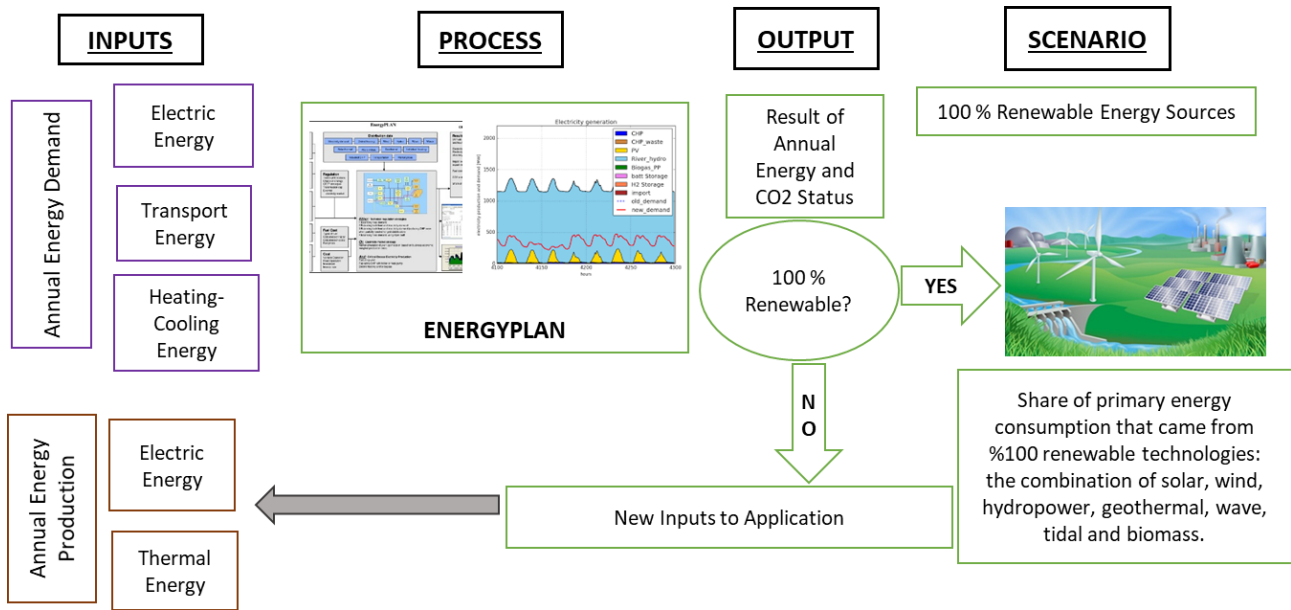


Figure 9. Input, processing and output diagram of EnergyPLAN software

The level of electricity demand from RES is varied for each cycle from 0 % to 100 % to identify the best alternative. As the wind, rain, and solar level increase, electricity generated in a power plant is more than the consumption and the batteries are unable to absorb it. It is defined as Excess Electricity Production and when it occurs it cannot be exported outside the country; as a consequence, players cannot get additional income from EEP. As an example; so much power was produced by German (“Independent”, Berke, 2018, January 04) and Danish (“Theguardian”, Neslen, 2015, July 10) renewable power sources that the country was able to meet its domestic electricity demand and export power to neighbor countries or people essentially got paid to use electricity.

The initial point for the study is the key assumption that development with sustainable generation and use of electricity involves four main technological changes, namely energy savings on the demand side, improve energy efficiency on the production side, replacing conventional vehicles with electric vehicles and replacing of fossil fuels by various types of completely renewable energy. As a result, the following four technological innovations have been implemented for the study.

Savings: 82% of the energy consumption in the buildings is used for heating and it constitutes 26% of the total energy spent in the country. Turkey meets 70% of its energy needs from imported sources. The most effective way to achieve energy efficiency in heating as well as cooling is through thermal insulation. Insulating homes is like covering the house with a blanket. In this way, cold cannot enter inside

and heat cannot escape from inside. Materials with high insulation value should be preferred in buildings and installations. In windows with double or triple glass, heat loss might be reduced by half. Roof, wall, floor insulation should be made without interruption. As we know, the heated air rises and tries to escape from the roof. Therefore, the roof must first be insulated. More than 20% savings can be achieved in energy bills just by doing roof insulation. When the buildings are insulated with the right products and the right applications, heating and cooling can be achieved by consuming an average of 50% less energy. Thus, fuel and electricity bills can be halved. This savings in homes also contributes to the country's economy.

Efficiency: A combination of more thermal power stations with better efficiencies. The better operational ratio of system throughput over total power is defined as 40% electric output and 35% heat output of thermal power station plants. For this purpose, energy output and energy economic efficiency can be achieved by the improvement of existing steam-turbine/engine technologies or the decision to utilize waste heat rather than produce another power energy to satisfy the new cooling energy demand.

Renewable energy sources (RES): It is planned to produce 34000 MW hydroelectric, 20000MW wind energy, 5000 MW solar energy, 1000 MW geothermal energy, and 1000 MW biomass energy within the 2023 targets. This is the direction with the objectives of RES by the year 2023, the provision of at least 30% of Turkey's demand for electricity is planned. By 2050, the country aims to switch to 100% renewable energy use.

Transport: Today, the most important fuel for transport is fossil fuels. Today, 20% of CO₂ emissions in EU countries are due to road transport (Westbrook, Westbrook, 2001). The EU aims to reduce the “Greenhouse Gas Density” originating from vehicles to 10 % by 2020. Fossil fuels will run out in the near future and irreversible damages to the environment have the biggest ignition share in the development of electric vehicle technology.

Alternative energy supply options were evaluated and electricity and biodiesel could be used for light vehicles. Biodiesel fuel, which is produced by converting organic oils such as sunflower, soybean, safflower and canola into fuel by mixing them with alcohol and base, is a renewable and reliable bioenergy source (Eryilmaz, Yesilyurt, Cesur, Gokdogan, 2016). It is formed by mixing these oils with the required alcohol (methanol or ethanol) in the presence of a catalyst and the necessary chemical reactions to produce the final product. In this way, a fuel with less exhaust emission and more environmentally friendly can be produced (Hosseini, Wahid, 2012). As an agricultural country; it is also possible to supply enough biomass for the biofuels in this scenario in Turkey (Oguz, Ogut, Eryilmaz, 2007). This means that this scenario could be implemented quicker since less biomass is required to grow over the coming years.

According to the Turkish Statistical Institute data, 54.1% of the 23,132,670 registered motor vehicles constitutes cars (12509319 units). 4711205 of the cars are diesel, 4710863 are LPG and 3038788 are gasoline. Converting less than 2 tons of petrol or diesel vehicles into an electric one and fuel cell electric vehicles that are powered by hydrogen. Aircraft fuel was not taken into account in this transformation. Here, the same ratio was used in the reference scenario to convert 201 TWh total oil consumption to 70.5 TWh electricity consumption. Turkey’s first domestically produced all-electric car was introduced December 2019 and it's expected to be out on the roads by 2022. According to estimates 3 out of 10 people in Turkey will use electric vehicles by 2030.

3. RESULTS

The transition is divided into 5 steps to help explain the changes that are taking place. For each step, findings are presented separately; the Reference 2050 scenario as the initial point, and moving towards the Electric vehicles for Turkey. For these 5 steps, the aim is to assess the observable effect on the environment and primary energy. The Primary Energy Supply indicator is measured by major fuel type to properly assess the impact on energy. On the other hand, evaluating typically measurements of total yearly carbon

dioxide emissions is to analyze the impact on the environment. These data have been chosen since the ‘optimum’ case can often vary depending on the basic aim, such as maximum green energy or minimum CO₂ emissions.

In the second step, it is planned to obtain the highest level of efficiency from RES and to maximize installed power which is planned to reach 294.8GW for solar power, 63.3GW for wind power, 28.9 for hydropower in 2050.

In the third step, in order to have green buildings that often include measures to reduce energy consumption the heat and cooling demand in buildings is reduced by means of improvements in insulation, windows, and doors. In this study, it is assumed that there will be a 11% reduction in electricity demand compared to the Reference scenario in households and industry by using savings methods as it is mentioned. As expected, this additional heat-saving reduces energy demand, CO₂ emissions, and costs of the energy system.

In the fourth step, nuclear power is removed which reduces the Primary Energy Supply, but it increases the CO₂ emissions. Primary Energy Supply is comparatively less because the assumed efficiency of nuclear power is 35%, which is lower than the efficiency of power plants that replace nuclear power. Consequently, the total energy demand is lower when power plants replace nuclear power. Nuclear power plants generally operate at full capacity hence it cannot offer flexible working arrangements as well. When nuclear power plants are removed from the system, it is possible for intermittent renewables to supply a large share of grid electricity and to decrease foreign dependency in energy demand.

The last step is the implementation of electric vehicles (EVs) in the transport system. In this scenario, 80 % of the fuel used in cars whether petrol, diesel, or even LPG with a weight of less than 2 tons is replaced with electricity. To achieve this transformation, it is presumed that EVs have an efficiency of 200Wh/km, while petrol and diesel vehicles have an average efficiency of 780Wh/km and 600Wh/km respectively. Figure 10 displays the Primary Energy Supply and CO₂ emissions for each technological change steps.

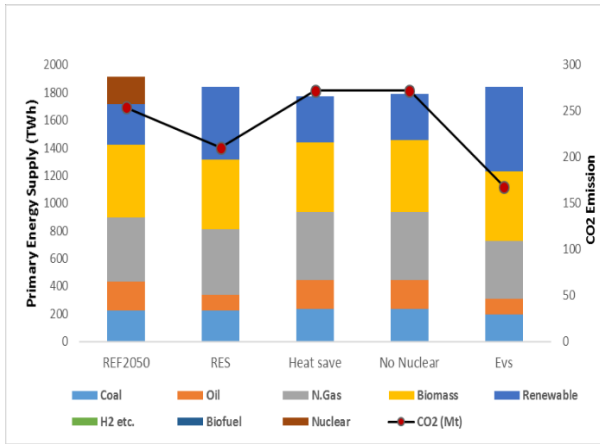


Figure 10. Comparison of the five steps in the transition to sustainable development by primary energy supply and carbon dioxide emissions.

It can be difficult to quantify the demand for electric heating, as it is documented with hot water, rather than as a separate entity. It was estimated that 6% of all domestic electricity is used for space heating and 6% for hot water. Figure 11 shows overall heat production for the residential and tertiary sectors. As seen in the figure, the heat demand half was reduced in the summer months; for hot water use only.

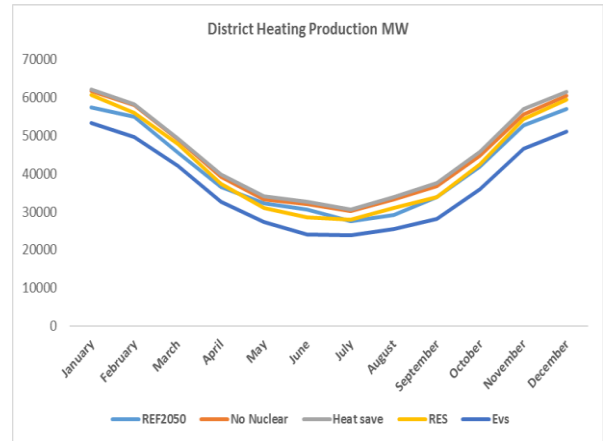


Figure 11. The modelled district heat production distribution in 2050 in MW.

These 5 steps outline a basic pathway to convert the Turkish energy system from traditional fuels to 100% renewable energy. The energy system including the transport sector can also be supplied with renewable potential. The sustainable energy system has been designed which potentially can be maintained by domestic renewable resources mostly wind and solar. The full block model diagram is presented with a Sankey diagram in Figure 12.

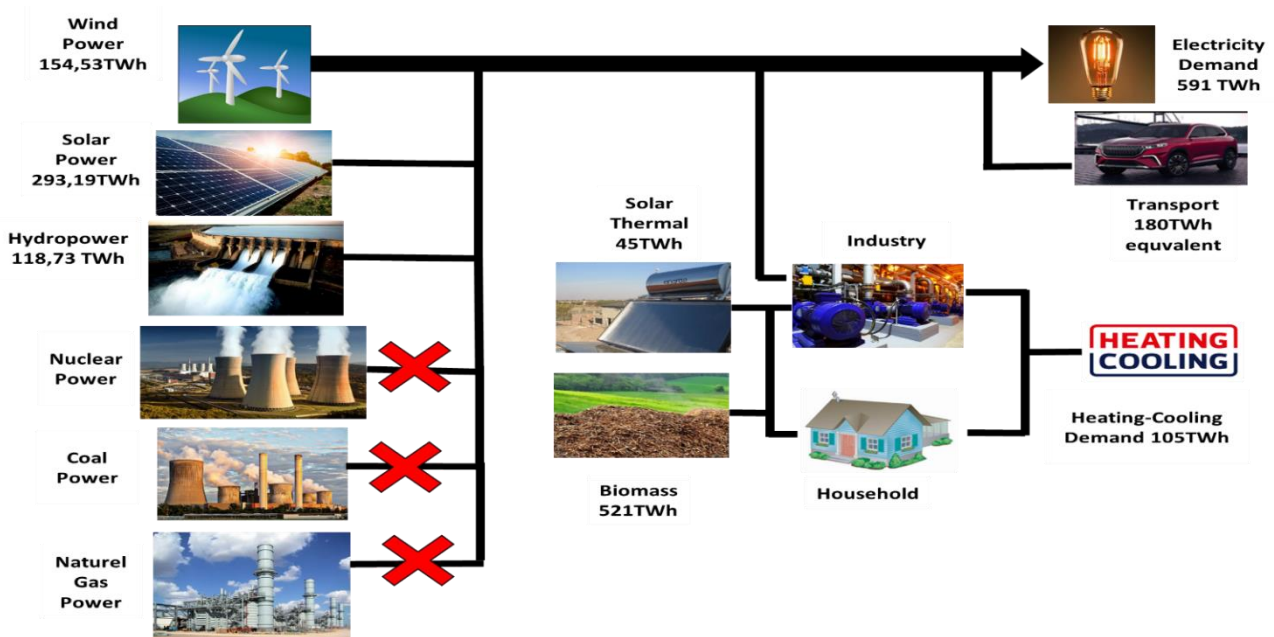


Figure 12. Sankey diagram of the 100% renewable energy system.

4. CONCLUSIONS

This study has presented the possibility of a potential pathway to 100% renewable energy for the Turkish energy system toward 2050. The design methodology is a very complex process. The combination of a creative phase, which includes experienced experts and detailed system

analysis, seems effective and can be recommended. The main technological changes at all stages of required to implement the carbon-free and green energy system scenario are wind energy, hydroelectricity, solar energy, electric vehicles, heat saving, individual heat pumps, district heating. The virtues of that it will be delivered a green power and district heating a cost-effective and last

extend our country will be independent. Many of the technologies are already mature enough that everyone can use them easily and it can be applied today, particularly in the electricity and heat industries.

Transitioning is presented in a series of 5 steps, which the Turkish energy system is converted from primarily fossil fuels resources to 100% renewables means the end of power production from fossil fuel-based power plants. These steps are rigorous processes based on hourly analyses of the complete green energy system, including electricity, heating, cooling, as well as industry, and transport. The corresponding effect is quantified in energy (PES), environment (carbon emissions) for each step. This ambitious undertaking will help the country to reach its final goal of a decarbonized energy system and generating 100 % of its electricity from renewable sources by 2050.

Future aspects

In the future, it is recommended to investigate:

- What is the key to using alternative sources such as solar and wind energy? It is storage - so we can have ready energy when the sun is not rising or when the wind is not blowing.
- Other sectors must also change; the 100% clean renewable energy solution also requires; transport is lacking behind other sectors, needs to step up through comprehensive action and support of other sectors. Transport (electric cars, trucks and trains, air and sea transport) needs clean energy, less energy consumption, and should be more energy-efficient. Experts think that Turkey can replace 40% of road transportation by trains.
- The heating, cooling, and hot water demand conversion into renewables.
- It is necessary to have a smart grid to manage intermittent renewable energy generation and energy storage.
- Whether more energy savings can be made within the industry sector.
- Whether waste incineration can be more efficient and sustainable.

REFERENCES

Agbulut, Ü., Bakir, H. (2019). The investigation on economic and ecological impacts of tendency to electric

vehicles instead of internal combustion engines. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7(1), 25-36.

Akella, A. K., Saini, R. P., Sharma, M. P. (2009). Social, economical and environmental impacts of renewable energy systems. *Renewable Energy*, 34(2), 390-396.

Akpınar, E. (2005). The Place of River Type Power Plants in Turkey Hydroelectric Production. *Erzincan Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi*, 7(2), 1-25.

Atalay, O., Ulu, E. Y. (2018). Hydropower Capacity of Turkey and Actual Investments. *The Eurasia Proceedings of Science Technology Engineering and Mathematics*, (4), 162-166.

Balat, M. (2010). Security of energy supply in Turkey: Challenges and solutions. *Energy Conversion and Management*, 51(10), 1998-2011.

Bemis, G. R., DoAngelis, Michael (1990). Levelized cost of electricity generation technologies. *Contemporary Economic Policy*, 8(3), 200-214.

Blok, K. (2006). Renewable energy policies in the European Union. *Energy policy*, 34(3), 251-255.

Banker, K., Pathak, M. J. M., Pearce, J. M. (2011). A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity. *Renewable and sustainable energy reviews*, 15(9), 4470-4482.

Burch, I., Gilchrist, J. (2018). Survey of global activity to phase out internal combustion engine vehicles. *Center of Climate Protection: Santa Rosa, CA, USA*.

Chilán, J. C. H., Torres, S. G. P., Machuca, B. I. F., Cordova, A. J. T., Pérez, C. A. M., Gamez, M. R. (2018). Social impact of renewable energy sources in the province of Loja. *International journal of physical sciences and engineering*, 2(1), 13-25.

Denmark sources record 47% of power from wind in 2019. *Reuters*. 2020-01-02. Retrieved 2020-04-30

El Bassam, N., Maegaard, P., Schlichting, M. (2013). Distributed renewable energies for off-grid communities: strategies and technologies toward achieving sustainability in energy generation and supply. *Newnes*.

Eryılmaz, T., Yesilyurt, M. K., Cesur, C., Gokdogan, O. (2016). Biodiesel production potential from oil seeds in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 842-851.

- Foley, G. (1992). Renewable energy in third world development assistance Learning from experience. *Energy Policy*, 20(4), 355-364.
- Frondel, M. Ritter, N. Schmidt, C. M. Vance, C. (2010). Economic impacts from the promotion of renewable energy technologies: The German experience. *Energy Policy*, 38(8), 4048-4056.
- González, J. S., Lacal-Arántegui, R. (2016). A review of regulatory framework for wind energy in European Union countries: Current state and expected developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 588-602.
- Gyamfi, S., Derkyi, N. S., Asuamah, E. Y., Aduako, I. J. (2018). *Renewable Energy and Sustainable Development*. In *Sustainable Hydropower in West Africa* (pp. 75-94). Academic Press.
- Hacquard, P. Simoën, M. Hache, E. (2019). Is the oil industry able to support a world that consumes 105 million barrels of oil per day in 2025? *Oil Gas Science and Technology–Revue d'IFP Energies nouvelles*, 74, 88.
- Hagos, D. A., Gebremedhin, A., Zethraeus, B. (2014). Towards a flexible energy system–A case study for Inland Norway. *Applied energy*, 130, 41-50.
- Hosseini, S. E., Wahid, M. A. (2012). Necessity of biodiesel utilization as a source of renewable energy in Malaysia. *Renewable and sustainable energy reviews*, 16(8), 5732-5740.
- <https://www.independent.co.uk/environment/germany-power-grid-pays-customers-christmas-sustainability-renewable-energy-a8141431.html>
- International Energy Outlook 2019 with projections to 2050, September 2019.
- Jeremy B, Independent, Business Insider 04 January 2018
- Kaya, M. N., Celik, Y. Vertical Axis Wind Turbines for Turkey: Overview to Application Opportunities.
- Kaygusuz, K., Kaygusuz, A. (2002). Renewable energy and sustainable development in Turkey. *Renewable Energy*, 25(3), 431-453.
- Kemfert, C. Breyer, C. Oei, P. Y. (Eds.). (2020). *100% Renewable Energy Transition: Pathways and Implementation*. MDPI.
- Kilic, A. M. (2006). Turkey's main energy sources and importance of usage in energy sector. *Energy exploration exploitation*, 24(1-2), 1-17.
- Koo, J., Park, K., Shin, D., Yoon, E. S. (2011). Economic evaluation of renewable energy systems under varying scenarios and its implications to Korea's renewable energy plan. *Applied Energy*, 88(6), 2254-2260.
- Lazard Levelized Cost of Energy Analysis, Nov. 2019 (source: screenshot/ Lazard)
- Leal-Arcas, R., Lasniewska, F., Proedrou, F. (2017). Smart grids in the European Union: Assessing energy security, regulation social and ethical considerations. *Colum. J. Eur. L.*, 24, 291.
- Lund, H. (1999). A green energy plan for Denmark. *Environmental and Resource Economics*, 14(3), 431-440.
- Oguz, H., Ogut, H., Eryilmaz, T. (2007). Investigation of biodiesel production, quality and performance in Turkey. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 29(16), 1529-1535.
- Østergaard, P. A., Mathiesen, B. V., Möller, B., Lund, H. (2010). A renewable energy scenario for Aalborg Municipality based on low-temperature geothermal heat, wind power and biomass. *Energy*, 35(12), 4892-4901.
- Özer, S , Vural, E . (2021). Turboşarjlı Enjeksiyonlu Benzinli Bir Motorda LPG Kullanımının Emisyonlar ve Motor Performansı Açısından İncelenmesi. *Politeknik Dergisi*.
- Pimentel, D., Herz, M., Glickstein, M., Zimmerman, M., Allen, R., Becker, K., Seidel, T. (2002). *Renewable Energy: Current and Potential Issues* Renewable energy technologies could, if developed and implemented, provide nearly 50% of US energy needs; this would require about 17% of US land resources. *Bioscience*, 52(12), 1111-1120.
- Ragheb, M. (2017). Economics of wind power generation. In *Wind Energy Engineering* (pp. 537-555). Academic Press.
- Sørensen, B. (1975). *Energy and Resources: A plan is outlined according to which solar and wind energy would supply Denmark's needs by the year 2050*. *Science*, 189(4199), 255-260.
- Stolic, N., Pesic, B., Milosevic, B., Spasic, Z., Lazic, M. (2018). Possibilities of applying biomass for the purposes of energy production and environmental

protection. Journal of Agricultural, Food and Environmental Sciences, JAFES, 72(1), 152-156.

Šúri, M., Huld, T. A., Dunlop, E. D., Ossenbrink, H. A. (2007). Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries. Solar energy, 81(10), 1295-1305.

The Energy Sector. November 11, 2011.

“Theguardian”, Arthur Neslen 10 July 2015, <https://www.theguardian.com/environment/2015/jul/10/denmark-wind-windfarm-power-exceed-electricity-demand>

Tmmob makina mühendisleri odası peport, MMO/691 ISBN: 978-605-01-1198-9

Topallı, N., Alagöz, M. (2014). Energy consumption and economic growth in Turkey: An empirical analysis. Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, (32), 151-159.

Uslu, T. (2008). Turkey's foreign dependence on energy. Energy Sources, Part B, 3(2), 113-120.

Vera, I., Langlois, L. (2007). Energy indicators for sustainable development. Energy, 32(6), 875-882.

Westbrook, M. H., Westbrook, M. (2001). The Electric Car: Development and future of battery, hybrid and fuel-cell cars (No. 38). Iet.

Yıldız, T. (2010). Turkey's energy economy and future energy vision. Turkish Policy Quarterly, 9 (2), 16.

2019 The World Bank, Source: Global Solar Atlas 2.0, Solar resource data: Solargis.

Giden Konteynerler İçin Depolama Yeri Belirleme Probleminin Çözümü İçin Yeni Bir Sezgisel Yöntem

Ercan ŞENYİĞİT¹ , Ahmet ARTUT² , Selçuk MUTLU³ , Uğur ATICI⁴ 

¹Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Talas, Kayseri, 38039, Türkiye

²Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Gürün Meslek Yüksekokulu, Bilgisayar Teknolojileri, Gürün, Sivas, 58800, Türkiye

³Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Talas, Kayseri, 38039, Türkiye

⁴Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kampüs, Kayseri, 58140, Türkiye

Araştırma Makalesi, Geliş Tarihi: 07.11.2020, Kabul Tarihi: 23.11.2020

Özet

Teknolojik gelişmeler ve talep artışı limanlarda yapılan konteyner taşımacılığı miktarını artırmıştır. Bu artış limanların etkin yönetiminin önemini belirginleştirmiştir. Taşınan ürünlerin limanlarda uygun bir plana göre geçici veya kalıcı olarak depolama yeri belirleme bütün sürecin sağlıklı bir şekilde işleyebilmesi açısından hayati bir öneme sahiptir. Çalışmamızda, bu problemin çözümü için yeni bir sezgisel yöntem geliştirilmiş ve çalışma içerisinde açıklanmıştır ve rastgele oluşturulan çözümler ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada ele alınan problemde performans, konteynerlerin toplanmasında konteynerlerin yer değiştirme (elleçleme) sayısı ile ölçülür. Yer değiştirme sayısının az veya hiç olmaması istenir. Yöntemin yer değiştirme sayısı ne kadar az ise performansı o kadar iyidir. Çalışmada, 3 farklı depolama alanı hacmi dikkate alınmıştır. Bunlar sırasıyla, 24, 48 ve 80 birim konteyner depolama alanı hacimleridir. Her bir depolama alanı hacmi kendi içerisinde 3 farklı gelen konteyner sayısında incelenmiştir. 24 birim konteyner hacme sahip depolama alanında sırasıyla 10, 18 ve 24 adet gelen konteyner vardır. 48 birim konteyner hacme sahip depolama alanında sırasıyla 20, 36 ve 48 adet gelen konteyner vardır. Son olarak 80 birim konteyner hacme sahip depolama alanında sırasıyla 40, 60 ve 80 adet gelen konteyner vardır. Böylece 9 farklı grup veri incelenmiştir ve her grupta 50 tekrar yapılmıştır. Toplam 450 farklı deney yapılmış ve 450 farklı sonuç elde edilmiştir. Önerilen sezgisel yöntem 450 deney verisinin 255'inde (%56,67) 0 yer değiştirme ile optimum sonuç bulmuştur. Geri kalan 195 deney verisinde minimum 1, maksimum 40 yer değiştirme gerçekleşmiştir. Önerilen sezgisel yöntem, 450 deney verisini toplam 1725 yer değiştirme ile çözmüştür. Rastgele çözümde ise 450 deneyde toplam 16622 adet yer değiştirme ile çözüm elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Deniz yolu taşımacılığı, Konteyner taşımacılığı, Depolama yeri belirleme problemi, Sezgisel yöntem.

A New Heuristic Method for Solving The Storage Location Problem for Outbound Containers

Abstract

Technological developments and the increase in demand have increased the amount of container transportation in ports. This increase has highlighted the importance of effective management of ports. Determining the temporary or permanent storage location of the transported products in the ports according to an appropriate plan is of vital importance in terms of the healthy functioning of the whole process. In our study, a new heuristic method was developed for the solution of this problem and explained in the study and compared with randomly generated solutions. In the problem addressed in the study, performance is measured by the number of displacement (handling) of the containers in the collection of the containers. It is desired that the number of displacements is low or not at all. The smaller the number of displacements of the method, the better its performance. In the study, 3 different storage space

¹Sorumlu yazar senyigit@erciyes.edu.tr, ²aartut@cumhuriyet.edu.tr, ³selcukmutlu@gmail.com, ⁴uatici@cumhuriyet.edu.tr

volumes were taken into account. These are 24 (small), 48 (medium) and 80 (large) unit container storage volumes, respectively. Each storage area has been analyzed in 3 different incoming containers. In the storage area with 24 unit container volume, there are 10, 18 and 24 incoming containers, respectively. In the storage area with 48 unit container volume, there are 20, 36 and 48 incoming containers. Finally, there are 40, 60 and 80 incoming containers, respectively, in the storage area with a volume of 80 units. Thus, 9 different groups of data were examined and 50 repetitions were made in each group. A total of 450 different experiments were conducted and 450 different results were obtained. The proposed heuristic method has found optimum results with 0 displacement in 255 (56.67%) of the 450 experimental data. In the remaining 195 experimental data, a minimum of 1, a maximum of 40 displacements occurred. The proposed heuristic method solved 450 experimental data with a total of 1725 displacements. In the random solution, a solution was obtained with a total of 16622 displacements in 450 experiments.

Keywords: Seaway transport, Container transportation, Storage location problem, Heuristic method.

1. GİRİŞ

Çok uluslu şirket sayısında küresel artış uluslararası ticaret talebinin artmasına neden olmuştur. Artan bu talep dolayısıyla karadan veya deniz yolu ile taşımacılığın önemi artmıştır. Özellikle deniz yolu taşımacılığı, üretilen ürünlerin taşınması ve lojistik faaliyetleri gibi tedarik zinciri yönetiminde önemli bir yere sahiptir. Deniz yolu taşımacılığının önemli bir kısmını konteyner taşımacılığı oluşturmaktadır. Birim yük konseptinin önemli bir parçası olan konteyner, uluslararası deniz taşımacılığı ürünlerin taşınmasında şüphesiz önem kazanmıştır. Konteynerler, deniz ve kara taşıyıcılarının varış sürelerindeki farklılıkları hesaba katarak geçici olarak depolanır. Depolama alanı, liman konteyner terminallerinde kritik bir kaynaktır. Giden konteynerler için depolama konumu ataması konteyner taşımacılığının verimliliğinin geliştirilmesi ve bir geminin etrafta dolaşma süresinin azaltılması açısından önemlidir. Bir konteyner terminalinde üç farklı tipte konteyner bulunur. Gelen (inbound), giden (outbound) ve aktarma (transshipment) konteynerleridir (Chen ve Lu, 2012; Reyes vd., 2019; Liu, 2020; Maglić vd., 2020). Genellikle yurtdışından ithal olan gelen konteynerler, gemi (vessel) rıhtıma (berth) geldiğinde kısa bir süre içinde bir gemiden boşaltılır ve dış kamyonlara aktarılanaya kadar 1 ila 10 gün boyunca konteyner tersanesinde (yard) kalırlar. Giden konteynerler tahmin edilebilir şekilde ayrılır, ancak rastgele bir sırayla gelirler. Giden konteynerler kısa sürede gemiye yüklenir. Genellikle bunlar diğer ülkelere giden ihracat konteynerleridir. Aktarma konteynerleri bir gemiden boşaltılır, birkaç gün tersanede kalır ve başka bir gemiye yüklenir. Aktarma konteynerleri için alan tahsisi, giden konteynerlere benzer şekilde yapılabilir. Konteyner terminallerinde, giden konteynerlerin yükleme sırası, liman konteyneri terminalindeki gemi operasyonunun verimliliğini önemli ölçüde

etkiler (Chen ve Lu, 2012). Konteynerleri sıralarken, yük planlayıcıları genellikle rıhtım vinçlerinin ve tersane ekipmanlarının taşıma çabalarını en aza indirmeye, geminin stabilitesini korumaya ve istifteki her bir yuvaya (slot) yüklenecek konteynerin varış yeri ve boyutuna göre belirlenen yükleme gereksinimlerini karşılamaya çalışır. Etkin bir yük dizisine sahip olmak için, giden konteynerler en uygun yere yerleştirilmelidir. Giden konteynerlerin geliş sırası rastgele olduğu için bunların en az yer değiştirme ile gemiye yüklenmeleri zor bir problemdir (Reyes vd., 2019; Liu, 2020). Bu makalenin ana odağı, giden konteynerler için depolama alanlarının önceden tahsis edilmesi amacıyla bir yükleme yöntemi önermek, böylece yükleme işleminde maksimum verim elde etmektir. Yer değiştirme sayısı ile maliyet arasında doğrudan bir ilişki vardır. Ne kadar az yer değiştirme olursa toplam maliyet o kadar az olmaktadır. Bu nedenle bu çalışma maliyet yerine yer değiştirme sayısının azaltılmasına odaklanılmıştır. Proje önerisinde dikkate alınan problem NP-zor olduğu ve sezgisel yöntemin performansını test etmede çok sayıda test problemi dikkate alınacağı için bu problemin çözümünde sezgisel yöntem kullanılacaktır (Sivrikaya, 2013).

Bir konteyner terminalinden geçen bir konteyner kaynaklanan maliyet, toplam konteyner taşıma maliyetinin yaklaşık üçte birini oluşturur (Kim, 2016). Bundan dolayı, müşteri taleplerinin karşılanmasını ve maliyetlerin azaltılmasını sağlamak için bir konteyner terminalinin operasyonel maliyetlerinin azaltılma arayışları vardır. Bu iyileştirme konteyner terminalindeki konteyner yer değiştirme sayısının en aza indirilmesi ile sağlanabilir. Bu çalışmanın literatüre sağlayacağı katkıları açıklamak gerekirse bu son eğilimleri yansıtan bu çalışma, bir konteyner terminalinin operasyonel verimliliğini artırmak dolayısıyla maliyetleri azaltmak için konteyner yer

değiştirme probleminin çözümüne yönelik daha iyi performans sağlayan yeni bir sezgisel yöntem sunmayı amaçlamaktadır.

2. LİTERATÜR İNCELEMESİ

Çalışmamızın konusu olan depolama yeri belirleme problemi diğer adıyla konteyner yer değiştirme problemi literatürde çalışılmış bir problemdir (Reyes vd., 2019; Liu, 2020; Maglić vd. 2020; Sivrikaya, 2013; Kim, 2016). Bu ana problemin çalışmamızda ele aldığımız bir alt problemi olan giden konteynerler için depolama yeri belirleme problemi nispeten az çalışılmış bir problemdir. Makalemizde giden konteynerler için depolama yeri belirleme problemine odaklanılmış bu konudaki literatür incelenmiştir.

Bu konuyla ilgili ilk çalışma Taleb-Ibrahimi ve arkadaşları tarafından 1993 yılında yapılan çalışmadır. Bu çalışmada, statik ve dinamik olmak üzere iki farklı taşıma ve depolama stratejisi ele alınmıştır. Ayrıca, çeşitli gemiler için kalıcı alanda yer ayırmak için en iyi zamanları belirlemek amacıyla bir operasyon prosedürü ve sezgisel algoritma sunulmuştur (Taleb-Ibrahimi vd., 1993). Preston ve Kozan (2001) giden konteynerlerin depolanma şeklini belirlemek için genetik algoritma tekniğini kullanmıştır. Bir konteynerin terminalde önceden atanmış bir depolama alanına sahip olduğu çalışmada varsayılır ve bununla birlikte giden konteynerlerin rastgele gelişi göz ardı edilmiştir. Kim ve arkadaşları (2000), yükleme işlemleri sırasında konteynerlerin yer değiştirme sayısını azaltmak için önceden belirlenmiş tersane koyuna giden bir konteynerin depolama yerini belirleyerek tek tek konteynerin konumlandırılması aşamasına odaklanmıştır. Problemi çözmek için dinamik programlama yöntemi kullanılmıştır. Ancak, giden konteynerler için bir tersane koyunun nasıl seçileceği her iki aşamada ele alınmamıştır. Ayrıca, konteynerlerin varış yeri bilgileri dikkate alınmamıştır. Kim ve Park (2003) çalışmalarında ilgili konteynerlerin yerleştirme aşaması ve boşluk yerleştirme aşaması olmak üzere giden konteynerler için depolama yerlerini belirleme sürecini iki aşamaya ayırmıştır. Yazarlar, ilk aşamada yer tahsisi problemini çözmek için karma tam sayılı matematiksel model geliştirmişlerdir. Chen ve Lu çalışmalarında literatür incelemesinden, giden konteynerler için depolama yeri atama problemi hakkında kapsamlı bir çalışma olmadığını belirtmişlerdir. Çalışmalarında bir liman terminalindeki giden konteynerlerin depolama yerini belirlemek için sistematik bir yaklaşım önermişlerdir. Çalışmada problem iki aşamada çözülmüştür. İlk aşamada tersane

koyuları ve farklı gemiler için sınırlandırılmış konteynerlere tahsis edilecek her bir tersane koyundaki yerlerin miktarı belirlenir. Her bir konteyner için kesin depolama yeri ikinci aşamada belirlenir. Yazarlar, birinci aşamadaki problem karma tam sayılı matematiksel model ile çözerken, ikinci aşamadaki problemi çözmek için bir hibrit dizi istifleme algoritmasını sunmuşlardır. Deney sonuçları, önerilen yaklaşımın giden konteynerler için depolama yeri atama probleminin çözümünde etkili ve verimli olduğunu göstermektedir (Chen ve Lu, 2012). Le ve Yu (2013) terminale rastgele giren giden konteynerler için bir rastgele hibrit istifleme algoritmasını sunmuşlardır. Algoritmanın ilk aşamasında, bloklar arasındaki dağılım kullanım oranına göre analiz edilmiştir. İkinci aşamada ise koy konfigürasyonunun optimizasyonu hibrit genetik algoritma kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Hu ve arkadaşları (2014) çalışmalarında giden konteynerlerin, konteyner tersanesindeki depolama yeri belirleme probleminin genellikle iki ardışık aşama ile tersane-koy atama probleminin ve alan tahsisi probleminin çözümü ile optimize edilebildiği, fakat global optimal çözüm elde edilemediğini belirtmişlerdir. Bu çalışmada, çözüm için tersane-koy atama problemi ve alan tahsisi problemlerini entegre bir optimizasyon süreci olarak kullanan, bir dış-ıç hücrel otomat algoritması önerilmiştir. Zhang ve arkadaşları (2014) konteyner terminalindeki giden konteynerlerin depolama yerlerini incelemektedir. Daha önce literatürde sunulmuş olan modeli geliştirmişlerdir. Çalışmada iki farklı yeni depolama yeri belirleme algoritması sunulmuştur. Önerilen iki algoritmanın, orijinal iyimser modelden daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir. Zhang ve arkadaşlarının (2014) yapmış oldukları diğer çalışmada konteyner alma aşamasında gelen konteynerlerin konum atamalarını incelemişlerdir. Problem için literatür, bir ağırlık grubu üzerindeki geri kalan konteynerlerin oranının, konteynerlerin alma işlemi boyunca değişmeden kaldığını varsaymıştır. Bu varsayım uygulama ile tutarsızdır. Çünkü bir ağırlık grubu üzerindeki geri kalan konteynerlerin oranı daha önce alınmış olan konteynerlere göre sürekli olarak ayarlanmalıdır. Bu nedenle, yazarlar, iki yeni dinamik programlama modeline yol açan iki farklı elleçleme yöntemi önermişlerdir. Bu iki model, var olan küçük ölçekli örneklerdeki modelle karşılaştırılır. Çalışmada büyük ölçekli örnekler için iki aşamalı bir sezgisel yöntem önerilmiştir. Woo vd. (2016) çalışmalarında giden konteynerlerin depolanması için depolama fiyatı çizelgeleme problemini ele almışlardır. Çalışmada fiyat çizelgesinin iki unsurdan oluştuğu bunlarında ücretsiz

zaman ve ücretli zamanı aşan durumdan oluştuğu belirtilmiştir. Ücretsiz zaman, bir konteynerin bahçede ücretsiz olarak kalabileceği maksimum süredir. Ücretli zaman da ücretsiz zamandan daha fazla süre depolanan konteynerlerin ücret ödediği zamandır. Matematiksel modeller, optimum depolama fiyatı zamanlamasını, terminalin toplam kârı en üst düzeye çıkarılacak veya toplam sistemin maliyeti en aza indirilecek şekilde belirlemek için yazarlar tarafından geliştirilmiştir. Guerra-Olivares ve arkadaşları (2015) çalışmalarında konteyner taşıma ekipmanı olarak istifleme araçlarını kullanan konteyner yer değiştirme problemi için gerçek zamanlı bir sezgisel yöntem sunmuşlardır. Yazarlar çalışmalarında önerdikleri sezgisel yöntemin, yakın yerlerdeki koy istifinde iyi yer değiştirme koordinatları aradığını belirtmişlerdir. Yer değiştirme hareketlerin ve araçla seyahat mesafesinin azaltılmasının dengelenmesine çalışılmış ve daha sonra sezgisel yöntemin performansı Şili ve Meksika'daki daha küçük konteyner terminallerindeki genel bir uygulama ile karşılaştırılmıştır. Zao ve arkadaşları (2015) otomatik konteyner terminallerinde giden konteynerlerin depolama tahsisi problemi için simülasyon tabanlı bir optimizasyon yöntemi önermişlerdir. Yazarlar çalışmalarında depolama planlarında rıhtım vinçlerinin bekleme süresini değerlendirmek için kullanılan Zamanlı-Renkli-Petri-Net içeren bir simülasyon modeli oluşturmuşlardır. Bu simülasyon tabanlı optimizasyon yöntemini oluşturmak için Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO) ve Genetik Algoritma (GA) temelli iki optimizasyon yaklaşımı çalışmada önerilmiştir. Bu önerilen yöntemin etkinliği, iki optimizasyon yaklaşımının karşılaştırılması ile doğrulanmıştır.

Zhang ve arkadaşları (2015) yükleme işlemleri sırasında konteynerlerin yeniden yer değiştirmesini azaltmak için terminallerdeki giden konteynerlerin konum atamalarını incelemişlerdir. Literatürdeki çalışmalar, pratikte doğru olmayan her bir ağırlık grubu için konteynere ulaşma olasılığının, tüm alma işlemi boyunca değişmediğini varsaymaktadır. Bu çalışma, henüz terminale ulaşmayan kalan konteynerlerin ulaşma olasılıklarını incelemiştir. Daha sonra çalışmada ele alınan problem için kısıtlanmış bir dinamik programlama modeli yazarlar tarafından sunulmuştur.

Woo ve arkadaşları (2016) çalışmalarında giden konteynerlerin depolanması için depolama fiyatı çizelgeleme problemini ele almışlardır. Çalışmada fiyat çizelgesinin iki unsurdan oluştuğu bunlarında ücretsiz zaman ve ücretli zamanı aşan durumdan oluştuğu

belirtilmiştir. Ücretsiz zaman, bir konteynerin bahçede ücretsiz olarak kalabileceği maksimum süredir. Ücretli zaman da ücretsiz zamandan daha fazla süre depolanan konteynerlerin ücret ödediği zamandır. Matematiksel modeller, optimum depolama fiyatı zamanlamasını, terminalin toplam kârı en üst düzeye çıkarılacak veya toplam sistemin maliyeti en aza indirilecek şekilde belirlemek için yazarlar tarafından geliştirilmiştir. Guerra-Olivares ve arkadaşları (2018) çalışmalarında konteyner elleçleme ekipmanı olarak erişim istifleme araçların kullanıldığı konteyner alan tahsisi problemi için sezgisel bir prosedür sunmaktadır. Literatürde sunulmuş prosedürler, kauçuk tekerlekli portal vinçler için geçerlidir. Bu nedenle, yazarlar çalışmalarını Latin Amerika gibi gelişmekte olan ülkelerde küçük veya orta ölçekli limanların yaygın olarak kullandığı, istifleme araçları kullanan liman terminalleri vakaları ile genişletmişlerdir. Ayrıca, literatürde yakın zamanda sunulmuş bir prosedürü geliştirmişlerdir. Bu çalışmanın literatüre katkısı, limana varış sırası verildiğinde bir grup konteyneri yüklemek için gereken konteyner yer değiştirme sayısının alt sınırını hesaplayan matematiksel modeli sunmuş olmasıdır. He ve arkadaşları (2019) giden konteyner depolama yeri belirleme problemini ele almışlardır. Yazarlar problemi yürüyen işlemlerin kolaylaştırılabilmesi için bir dizi giden konteynerin belirli atama kurallarına göre tersanede nasıl istiflenmesi gerektiği olarak tanımlanabileceğini belirtmişlerdir. Bu problemin çözülmesi zor bir problem olduğunu belirtmişler ve problemin çözümü için yeni bir parçacık sürüsü optimizasyonu yöntemi sunmuşlardır. Çalışmalar sonucunda önerilen algoritmanın problemin çözümünde anlamlı bir performans elde ettiğini göstermişlerdir. Şenyiğit ve Arsav (2019) giden konteynerlerin istiflenmesinde operasyonel karar verme problemine odaklanmışlar ve katman kaydırma yaklaşımı ile hibrit dizi istifleme algoritmasını ele alınan problemde kullanmışlardır. Şenyiğit ve Arsav (2019) bir deniz istasyonunda dışarı giden konteynerler için depolama konumu atama problemini ve bu problemin çözümü için kullanılan hibrit dizi istifleme algoritmasını sayısal bir örnek ile çalışmalarında açıklamışlardır. Reyes ve arkadaşları çalışmalarında [2] depolama yeri atama problemi için bir derleme çalışması yapmışlardır. Çalışmalarında 2005 ve 2017 yılları arasında yapılan konu ile ilgili çalışmalar dikkate alınmıştır (Reyes vd., 2019).

3. ANALİZ METODU

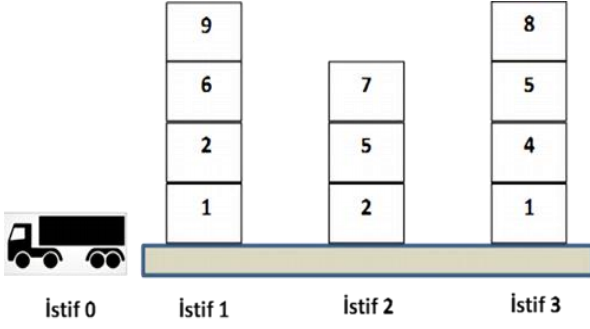
Konteyner depolama yeri belirleme problemi, liman sahasında istiflenmiş ve istiften alınış sırası bilinen belirli sayıda konteyner içeren tek bir konteyner sırasının tamamen boşaltılması için yapılacak yer değiştirme sayısının en aza indirilmesi ile ilgilenen bir problemdir. Bu problem konteyner yer değiştirme problemi olarak da adlandırılmaktadır. Bu problem bir gerçek zamanlı karar verme problemidir (Chen ve Lu, 2012). Gelen konteynerler için depolama yeri belirleme problemi, konteyner yer değiştirme verimliliğini artırmak ve bir geminin geri dönüş süresini azaltmak için önemlidir. Bir konteyner terminalindeki ana görev, belirli bir siparişe göre konteynerleri nakliye için bir konteyner kamyonuna yüklemek amacıyla tersaneden konteyner almak ve aktarmaktır. Bir konteyner terminali, her biri birçok konteyner yığını barındıran koylara ayrılmıştır. Bu çalışmada, Chen ve Lu'un 2012 yılında yapmış oldukları çalışmada olduğu gibi konteynerlerin ağırlıklarına göre 9 farklı gruba ayrıldığı kabul edilmiştir. Konteyner ağırlık numarası arttıkça konteyner ağırlığının arttığı kabul edilmektedir. Konteynerlerin ağırlıklarına göre gruplandırılmasındaki amaç yükleme işlemlerinin verimliliğini artırmaktır. Depolama alanı içinde konteynerler istifler halinde depolanır. Bir tersaneden konteyner almak için en ideal durum, her bir yığının üstündeki (ağır) konteyneri öncelikli olarak almaktır (Chen ve Lu, 2012). Konteynerler istifleme alanına geliş sırasına göre dizilirler. Gelen konteynerler bittiğinde, bu konteynerler en ağırdan başlayarak toplanırlar. Bu toplama sırasında hafif konteyner yukarıda ağır konteyner aşağıda yerleştirilirse, ağır konteynerin alınması için hafif konteyner kaldırılır bu işleme yer değiştirme (elleçleme) denir. Olası yer değiştirmeleri engellemek için hangi yığının seçilmesi gerektiğini önceden planlamak önemlidir. Çünkü plansız konteyner yerleştirme daha sonra yeniden yer değiştirmeye neden olabilir. Konteyner hareketlerinin toplam sayısını azaltmak vincin çalışma süresini azaltır. Konteyner yer değiştirme problemi, liman sahasında istiflenmiş ve istiften alınış sırası bilinen belirli sayıda konteyner içeren tek bir konteyner sırasının tamamen boşaltılması için yapılacak yer değiştirme sayısının en aza indirilmesi ile ilgilenen bir problemdir. Şekil-1 de konteynerlerin tersaneden alınma görüntüsü gösterilmiştir. Şekil-2 de ise bir tersane koyuna rastgele gelen konteynerlerin istiflenmesi gösterilmiştir.



Şekil 1. Konteynerlerin tersaneden alınma görüntüsü

Bir konteynerin alınması ve toplanması aşağıdaki varsayımlara göre yapılır. Limanda giden konteynerlerin işlem görmesi için gerekli ve yeterli kaynakların olduğu kabul edilmiştir. Gemilerin rıhtım tahsisinin bilindiği varsayılmaktadır. Gelen konteynerlerin standart olduğu kabul edilmiştir. Aynı koya yerleştirilen konteynerlerin aynı varış noktasına gidecekleri varsayılmıştır. Konteynerler limana rastgele sayı ve sırada gelmektedirler. Konteynerlerin taşınmasında vinçler ve/veya kamyonlar kullanılır. Bir vinç sadece her istifin üstünde bulunan konteyneri kaldırabilir. Bir istifin yüksekliği belirli sayıda konteyner yüksekliği ile sınırlıdır. Her istif, belirli sayıdaki konteynerlerin sırasından ve belirli sayıda konteyner yüksekliğinde koylardan oluşur. Konteynerlerin ağırlıklarına göre 9 farklı gruba ayrıldığı kabul edilmiştir. Konteyner ağırlık numarası arttıkça konteyner ağırlığının arttığı kabul edilmektedir. Belli bir tersane koyunda, daha ağır konteynerlerin (konteyner numarası büyük olanların) daha hafif konteynerlerden (konteyner numarası büyük olanların) önce yükleneceği varsayılmaktadır. Giden konteynerler için depolama yerinin belirlenmesi, yükleme işlemlerinin verimliliğinin artırılmasında çok önemli olduğu için bu çalışma ile yeni bir sezgisel yöntem önerilmiştir.

Önerilen sezgisel yöntemi anlatabilmek için sayısal bir örnek verilmiştir. Bu örnek için tersane koyunun 6 sırasının ve her sıranın da 4 konteyner yüksekliğinin olduğu kabul edilmiştir. Aynı varış yerine gönderilmesi gereken rastgele geliş sırası oluşturulmuş 24 adet giden konteyner bulunmaktadır. Rakamların konteynerlerin ağırlıklarını gösterdiği bu konteynerlerin geliş sırası 6, 8, 7, 7, 2, 8, 6, 4, 9, 5, 7, 4, 4, 1, 5, 9, 8, 3, 8, 3, 8, 9, 7, 3 şeklindedir.



Şekil 2. Bir tersane koyuna rastgele gelen konteynerlerin istiflenmesinin gösterilmesi

Önerilen sezgisel yöntemin sayısal örnek için çözümü şekil-3'te gösterilmiştir. Şekil 3 incelendiğinde her bir hücrede A(B)-C şeklinde bir gösterim vardır. Bu gösterimde A simgesi konteynerin ağırlık numarasını (1-9) göstermektedir. B simgesi ise tersane koyunda istiflenmiş konteynerlerin koya geliş sırasını (1-24) göstermektedir. C simgesi ise tersane koyunda istiflenmiş konteynerlerin toplanma sırasını (1-24) göstermektedir. Örneğin sağ üst köşede yer alan 3(24)-20 hücresi bu hücreye yerleştirilen konteynerin ağırlığının 3, geliş sırasının 24 toplanma sırasının da 20 olduğunu göstermektedir. Böylece önerilen sezgisel yöntem problemi, 0 yer değiştirme ile optimum şekilde çözmüştür. Örneğin en son gelen konteynerin ağırlık numarası 2 olsaydı, 3 nolu konteynerler toplanırken iki kez bu konteyner kaldırılacak ve 2 yer değiştirme ile önerilen sezgisel yöntem sonuç verecekti. Bu duruma göre önerilen sezgisel yöntemin çözümü şekil-4'te gösterilmiştir.

9(9)-1	9(16)-2	8(21)-6	9(22)-3	7(23)-9	3(24)-20
8(6)-4	7(11)-10	8(19)-7	5(15)-15	4(13)-18	3(20)-21
8(2)-5	7(4)-11	8(17)-8	5(10)-16	4(12)-19	3(18)-22
6(1)-13	7(3)-12	6(7)-14	4(8)-17	2(5)-23	1(14)-24

Şekil 3. Önerilen sezgisel yöntemin sayısal örnek için çözümünün gösterilmesi

9(9)-1	9(16)-2	8(21)-6	9(22)-3	7(23)-9	2(24)-23
8(6)-4	7(11)-10	8(19)-7	5(15)-15	4(13)-18	3(20)-20
8(2)-5	7(4)-11	8(17)-8	5(10)-16	4(12)-19	3(18)-21
6(1)-13	7(3)-12	6(7)-14	4(8)-17	2(5)-22	1(14)-24

Şekil 4. Önerilen sezgisel yöntemin yer değiştirme olan sayısal örnek için çözümünün gösterilmesi

Önerilen sezgisel yöntemin sahte kodu aşağıdaki gibidir.

Begin

Programda kullanılacak değişkenler oluşturulur.

if (Gelen ağırlık değeri <= Depolama alanında maksimum ağırlık sınıflandırma değerleri)

{

for ()

{Gelen ağırlık değerinin depolama alanındaki yeri kontrol edilip yer varsa konteyner elleçleme yapılmadan yerleştirilir.}

if (Gelen konteyner kendi alanına yerleştirilemediyse)

{Gelen konteyner ağırlık değerinden daha ağır konteynerlerin yerleştirme yerlerinin ilk sırası kontrol ediliyor yer var ise yerleştirilir.}

if (Gelen konteyner yerleştirilemediyse)

{ Gelen konteyner ağırlık değerinden daha küçük ağırlık değerine sahip yerleştirme alanları kontrol edilip elleçleme yapılmadan konteyner yerleştirilir.}

if (Gelen konteyner yerleştirilemediyse)

{ Gelen konteyner ağırlık değerinden daha ağır konteynerlerin yerleştirme yerlerinin tamamı kontrol edilerek elleçleme yapılmadan konteyner yerleştirilir.}

if (Gelen konteyner yerleştirilemediyse)

{ depolama alanında maksimum ağırlık sınıflandırma değerinden başlayarak en az elleçleme yeri aranır ve konteyner yerleştirildikten sonra elleçleme değeri elleçleme değeri kadar artırılır.}

}

if (Gelen ağırlık değeri > Depolama alanında maksimum ağırlık sınıflandırma değerleri)

{

for ()

{ depolama alanında maksimum ağırlık sınıflandırma değerinden başlayarak arama yapılır ve elleçleme yapılmadan gelen konteyner yerleştirilir. }

if (Gelen konteyner yerleştirilemediyse)

{depolama alanında maksimum ağırlık sınıflandırma değerinden başlayarak en az elleçleme yeri aranır ve konteyner yerleştirildikten sonra elleçleme değeri yapılan elleçleme değeri kadar artırılır. }

}

End

4. ANALİZ

Bu bölümde önerilen sezgisel yöntem kullanılarak çözülen 450 örnekten elde edilen önerilen sezgisel yöntemin sonuçları ve rastgele sonuçlar gösterilmektedir. Sonuçlar tablolarda gösterilmiştir. Bu tablolarda önerilen sezgisel yöntemin sonuçları H sütununda, rastgele çözümlerle elde edilen sonuçlar R sütununda, her bir tekrar No sütununda ve 1'den 80'e kadar sayılar da giden konteyner sayılarını göstermektedir. Giden konteynerler için depolama yeri belirleme probleminde performansı etkileyen faktörler vardır. Bunlardan ilki giden konteyner sayısıdır (GKS). İkinci faktör bu konteynerlerin yerleştirileceği depolama alanıdır (DA). Bu hacim konteyner sayısı ile ölçülür.

Tablo 1'de GKS=10 ve DA=24 olduğu grupta elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Tablo 1 incelendiğinde önerilen sezgisel yöntemin oluşturulan 50 örnekleme 0 tekrarda çözdüğü fakat rastgele çözümde ise 87 adet tekrar olduğu belirlenmiştir. Rastgele çözümde en büyük tekrar sayısının 4 adet olduğu belirlenmiştir. Önerilen sezgisel yöntem 50 örneklemin hepsini optimum çözüm ile bulurken rastgele çözüm ise sadece 9 tanesinde optimum çözüm bulmuştur.

Tablo 2'de GKS=18 ve DA=24 olduğu grupta elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Tablo 2 incelendiğinde önerilen sezgisel yöntemin oluşturulan 50 örnekleme toplam 12 tekrarda çözdüğü fakat rastgele çözümde ise 419 adet tekrar olduğu belirlenmiştir. Önerilen sezgisel yöntem 50 örneklemin 41 tanesini sıfır tekrar ile optimum sonuç ile çözerken rastgele çözümde hiç optimum çözüme rastlanılmamıştır. Önerilen sezgisel yöntemin çözümlerinde en büyük tekrar sayısı 2'dir. Rastgele çözümde en büyük tekrar sayısı ise 12 adet olduğu belirlenmiştir. Rastgele çözümde en küçük tekrar sayısı ise 4 adet olduğu belirlenmiştir.

Tablo 3'te GKS=24 ve DA=24 olduğu grupta elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Tablo 3 incelendiğinde önerilen sezgisel yöntemin oluşturulan 50 örnekleme toplam 200 tekrarda çözdüğü fakat rastgele çözümde ise 805 adet tekrar olduğu belirlenmiştir. Önerilen sezgisel yöntem 50 örneklemin 5 tanesini sıfır tekrar ile optimum sonuç ile çözerken rastgele çözümde hiç optimum çözüme rastlanılmamıştır. Önerilen sezgisel yöntemin çözümlerinde en büyük tekrar sayısı 9'dur. Rastgele çözümde en büyük tekrar sayısı ise 23 adet olduğu belirlenmiştir. Rastgele çözümde en küçük tekrar sayısı ise 8 adet olduğu belirlenmiştir.

Tablo 4'te GKS=20 ve DA=48 olduğu grupta elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Tablo 4 incelendiğinde önerilen sezgisel yöntemin oluşturulan 50 örnekleme hiç tekrar olmadan, optimum sonuç ile çözdüğü fakat rastgele çözümde ise 329 adet tekrar olduğu belirlenmiştir. Rastgele çözümde en büyük tekrar sayısı ise 14 adet olduğu belirlenmiştir. Rastgele çözümde en küçük tekrar sayısı ise 2 adet olduğu belirlenmiştir.

Tablo 5'te GKS=36 ve DA=48 olduğu grupta elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Tablo 5 incelendiğinde önerilen sezgisel yöntemin oluşturulan 50 örnekleme toplam 21 tekrar ile çözdüğü fakat rastgele çözümde ise 1405 adet tekrar olduğu belirlenmiştir. Önerilen sezgisel yöntem 50 örneklemin 42 tanesini sıfır tekrar ile optimum sonuç ile çözerken rastgele çözümde hiç optimum çözüme rastlanılmamıştır. Önerilen sezgisel yöntemin çözümlerinde en büyük tekrar sayısı 6'dır. Rastgele çözümde en büyük tekrar sayısı ise 40 adet olduğu belirlenmiştir. Rastgele çözümde en küçük tekrar sayısı ise 17 adet olduğu belirlenmiştir.

Tablo 6'da GKS=48 ve DA=48 olduğu grupta elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Tablo 6 incelendiğinde önerilen sezgisel yöntemin oluşturulan 50 örnekleme toplam 475 tekrar ile çözdüğü fakat rastgele çözümde ise 2698 adet tekrar olduğu belirlenmiştir. Önerilen sezgisel yöntemin çözümlerinde en büyük tekrar sayısı 25'dir. Önerilen sezgisel yöntem sadece 4 örnekleme optimum sonuç bulmuştur. Rastgele çözümde en büyük tekrar sayısı ise 78 adet olduğu belirlenmiştir. Rastgele çözümde en küçük tekrar sayısı ise 35 adet olduğu belirlenmiştir.

Tablo 7'de GKS=40 ve DA=80 olduğu grupta elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Tablo 7 incelendiğinde önerilen sezgisel yöntemin oluşturulan 50 örnekleme toplam 0 tekrar (optimum sonuç) ile çözdüğü fakat rastgele çözümde ise 1305 adet tekrar olduğu belirlenmiştir. Rastgele çözümde en büyük tekrar sayısı

ise 37 adet olduğu belirlenmiştir. Rastgele çözümde en küçük tekrar sayısı ise 17 adet olduğu belirlenmiştir.

Tablo 8’de GKS=60 ve DA=80 olduğu grupta elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Tablo 8 incelendiğinde önerilen sezgisel yöntemin oluşturulan 50 örnekleme toplam 33 tekrar ile çözdüğü fakat rastgele çözümde ise toplam 3283 adet tekrar olduğu belirlenmiştir. Önerilen sezgisel yöntemin 50 örneklemin 34 tanesini optimum sonuç ile çözdüğü belirlenmiştir. Rastgele çözümde en büyük tekrar sayısı ise 79 adet olduğu belirlenmiştir. Rastgele çözümde en küçük tekrar sayısı ise 47 adet olduğu belirlenmiştir.

Tablo 9 ve 10’da GKS=80 ve DA=80 olduğu grupta elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Tablo 9 ve 10 incelendiğinde önerilen sezgisel yöntemin oluşturulan 50 örnekleme toplam 984 tekrar ile çözdüğü fakat rastgele çözümde ise 6291 adet tekrar olduğu belirlenmiştir. Önerilen sezgisel yöntemin çözümünde en büyük tekrar sayısı 40’dır. En az tekrar sayısı ise 3’tür. Rastgele çözümde en büyük tekrar sayısı ise 152 adet olduğu belirlenmiştir. Rastgele çözümde en küçük tekrar sayısı ise 90 adet olduğu belirlenmiştir. Tablo 11’de 450 deney sonucu özet olarak gösterilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde önerilen sezgisel yöntemin 450 deney sonucunun hepsinde rastgele çözüm sonuçlarına göre daha iyi sonuç bulduğu belirlenmiştir. GKS, DA konteyner sayısına yaklaştıkça problemin zorluğu artmaktadır. Önerilen sezgisel yöntemin performansı kötüleşmektedir. Önerilen sezgisel yöntem 450 deneyin 255 tanesini (%56.67) optimum sonuç olan sıfır tekrar ile çözmüştür. Bu durum önerilen sezgisel yöntemin performansının yeterli olduğunu göstermektedir.

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Küreselleşen dünyada yük taşımacılığı önemi giderek artan bir bilimsel problemdir. Dünyamızın büyük çoğunluğu denizlerle çevrili olduğu için deniz yolu yük taşımacılığı ön plana çıkmaktadır. Deniz yolu yük taşımacılığı içerisinde konteyner ile taşımacılık en çok tercih edilen türdür. Konteynerlerin liman içerisinde depolama stratejik bir karardır. Bu karar doğrudan limanda yapılan yük taşımacılığının verimliliğini etkiler. Bu çalışmada giden konteynerlerin depolama yeri belirleme probleminde ve bu problemin çözümüne odaklanılmıştır. Bu kapsamda yeni bir sezgisel yöntem geliştirilmiştir. Bu problemin çözümünde performans göstergesi elleçleme sayısıdır. Elleçleme sayısı az olan yöntem en iyisidir. Önerilen sezgisel yöntemin elde ettiği çözümler rastgele çözüm ile karşılaştırılmıştır.

Karşılaştırma yaparken farklı gelen konteyner sayısı ve depolama alanı değerleri dikkate alınmıştır. Dikkate alınan problem de temel kısıt depolama alanıdır. Çalışmada küçük, orta ve büyük hacimleri temsil edecek şekilde 3 farklı depolama alanı hacmi kullanılmıştır. Bunlar sırasıyla 24, 48 ve 80 konteyner adetlik depolama alanlarıdır. Gerçek hayatta gelen konteyner sayısı belirli değildir ve bu konteynerler rastgele limana gelir. Bu durum farklı depolama alanı doluluk oranlarının oluşması ile sonuçlanır. Depolama doluluk oranı %0 ile %100 arasında değişir. Çalışmada farklı gelen konteyner sayıları belirlenmiştir. Bu gelen konteyner sayıları sırasıyla 10, 18, 20, 24, 36, 40, 48, 60 ve 80’dir. Küçük olarak nitelendirebileceğimiz, 24 konteyner hacme sahip olan depolama alanı için sırasıyla 10, 18 ve 24 adet gelen konteyner sayısı dikkate alınmıştır. Orta büyüklük olarak nitelendirebileceğimiz 48 konteyner hacme sahip olan depolama alanı için sırasıyla 20, 36 ve 48 adet gelen konteyner sayısı dikkate alınmıştır. Son olarak büyük olarak nitelendirebileceğimiz 80 konteyner hacme sahip olan depolama alanı için sırasıyla 40, 60 ve 80 adet gelen konteyner sayısı dikkate alınmıştır. Tablo 1 ile Tablo 9 arasında çalışmada kullanılan veriler gösterilmiştir. Tablo 10’da ise elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Tablo 10 incelendiğinde önerilen sezgisel yöntemin küçük hacimli veri setlerinin hepsinde optimum çözüm elde ettiği belirlenmiştir. Doluluk oranı artıkça sezgisel yöntemin performansının doğal olarak düştüğü gözlenmiştir. Karşılaştırmanın sonucunda, 450 deneyin 255 tanesini optimum sonuç ile çözen yeni sezgisel yöntemin performansının belirgin bir şekilde daha iyi olduğu belirlenmiştir. Gelecek çalışma olarak önerilen sezgisel yöntemin performansı gerçek hayat verileri ile test edilmesi planlanmaktadır. Ayrıca ele alınan problemin çözümünde ileriki çalışmalarda yeni sezgisel yöntemler geliştirilebilir. Mevcut çalışmada elleçleme sayısı performans göstergesi olarak dikkate alınırken ileriki çalışmalarda maliyet, süre vb. göstergeler performans göstergesi olarak kullanılabilir.

KAYNAKLAR

Chen, L, Lu Z.Q. (2012). The storage location assignment problem for outbound containers in a maritime terminal. *International Journal of Production Economics*, 135(1), 73–80.

Guerra-Olivares, R., Smith, N.R., González-Ramírez, R.G., Mendoza, E.G. and Cárdenas-Barrón, L.E. (2018). A heuristic procedure for the outbound container space assignment problem for small and

midsize maritime terminals. *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, 9, 1719–1732.

Guerra-Olivares, R., González-Ramírez, R.G., Smith, N.R. (2015). A Heuristic Procedure for the Outbound Container Relocation Problem during Export Loading Operations. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, 201749, 13 pages.

He, Y., Wang, A., Su, H., Wang, M. (2019). Particle swarm optimization using neighborhood-based mutation operator and intermediate disturbance strategy for outbound container storage location assignment problem. *Mathematical Problems in Engineering*, 2019, 9132315, 13 pages.

Hu, W., Wang, H., Min, Z. (2014). A storage allocation algorithm for outbound containers based on the outer-inner cellular automaton. *Information Sciences*, 281, 147-171.

Kim, Y., Kim, T., Lee, H. (2016). Heuristic algorithm for retrieving containers. *Computers & Industrial Engineering*, 101, 352-360.

Kim, K.H., Park, Y.M., Ryu, K.R. (2000). Deriving decision rules to locate export containers in container yards. *European Journal of Operational Research*, 124 (1), 89–101.

Kim, K.H., Park, K.T. (2003). A note on a dynamic space-allocation method for outbound containers. *European Journal of Operational Research*, 148 (1), 92-101.

Le, M., Yu, H. (2013). The RHSA strategy for the allocation of outbound containers based on the hybrid genetic algorithm. *Journal of Marine Science and Application*, 12, 344–350.

Liu, C. (2020). Iterative heuristic for simultaneous allocations of berths, quay cranes, and yards under practical situations”, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 133(1).

Maglić, L., Gulić, M., Maglić, L. (2020). Optimization of container relocation operations in port container terminals. *Transport*, 35(1), 37-47.

Preston, P., Kozan, E. (2001). An approach to determine storage locations of containers at seaport terminals. *Computers and Operations Research*, 28(10), 983-995.

Reyes, J.J.R., Solano-Charris, E.L., Montoya-Torres, J.R. (2019). The storage location assignment problem: A literature review. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 10, 199–224.

Sivrikaya Ö.E. (2013). *Integration of Berth Allocation and Storage Allocation Problems*. MSc., Industrial Engineering, Boğaziçi University, İstanbul, Turkey.

Şenyiğit, E., Arsav, M.S. (2019). Application of Storage Location Assignment Problem Using Rolling Horizon Approach and Hybrid Sequence Stacking Algorithm. *European Journal of Science and Technology*, Special Issue, 102-108.

Şenyiğit, E., Arsav, M.S. (2019). The Outbound Containers’ Storage Location Assignment Problem for a Maritime Terminal. *European Journal of Science and Technology*, Special Issue, 349-355.

Taleb-Ibrahimi, M., Castilho, B., Daganzo, C.F. (1993). Storage space vs handling work in container terminals. *Transportation Research Part B*, 27(4), 13-32.

Woo, Y.J., Song, J.H., Kim, K.H. (2016). Pricing storage of outbound containers in container terminals. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 28(4), 644–668.

Zhang, C., Wu, T., Kim, K.H., Miao, L. (2014). Conservative allocation models for outbound containers in container terminals. *European Journal of Operational Research*, 238(1), 155-165.

Zhang, C., Wu, T., Kim, K.H., Miao, L. (2014). Location assignment for outbound containers with adjusted weight proportion. *European Journal of Operational Research*, 52, 84-93.

Zhao, N., Xia, M.J., Mi, C., Bian, Z.C., Jin, J. (2015). Simulation based optimization for storage allocation problem of outbound containers in automated container terminals. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015(1), 548762, 14 pages.

Zhang, C., Zhong, M., Miao, L. (2015). Location assignments for outbound containers in container terminals. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 55(10), 1150-1156.

Tablo 1. GKS=10 ve DA=24 olduğu durumda elde edilen veriler ve çözümler

No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	H	R
1	2	1	9	5	5	4	5	5	9	3	0	1
2	1	1	1	4	6	5	9	9	1	6	0	0
3	4	2	2	3	7	6	7	3	8	3	0	0
4	6	4	1	6	1	3	8	9	4	9	0	0
5	6	6	1	4	7	9	9	8	6	8	0	0
6	2	2	3	1	7	9	8	7	8	8	0	0
7	6	2	6	7	7	6	9	4	3	3	0	2
8	6	1	6	1	1	8	2	7	6	8	0	1
9	7	9	6	1	1	4	2	1	9	2	0	2
10	4	2	2	6	3	4	1	3	7	1	0	2
11	9	6	5	3	2	1	6	3	1	9	0	3
12	7	2	2	9	2	7	6	6	6	4	0	2
13	5	9	5	2	8	5	9	9	7	7	0	0
14	8	9	1	5	8	1	4	3	8	1	0	3
15	8	4	5	9	9	8	4	9	2	8	0	3
16	2	8	2	3	7	4	7	8	8	8	0	0
17	2	3	3	3	9	3	2	5	8	1	0	1
18	1	3	3	5	7	6	6	2	5	4	0	2
19	3	2	8	3	7	6	6	3	5	8	0	1
20	4	5	7	6	1	5	5	4	9	8	0	1
21	6	9	5	1	6	6	3	6	5	5	0	2
22	2	9	1	4	3	2	7	1	8	8	0	1
23	3	3	4	1	5	2	3	6	6	1	0	0
24	7	7	7	3	9	4	6	8	7	2	0	2
25	4	9	8	1	6	5	4	4	4	9	0	2
26	8	5	6	2	5	4	6	5	5	4	0	2
27	4	7	1	4	8	5	2	8	5	9	0	1
28	6	9	3	6	4	3	5	3	4	1	0	3
29	7	9	3	7	2	2	2	6	7	5	0	3
30	7	1	3	3	7	7	9	4	3	2	0	1
31	3	6	8	4	4	9	2	9	7	3	0	3
32	8	1	8	7	4	5	4	6	3	3	0	3
33	2	6	3	7	4	5	1	8	8	3	0	2
34	9	7	5	1	6	2	4	5	8	7	0	2
35	8	6	2	5	3	6	2	8	4	1	0	2
36	3	4	1	9	2	3	2	6	7	3	0	2
37	7	7	3	9	1	1	6	7	2	2	0	3
38	9	1	9	6	1	5	7	8	2	5	0	3
39	8	5	4	6	8	3	4	5	1	8	0	2
40	8	4	1	7	9	5	7	3	5	9	0	2
41	3	3	4	9	8	4	2	2	7	6	0	3
42	6	2	5	2	4	5	7	7	8	3	0	0
43	6	8	9	8	6	5	8	9	9	5	0	1
44	9	5	5	6	9	5	6	3	7	2	0	3
45	5	4	7	6	2	2	4	8	9	3	0	2
46	1	1	9	2	5	5	5	4	6	6	0	1
47	2	2	5	6	4	9	2	9	3	6	0	1
48	9	4	2	6	3	2	6	3	1	4	0	4
49	6	9	8	6	1	2	5	7	5	2	0	4
50	6	6	3	3	2	9	1	2	1	7	0	3
Toplam											0	87

Tablo 2. GKS=18 ve DA=24 olduğu durumda elde edilen veriler ve çözümler

No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	H	R
1	7	8	1	2	6	4	3	8	5	3	3	8	6	2	5	5	4	1	0	8
2	5	3	3	2	2	2	1	5	2	9	8	7	7	4	3	6	7	8	0	5
3	1	7	5	7	3	1	3	2	8	2	7	1	4	9	1	3	9	3	0	5
4	7	6	6	9	2	2	3	4	1	8	6	9	6	9	4	7	5	6	0	10
5	5	7	9	2	8	9	4	8	7	1	6	9	7	5	4	1	8	1	2	11
6	2	2	6	4	5	8	1	5	6	8	6	8	6	6	5	4	7	2	0	6
7	3	6	7	6	5	3	4	3	8	1	1	2	5	5	1	4	5	4	1	8
8	1	2	3	2	1	4	4	5	3	9	4	9	5	3	7	2	8	3	0	4
9	4	5	6	3	9	3	1	1	4	5	3	1	8	3	1	1	4	6	0	11
10	9	1	5	4	3	1	9	5	8	9	6	7	4	4	7	7	1	1	0	8
11	7	7	2	1	1	1	9	9	3	3	1	1	8	4	9	1	3	7	1	4
12	7	9	3	6	4	5	4	2	4	6	1	9	3	1	3	1	4	7	0	11
13	5	8	9	5	5	3	7	7	4	8	2	2	8	4	1	9	1	1	0	12
14	7	2	4	7	6	9	6	3	9	3	9	1	7	7	1	2	6	4	0	9
15	7	2	5	1	8	6	1	6	9	2	7	6	9	3	9	3	4	2	0	7
16	3	8	2	9	9	2	3	5	7	3	1	4	2	7	8	6	3	8	0	8
17	6	6	4	7	6	1	9	4	6	3	4	7	2	5	3	8	8	7	0	8
18	3	7	3	4	7	4	9	7	5	6	1	1	8	4	1	1	7	7	0	9
19	8	6	3	1	1	5	5	1	1	1	2	6	1	3	8	1	4	5	2	7
20	6	2	9	1	7	8	6	4	4	5	4	1	6	1	8	6	1	3	1	9
21	5	2	7	7	8	7	3	9	6	9	5	7	3	8	1	5	5	5	0	12
22	8	8	8	4	5	6	2	1	6	1	4	1	7	5	3	5	5	2	0	11
23	7	8	4	3	7	8	2	7	9	6	3	6	1	1	6	4	8	3	0	12
24	5	2	6	4	2	9	1	7	4	8	7	2	5	6	3	2	6	4	0	10
25	7	8	7	1	9	6	5	8	3	5	8	6	8	6	5	5	9	8	0	6
26	1	5	9	9	2	4	9	6	8	1	9	1	2	6	9	7	1	9	0	7
27	5	4	3	1	9	3	6	5	8	7	9	1	6	9	6	4	2	1	1	6
28	4	8	6	4	1	3	7	4	8	2	4	3	7	1	5	6	1	5	0	7
29	6	1	6	6	3	7	6	3	6	7	5	1	5	7	4	8	3	3	0	7
30	4	2	4	9	3	5	4	4	1	5	1	9	6	1	8	2	8	2	0	9
31	5	8	5	8	7	8	7	1	9	8	7	7	8	9	8	2	3	9	0	7
32	1	6	7	1	2	9	7	1	3	7	2	4	2	3	9	3	3	5	0	7
33	8	5	4	6	2	3	5	6	7	4	6	1	1	4	8	9	1	2	0	10
34	4	4	3	2	6	8	2	6	8	9	6	3	2	2	2	4	4	3	0	11
35	4	9	7	4	5	9	1	6	9	2	8	5	1	5	9	2	2	3	0	12
36	7	4	2	7	4	4	8	3	3	2	8	1	1	8	3	4	9	5	0	6
37	3	1	9	4	2	1	9	9	7	3	9	1	4	1	9	8	7	1	1	5
38	2	7	6	4	6	2	6	9	7	9	2	1	2	6	6	5	8	2	0	7
39	4	4	3	2	7	5	6	5	4	3	8	8	1	2	2	3	3	3	0	10
40	8	8	5	7	7	2	3	1	7	7	2	3	4	9	2	7	4	3	0	7
41	9	8	8	3	1	9	9	3	8	3	9	7	2	3	2	2	9	1	0	11
42	7	4	6	3	9	1	2	2	5	9	8	4	9	1	1	3	4	1	0	12
43	7	9	6	1	2	6	4	4	5	2	3	3	8	5	4	5	8	5	0	8
44	7	6	9	7	1	8	5	9	5	4	4	9	6	9	8	2	4	9	0	7
45	4	6	2	9	9	6	6	9	9	2	1	3	1	4	2	6	5	7	0	10
46	2	9	9	8	6	2	2	9	1	5	6	4	5	7	1	4	2	3	2	10
47	9	6	6	9	7	2	7	7	6	5	7	9	8	7	9	8	5	1	0	8
48	8	2	7	4	3	4	4	4	5	1	5	6	8	4	9	8	2	1	1	7
49	3	6	6	8	8	4	4	1	6	7	7	2	6	6	3	4	6	2	0	11
50	1	5	4	2	6	4	6	6	3	9	6	3	9	1	6	9	5	9	0	6
	Toplam																		12	419

Tablo 3. GKS=24 ve DA=24 olduğu durumda elde edilen veriler ve çözümler

No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	H	R	
1	6	8	7	7	2	8	6	4	9	5	7	4	4	1	5	9	8	3	8	3	8	9	7	3	0	17	
2	3	7	4	9	1	3	8	4	1	8	8	7	1	5	9	1	3	7	6	2	2	3	8	2	5	20	
3	8	8	1	9	5	4	7	6	2	5	5	4	5	6	3	6	7	4	4	6	3	8	9	4	0	12	
4	3	7	1	1	4	5	1	9	9	2	2	3	3	8	8	6	2	2	5	5	1	6	6	6	7	13	
5	5	9	5	7	8	3	9	1	9	6	6	7	4	6	3	7	4	6	5	3	5	1	4	8	4	20	
6	5	8	5	1	3	4	4	7	2	4	6	4	1	4	1	6	3	1	3	6	3	2	3	5	5	20	
7	9	8	2	4	1	4	2	4	6	6	2	1	8	8	7	6	3	8	6	9	9	8	6	1	5	8	
8	5	8	9	4	7	7	5	4	5	9	2	5	2	9	7	7	3	2	8	5	2	9	8	4	1	18	
9	3	7	3	5	6	4	5	1	2	2	9	2	4	7	6	8	1	8	6	8	7	2	4	4	5	12	
10	2	8	7	8	9	2	8	6	1	6	2	1	4	1	8	2	4	1	4	1	9	5	4	5	7	18	
11	5	1	4	3	4	9	6	1	4	9	3	7	6	7	2	9	3	4	2	8	6	6	4	9	1	12	
12	1	5	5	7	8	3	4	6	5	2	3	9	8	5	2	1	9	1	7	5	8	1	5	6	0	16	
13	9	4	8	6	4	5	9	9	6	4	3	8	5	9	3	1	5	7	3	4	5	2	2	7	5	23	
14	2	1	8	5	9	8	2	9	9	8	8	5	5	8	2	9	3	4	4	4	3	4	6	1	2	22	
15	8	6	1	1	8	1	2	7	2	1	5	4	6	4	9	7	2	4	8	6	1	7	5	7	6	11	
16	5	3	1	2	8	8	5	7	5	8	7	4	8	1	1	9	7	1	3	5	3	8	3	9	3	17	
17	4	6	2	8	5	9	9	1	2	4	6	6	1	9	9	4	5	7	9	8	6	6	9	1	1	14	
18	4	9	9	9	5	1	4	6	9	1	7	3	6	7	3	5	8	7	2	5	5	5	9	7	1	15	
19	2	9	9	5	9	5	4	8	7	1	5	6	9	1	6	1	9	9	6	9	2	7	7	7	8	0	16
20	9	4	4	5	6	8	3	7	2	7	6	5	5	8	2	2	3	9	6	5	4	5	4	9	4	15	
21	1	7	8	3	6	3	4	1	2	9	1	5	5	5	6	8	9	8	3	8	1	6	1	8	2	15	
22	2	9	6	1	9	2	1	5	1	5	5	9	1	9	2	8	3	6	3	5	8	7	7	7	2	14	
23	4	7	5	5	2	5	9	4	7	1	2	6	7	4	1	1	9	5	5	9	9	7	8	9	0	11	
24	7	4	6	4	4	6	9	4	3	8	7	2	7	5	3	5	6	2	3	9	8	6	2	9	4	14	
25	3	9	4	8	5	8	2	2	3	7	8	1	1	7	2	5	1	2	3	2	7	5	7	1	6	22	
26	1	2	8	1	3	4	3	7	9	2	1	3	4	9	1	1	4	7	5	2	7	9	1	4	4	12	
27	5	8	7	5	6	2	7	7	3	3	7	4	1	1	9	8	4	2	1	9	6	8	1	2	3	18	
28	1	2	7	1	9	5	4	1	2	4	5	4	7	8	1	7	5	3	1	1	2	7	1	4	7	18	
29	7	6	8	5	8	2	8	7	7	6	4	4	5	6	7	7	9	6	3	6	5	5	2	5	2	19	
30	1	4	4	3	8	1	9	4	2	3	3	3	7	8	3	1	6	8	6	1	5	7	3	8	7	14	
31	6	3	2	5	5	5	9	3	5	3	5	5	7	5	8	7	6	9	3	3	4	4	9	1	7	13	
32	4	2	1	6	9	2	9	4	1	6	7	5	9	4	9	6	4	1	8	5	4	7	3	1	6	13	
33	1	9	4	5	5	9	4	2	4	1	2	3	5	3	3	3	3	1	4	1	8	3	8	3	5	17	
34	2	2	6	2	1	5	4	9	6	8	9	2	3	7	3	4	7	8	8	9	2	2	3	1	12	12	
35	4	5	9	8	5	5	3	4	6	4	9	9	8	3	9	8	9	9	5	5	9	2	4	3	6	16	
36	3	5	6	8	1	8	3	1	9	4	8	6	2	6	8	5	3	5	3	7	4	8	5	2	1	17	
37	8	9	8	1	7	7	3	2	2	6	6	9	8	5	3	8	1	9	9	5	5	4	7	4	6	15	
38	1	9	2	5	8	6	9	5	1	5	9	1	9	3	3	3	1	6	4	5	1	9	6	8	5	16	
39	2	5	6	5	9	1	6	5	3	5	9	7	6	8	3	5	7	1	8	4	5	3	8	7	3	14	
40	6	7	4	8	9	2	3	2	4	3	4	3	9	5	6	1	8	5	7	5	4	5	6	3	7	15	
41	4	9	7	1	1	3	4	8	7	9	8	3	6	8	5	1	3	8	4	4	5	9	5	3	6	14	
42	3	1	4	6	2	8	2	2	4	8	3	4	4	8	4	8	9	3	2	4	3	7	1	6	4	16	
43	3	8	7	9	9	5	5	4	5	9	7	3	6	7	8	2	2	9	3	3	6	5	6	2	3	23	
44	5	9	2	6	9	1	3	6	1	8	4	3	2	2	2	8	3	9	9	5	1	1	3	3	4	20	
45	4	9	2	4	4	7	1	7	3	6	4	1	4	8	4	4	6	2	3	7	4	5	1	9	5	14	
46	7	5	9	6	6	1	1	5	6	9	2	9	8	9	2	3	8	6	1	6	8	2	5	5	4	19	
47	5	5	9	9	7	5	8	9	9	3	7	9	8	4	2	2	5	9	4	4	6	5	5	6	3	21	
48	9	1	9	7	5	5	2	5	1	5	2	1	2	2	7	2	2	3	9	6	2	2	5	5	9	16	
49	5	9	1	9	8	1	8	1	9	3	9	7	6	1	5	5	1	3	9	4	3	2	9	4	8	16	
50	8	6	9	4	1	5	2	4	7	5	2	4	6	5	4	2	4	7	1	2	2	1	4	7	8	22	
	Toplam																							200	805		

Tablo 4. GKS=20 ve DA=48 olduğu durumda elde edilen veriler ve çözümler

No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	H	R
1	6	7	6	1	8	8	9	8	2	6	8	1	7	6	6	3	3	9	9	8	0	7
2	2	6	1	3	1	5	7	1	3	7	8	8	4	9	2	4	8	9	8	4	0	2
3	8	9	2	4	3	7	4	2	7	2	7	8	2	2	7	1	7	4	1	3	0	11
4	1	8	5	4	7	1	7	8	4	3	4	3	1	6	1	2	4	7	9	3	0	8
5	1	5	4	2	1	1	6	3	2	2	7	5	9	5	3	9	4	8	6	2	0	4
6	1	5	8	5	7	4	7	6	1	5	7	1	4	7	3	5	5	4	3	7	0	9
7	5	4	6	3	6	9	4	5	3	1	8	6	1	7	3	5	7	8	4	7	0	7
8	3	1	2	7	4	6	2	3	3	8	4	1	5	9	7	6	9	5	9	8	0	2
9	9	3	3	1	7	1	1	6	4	7	7	7	9	5	4	5	3	9	8	9	0	4
10	8	2	3	5	7	7	1	1	1	7	6	3	8	6	7	1	7	2	1	4	0	8
11	6	5	8	5	1	7	1	9	5	3	3	9	7	1	1	8	9	7	3	9	0	6
12	9	9	6	7	2	5	8	3	8	4	7	2	9	5	3	3	3	7	5	1	0	11
13	6	1	6	7	4	6	5	8	6	8	1	9	8	1	4	7	8	1	4	6	0	8
14	8	8	2	1	5	2	1	3	7	7	6	2	3	3	3	8	4	8	4	5	0	6
15	9	1	6	9	4	7	3	8	1	6	4	2	4	9	3	8	9	5	2	2	0	7
16	6	3	1	9	3	8	7	6	7	5	4	9	7	8	6	8	2	3	6	8	0	6
17	9	2	2	2	3	4	8	4	1	5	9	8	7	2	9	6	9	7	6	6	0	4
18	9	6	2	5	2	5	5	6	3	4	7	7	8	4	3	4	2	9	7	9	0	7
19	1	4	6	3	6	5	3	5	9	9	5	5	6	1	8	3	1	6	9	8	0	4
20	8	2	1	6	7	3	1	3	9	6	5	9	1	7	5	6	1	8	9	7	0	4
21	3	3	9	5	8	7	2	7	3	9	8	4	8	2	9	4	3	9	7	7	0	6
22	2	8	8	6	5	4	7	4	6	7	2	7	5	2	7	1	7	4	5	4	0	9
23	4	7	1	4	1	4	7	5	8	6	7	8	4	4	3	4	4	4	1	5	0	8
24	1	8	2	6	8	1	8	6	4	9	6	9	4	4	3	5	8	5	6	1	0	7
25	6	2	5	1	1	3	3	1	8	4	6	4	3	1	4	6	6	5	6	9	0	2
26	6	1	1	8	9	8	5	1	1	8	6	9	8	9	8	8	3	1	6	5	0	6
27	8	7	8	1	4	2	6	3	1	7	9	4	8	6	5	6	2	6	1	2	0	8
28	8	3	1	1	8	6	6	4	3	6	3	5	8	1	2	8	3	9	5	7	0	4
29	3	2	1	4	9	2	2	2	5	2	7	7	1	4	7	5	7	7	3	7	0	2
30	6	2	1	4	4	4	5	7	5	6	4	2	2	3	9	6	3	7	1	6	0	8
31	5	5	8	1	9	6	4	5	4	6	2	5	7	7	2	1	2	6	9	5	0	7
32	7	4	6	9	8	5	5	8	4	1	3	1	7	7	3	1	4	9	5	8	0	10
33	1	1	4	9	5	9	5	4	1	9	5	7	7	5	9	2	9	9	3	4	0	7
34	1	6	1	4	4	2	7	1	5	2	6	2	1	1	5	7	1	6	5	8	0	7
35	1	1	7	4	5	6	3	2	8	1	2	4	7	2	7	5	9	9	6	4	0	3
36	2	5	9	9	3	4	6	6	1	2	1	3	5	4	4	9	8	6	8	7	0	7
37	4	1	7	8	5	5	4	3	8	1	9	3	4	8	3	2	8	4	9	9	0	4
38	7	4	4	6	3	8	5	7	9	9	6	7	8	7	5	5	3	6	3	8	0	7
39	5	9	3	3	6	4	6	5	7	6	3	7	6	4	9	1	7	1	5	6	0	5
40	1	7	4	8	4	2	5	6	3	8	8	3	2	1	4	8	1	1	1	9	0	9
41	3	9	9	4	7	9	2	4	7	5	8	3	1	6	8	8	6	5	8	5	0	8
42	9	9	3	9	7	9	5	5	1	2	9	6	1	6	4	1	7	1	1	5	0	14
43	9	1	8	8	1	6	2	5	3	6	2	6	3	6	9	3	7	1	6	7	0	8
44	4	6	3	6	5	3	2	5	3	8	1	6	4	4	5	8	2	5	8	2	0	9
45	8	1	3	5	9	4	4	5	6	2	3	7	4	3	1	4	8	3	3	7	0	5
46	7	9	7	6	6	7	6	1	2	5	4	5	7	8	5	3	9	8	5	2	0	9
47	5	3	2	1	6	3	9	4	7	8	9	4	5	1	1	1	4	3	5	0	8	8
48	8	5	9	3	4	2	2	2	4	2	5	2	2	9	5	5	8	7	9	4	0	5
49	7	3	4	3	6	1	1	7	7	5	3	6	5	9	3	9	3	9	7	4	0	5
50	1	7	9	5	4	7	3	5	5	6	2	3	4	8	7	6	2	6	6	3	0	7
	Toplam																				0	329

Tablo 5. GKS=36 ve DA=48 olduğu durumda elde edilen veriler ve çözümler

No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	H	R		
1	9	6	2	7	8	1	2	4	3	5	1	6	9	7	3	1	4	4	2	4	6	9	2	7	7	7	9	5	2	8	9	8	4	8	8	6	0	24		
2	4	3	5	3	1	7	6	5	7	6	7	1	5	2	1	2	1	2	2	1	5	4	9	2	2	6	3	4	5	2	2	1	9	6	7	1	6	26		
3	8	8	4	9	3	6	9	1	9	9	9	1	8	8	8	2	7	8	1	9	3	4	2	4	2	9	6	4	7	1	8	4	9	4	2	0	33			
4	8	2	7	8	4	9	3	2	6	3	6	7	4	1	3	1	6	7	7	5	6	1	5	2	7	4	6	2	8	2	6	8	5	6	4	6	0	28		
5	2	2	6	4	1	1	7	2	6	3	2	4	4	9	3	7	2	8	6	8	6	6	2	9	3	1	3	5	7	7	3	8	6	7	9	4	0	19		
6	2	4	4	6	3	4	6	4	3	3	8	8	8	8	6	6	9	6	9	5	1	6	2	1	7	2	5	8	9	4	8	6	1	9	6	8	0	24		
7	5	9	5	3	1	7	7	1	2	5	6	8	1	6	8	9	8	4	3	5	3	4	9	1	8	7	5	8	4	3	8	9	3	8	2	1	0	29		
8	2	6	5	3	9	1	8	2	6	6	7	4	6	8	7	6	6	1	6	1	1	4	5	3	3	8	6	9	6	7	6	3	5	7	8	3	0	26		
9	9	1	5	2	6	7	5	3	1	1	3	6	5	3	3	2	3	1	1	7	2	3	9	2	5	8	6	8	1	4	9	8	9	5	7	6	0	21		
0	6	4	5	3	9	3	2	3	6	1	5	4	5	4	1	4	7	2	2	7	1	4	6	7	2	7	2	6	2	4	6	9	6	7	6	8	0	17		
1	6	7	8	9	1	7	5	5	3	2	4	7	4	6	2	8	4	9	5	2	8	8	2	2	1	6	1	2	4	5	8	8	8	2	7	9	0	31		
2	3	2	6	3	8	2	4	9	4	5	2	6	3	7	6	6	2	4	1	8	6	6	8	5	7	4	1	8	4	6	9	2	8	2	5	2	0	29		
3	4	2	4	6	4	2	8	6	4	5	9	6	8	3	6	4	2	9	4	7	4	2	6	5	2	6	6	8	5	1	8	2	3	5	3	9	0	28		
4	1	4	4	4	8	2	2	3	4	4	9	2	9	5	1	8	7	8	8	2	5	8	4	8	6	1	1	3	6	8	4	4	1	7	4	7	0	24		
5	6	9	9	2	1	4	1	8	6	4	8	1	9	9	4	4	6	1	4	2	9	6	8	7	2	8	6	9	5	2	3	2	3	3	8	0	33			
6	9	1	8	5	3	3	9	6	6	3	9	8	1	1	8	1	4	7	3	1	4	1	9	2	7	3	9	8	1	2	6	9	7	7	2	6	1	28		
7	1	3	7	2	1	2	4	3	2	1	8	8	4	1	3	2	4	9	8	8	2	7	9	3	2	5	5	6	1	1	4	9	2	9	2	4	4	24		
8	1	2	1	3	6	7	9	7	5	2	4	1	8	5	5	8	9	3	5	4	6	7	9	9	6	8	6	2	9	5	9	3	2	2	1	3	0	21		
9	9	6	2	5	7	1	5	1	7	5	7	2	5	2	5	6	7	5	6	4	3	2	6	8	1	7	7	1	2	2	9	7	4	2	8	3	0	29		
0	1	1	6	5	2	8	2	2	2	5	6	8	1	4	6	6	6	7	1	7	9	4	5	1	3	5	9	6	6	1	7	4	3	2	6	6	0	25		
1	8	1	2	4	1	5	6	5	1	9	1	8	6	3	1	6	1	2	4	6	6	6	2	7	8	6	6	2	8	3	5	8	8	9	7	5	0	17		
2	6	6	7	4	8	9	9	4	5	2	9	3	9	1	3	2	7	9	9	3	8	4	6	4	9	4	6	7	5	2	1	6	5	5	1	5	0	33		
3	4	1	8	6	6	8	3	7	6	3	3	7	1	3	2	9	9	5	7	2	1	4	4	4	4	2	9	3	2	4	8	4	9	8	8	7	0	22		
4	1	4	6	9	2	9	8	7	2	9	7	2	1	2	7	9	8	9	4	1	6	5	3	4	4	9	9	5	3	4	9	7	3	5	4	8	6	0	27	
5	9	7	9	2	5	7	2	5	5	7	3	1	6	8	5	1	4	7	1	5	2	2	1	3	4	5	3	3	2	4	7	6	3	2	1	1	0	40		
6	9	3	5	8	3	8	9	3	6	5	6	6	4	7	9	7	4	3	5	8	7	7	8	1	5	9	3	2	9	7	7	5	8	5	1	2	0	34		
7	8	9	9	4	6	9	8	2	4	5	4	9	1	3	6	7	6	9	3	6	9	7	9	9	8	5	7	4	3	5	3	1	9	3	2	6	0	35		
8	9	7	5	8	5	5	7	5	4	3	9	8	4	2	9	1	9	3	5	2	9	1	5	2	3	5	8	8	3	4	9	8	1	9	8	9	0	28		
9	4	5	1	5	9	5	6	6	5	8	9	2	6	2	2	6	8	1	7	9	2	3	5	1	7	8	2	1	3	1	7	5	3	1	7	4	0	36		
0	2	9	2	4	4	9	6	5	5	7	3	1	2	4	1	1	2	9	8	1	9	1	8	1	3	5	3	5	1	4	8	6	5	7	5	8	1	23		
1	9	3	5	2	6	1	5	9	6	1	8	9	1	7	4	4	3	6	5	2	2	1	1	8	7	2	4	1	8	6	6	5	9	2	1	8	3	33		
2	5	6	4	9	6	8	4	2	7	3	4	3	1	4	4	9	3	4	7	8	2	6	5	5	6	4	1	1	5	3	1	9	6	5	9	6	1	30		
3	2	5	6	3	6	9	2	4	8	1	9	4	3	7	3	6	4	3	6	8	2	9	3	2	7	4	7	5	3	5	7	6	5	7	7	7	0	22		
4	8	4	3	3	5	1	7	6	4	6	7	8	9	5	5	4	8	1	5	2	3	4	6	2	2	7	2	3	4	4	9	5	9	6	8	1	0	30		
5	1	4	4	1	3	7	7	1	7	8	5	7	9	3	8	5	2	6	5	4	8	1	1	7	8	4	2	1	7	2	9	4	7	5	4	5	0	28		
6	2	3	8	8	7	4	3	1	9	9	6	1	3	3	5	2	7	2	6	8	5	5	2	7	1	6	3	3	2	2	5	9	2	5	9	8	0	30		
7	8	9	4	3	4	4	4	4	5	2	6	2	8	6	2	2	9	1	9	7	2	1	8	2	1	9	9	7	5	7	9	8	3	6	3	7	0	25		
8	6	8	6	5	9	8	2	9	5	4	7	1	7	8	4	9	9	5	5	5	2	2	7	5	7	4	7	3	2	4	3	6	1	4	5	6	0	35		
9	7	3	8	4	2	3	9	1	8	8	2	3	4	9	2	7	8	8	5	5	2	1	7	5	1	8	7	2	2	1	1	3	4	7	3	7	0	33		
0	7	2	4	8	2	7	6	8	2	4	8	3	2	5	7	3	9	1	5	7	3	9	1	5	7	3	3	5	8	8	8	8	9	6	7	4	1	7	0	24
1	4	6	3	4	4	8	4	6	1	5	9	7	3	8	4	4	3	6	3	4	9	2	4	4	8	8	1	3	5	2	6	7	4	1	8	3	3	28		
2	7	1	3	6	9	6	3	1	8	2	5	1	4	5	4	2	2	7	8	3	3	8	6	5	8	1	1	8	9	3	4	2	1	2	6	2	0	27		
3	3	6	4	3	8	4	6	7	3	9	8	1	8	5	5	6	3	5	1	9	5	7	7	8	5	4	1	6	7	3	1	3	8	2	8	6	0	31		
4	6	2	7	2	6	8	9	7	1	4	9	3	2	8	2	5	3	6	8	6	4	2	9	4	4	1	2	4	1	2	7	4	3	9	8	8	0	31		
5	4	4	8	5	8	9	6	3	8	4	3	6	8	2	6	2	3	2	1	5	2	4	8	5	6	5	6	8	6	5	9	3	1	3	1	8	0	29		
6	8	3	7	5	6	7	5	1	8	6	6	9	5	5	2	2	8	3	7	1	6	3	8	4	3	7	6	3	4	1	6	5	1	8	4	9	0	31		
7	5	6	9	4	9	7	7	1	8	7	3	1	4	8	4	7	5	1	2	5	5	4	2	8	1	2	6	7	1	1	8	7	2	2	7	3	0	36		
8	4	3	1	8	5	7	5	6	4	5	9	6	6	8	9	1	6	8	5	1	4	1	3	7	2	9	1	7	9	6	9	2	1	1	3	3	2	34		
9	9	3	9	7	9	6	5	6	3	1	1	2	2	7	1	3	7	6	8	4	9	3	7	6	7	7	7	7	6	7	5	6	5	7	1	3	0	27		
0	5	1	2	9	1	2	7	2	9	4	5	3	1	9	8	8	3	4	7	1	1	5	9	6	4	5	5	6	7</											



Tablo 6. GKS=48 ve DA=48 olduğu durumda elde edilen veriler ve çözümler

1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	H	R											
3	5	1	6	7	4	1	9	9	2	1	3	3	9	5	7	5	3	7	7	2	3	1	2	5	9	5	4	2	4	1	9	6	4	8	8	1	3	6	9	6	1	5	1	9	4	4	5	13	51	
6	2	2	5	1	7	4	1	5	8	2	8	9	7	7	6	2	2	7	8	2	6	7	3	7	8	1	2	7	1	3	1	6	9	8	1	2	5	8	8	1	7	4	2	2	8	9	8	15	48	
3	8	9	7	6	5	3	9	4	9	8	3	6	2	4	4	6	1	3	9	9	6	5	6	4	8	7	5	2	5	1	8	8	3	9	8	2	5	5	1	7	8	7	2	7	6	3	9	1	49	
4	9	5	1	6	1	9	7	4	3	4	7	8	8	8	9	8	9	4	4	3	5	3	2	6	2	3	2	9	3	8	7	6	8	2	2	1	9	2	8	3	2	4	8	1	7	3	9	6	62	
9	7	4	7	3	9	6	8	7	3	5	4	8	8	7	2	4	7	2	9	6	6	9	8	8	6	1	1	1	5	2	8	9	3	2	2	8	2	5	7	3	4	5	7	5	7	9	5	5	66	
5	3	4	3	5	3	3	3	8	5	9	6	8	5	7	2	2	7	5	5	6	6	3	3	2	5	7	3	2	2	4	1	6	5	6	8	2	8	4	7	1	8	4	4	2	8	8	7	19	46	
6	3	5	7	3	4	8	9	9	1	2	1	6	1	2	6	1	9	1	3	9	9	1	3	4	8	5	8	3	9	2	3	6	1	7	8	7	6	7	2	7	7	9	1	7	3	1	9	10	51	
1	9	2	8	9	5	6	4	7	8	1	1	9	6	6	2	6	4	8	4	8	2	3	1	4	3	3	7	5	3	1	5	9	1	2	9	8	2	2	8	8	7	9	8	4	2	6	9	59		
5	4	9	8	4	8	8	9	6	1	5	6	2	4	7	3	5	9	5	9	5	5	3	8	3	7	5	1	4	4	2	9	1	7	8	3	6	5	7	7	2	2	5	8	4	5	9	5	0	59	
2	4	4	9	9	3	1	9	2	2	5	7	4	7	5	3	9	5	6	5	6	4	7	1	3	8	8	3	9	5	4	8	7	1	9	9	9	3	9	8	6	8	2	5	9	1	3	4	0	49	
7	3	9	8	9	5	8	7	7	4	6	2	4	8	1	7	7	7	9	3	8	5	3	6	5	7	9	8	3	3	1	3	5	5	6	7	5	6	9	3	2	3	6	6	8	5	8	9	61		
7	4	7	3	1	1	5	2	9	3	3	2	5	1	4	4	3	4	7	9	2	4	2	1	8	7	2	6	3	7	1	7	3	1	1	8	5	8	3	4	9	4	7	3	3	7	7	1	19	46	
8	8	4	3	1	6	6	4	3	7	5	4	9	9	9	3	3	6	8	4	1	5	9	5	2	3	9	7	6	8	8	1	9	1	7	4	4	7	7	7	4	6	6	8	4	8	5	9	8	51	
5	4	1	7	9	3	1	4	9	8	2	7	6	9	8	5	8	5	4	8	3	5	9	5	9	2	1	5	9	2	2	3	8	1	2	2	7	2	1	7	1	4	5	5	6	9	2	5	13	57	
8	1	9	8	5	6	7	9	5	6	8	7	3	5	5	7	7	8	9	6	7	6	7	7	4	7	8	9	1	5	8	9	1	5	6	8	2	3	7	2	1	3	3	7	2	4	4	5	1	78	
8	7	7	7	1	5	7	3	4	3	5	8	7	7	9	9	7	8	7	7	8	6	6	5	2	7	3	5	8	6	3	1	3	4	1	3	8	2	8	5	7	4	5	8	7	9	5	5	10	60	
4	8	4	5	6	6	6	3	1	2	6	4	3	3	4	8	9	5	6	4	7	6	1	6	9	3	1	4	2	7	7	3	3	7	1	9	2	8	4	6	7	7	3	6	5	5	2	4	11	55	
1	7	8	3	3	1	8	8	7	8	5	4	6	2	2	3	4	4	2	6	3	4	6	2	2	9	7	9	4	5	1	5	1	6	4	5	9	5	9	2	9	3	4	3	9	1	5	11	54		
1	6	4	9	6	4	6	5	6	4	2	6	1	3	6	6	9	5	5	1	6	4	6	3	1	2	7	9	6	6	3	4	7	9	4	4	5	8	8	7	8	5	9	8	5	7	9	0	35		
3	6	5	5	6	3	5	6	9	2	9	4	6	7	9	9	2	7	9	1	9	2	1	2	6	7	2	1	5	7	5	5	5	7	6	9	1	7	8	4	5	7	4	4	9	5	1	1	10	56	
6	9	7	1	5	6	1	1	5	4	8	8	1	4	2	3	6	4	9	9	2	9	9	4	8	5	6	2	8	7	3	2	7	1	5	5	9	4	1	8	7	5	5	7	8	1	4	1	9	52	
2	6	5	2	9	4	3	9	7	6	3	5	9	3	2	8	7	4	8	6	4	6	9	5	1	6	8	9	3	8	9	3	4	5	8	7	4	9	8	2	6	9	3	4	1	6	8	2	51		
7	6	8	8	3	2	5	5	7	1	1	3	5	3	7	9	6	9	3	6	7	4	1	3	4	9	4	7	7	6	1	1	1	1	2	6	9	2	1	1	8	1	1	7	4	6	3	9	17	55	
9	1	6	5	8	9	1	4	6	5	5	3	7	7	8	1	9	1	3	5	1	1	9	5	9	2	8	7	3	4	9	7	6	5	8	7	9	6	2	1	9	8	1	5	6	7	3	1	10	46	
8	8	9	9	1	1	2	2	8	5	5	2	3	6	7	6	4	3	7	4	9	7	7	9	4	9	6	8	4	3	2	2	3	9	5	3	5	9	2	8	5	3	5	1	1	3	5	2	16	61	
5	1	6	7	4	2	9	8	8	9	6	1	6	9	4	2	5	7	9	7	4	6	1	1	2	9	7	3	8	2	2	4	7	2	2	1	2	7	3	5	7	6	9	7	2	1	4	15	59		
5	7	2	8	3	5	5	2	4	6	6	2	2	3	6	9	8	4	7	9	8	7	4	9	7	5	5	1	7	7	3	8	2	6	3	5	6	3	9	9	2	1	7	5	6	5	2	3	16	62	
2	6	1	4	5	1	6	7	4	3	2	8	9	5	4	7	3	7	1	5	9	1	4	6	4	8	7	7	1	8	4	2	3	3	8	1	6	9	4	1	1	6	2	4	1	2	9	7	14	52	
6	1	2	8	5	6	3	2	3	5	9	7	4	8	7	6	8	9	5	7	6	4	2	4	4	9	5	3	8	1	5	3	8	9	2	9	6	6	7	6	9	7	8	1	9	6	7	2	2	41	
7	1	6	7	7	6	6	2	3	6	8	2	6	3	3	6	2	9	8	6	2	3	2	6	4	9	7	8	6	4	5	1	2	2	5	4	9	7	8	7	1	5	8	5	6	4	8	4	15	53	
3	4	8	3	6	9	4	5	8	9	3	7	9	8	6	8	2	7	9	4	7	9	6	5	1	2	6	7	4	6	1	1	2	3	6	2	5	3	5	3	8	1	5	1	4	1	7	3	11	77	
8	1	4	8	5	4	6	3	8	4	2	5	3	6	2	9	3	6	7	2	4	4	9	3	6	6	7	5	5	1	9	4	4	8	4	3	2	5	7	6	4	4	1	1	9	9	2	9	57		
8	3	2	2	5	9	1	4	6	4	6	8	8	8	8	3	3	2	1	9	8	8	9	8	7	8	1	8	1	3	8	3	7	5	9	2	4	9	5	5	3	4	7	8	6	6	9	7	0	50	
5	1	8	9	9	9	3	1	4	3	4	6	9	3	4	4	6	3	2	3	9	7	8	4	6	6	7	4	1	1	2	2	8	3	3	1	5	9	4	7	2	8	7	1	6	9	5	9	6	49	
1	4	3	3	5	6	8	8	2	5	3	4	3	9	9	3	2	3	7	7	1	3	8	7	8	4	2	2	9	8	7	1	7	3	7	8	9	6	2	5	4	8	9	6	1	5	2	13	54		
9	4	9	4	2	8	9	7	5	6	4	1	5	6	9	4	7	6	3	5	6	2	5	2	6	5	2	6	5	2	6	5	8	1	8	9	3	5	8	4	6	3	8	6	3	5	5	7	8	12	52
4	8	7	3	8	9	4	8	4	2	3	2	6	5	1	5	9	7	5	8	9	4	6	6	3	3	3	4	7	1	3	3	8	9	3	1	7	1	2	3	2	4	5	2	9	4	6	3	13	65	
6	6	7	6	8	2	5	1	2	1	1	5	6	9	1	3	9	1	3	6	3	9	7	9	5	3	7	5	8	5	7	8	6	1	8	2	4	6	4	7	5	3	9	6	1	7	6	2	7	52	
4	2	3	8	1	1	1	6	8	7	1	6	4	9	2	6	4	2	8	6	2	9	8	3	6	6	1	9	1	1	8	8	6	6	2	6	3	8	7	6	1	2	3	6	6	8	3	5	8	48	
2	3	3	9	8																																														

Tablo 11. Deney sonuçlarının özeti

GKS	DA					H		R	
		H	R	H	R	Minimum	Maksimum	Minimum	Maksimum
10	24	0	87	0.00	0.01	0	0	0	4
18	24	12	419	0.01	0.03	0	2	2	12
24	24	200	805	0.12	0.05	0	9	8	23
20	48	0	329	0.00	0.02	0	0	2	14
36	48	21	1405	0.01	0.08	0	6	17	40
48	48	475	2698	0.28	0.16	0	25	35	78
40	80	0	1305	0.00	0.08	0	0	17	37
60	80	33	3283	0.02	0.20	0	6	47	79
80	80	984	6291	0.57	0.38	3	40	90	152
	Toplam	1725	16622	1	1				

Akşehir Grabeninin Depremselliği

Canan AKIN*¹ , Fuzuli YAĞMURLU*² 

*Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Isparta, 32200, Türkiye

Araştırma Makalesi, Geliş Tarihi: 23.11.2020, Kabul Tarihi: 13.12.2020

Özet

GB Anadolu'nun en önemli çöküntü alanlarından biri olan Akşehir Grabeni günümüzde sismik aktivitenin en yoğun olarak geliştiği bölgelerin başında gelir. Bölgede KB-GD yönünde uzanım gösteren Akşehir Grabeni, Sultandağı yükseltisinin doğu bölümünde yer alır. Akşehir Grabeni güneyden Akşehir Fayı ile sınırlanır. Akşehir Fayı, Akşehir-Simav Fay Zonunun güney bölümünü oluşturan ve günümüzde halen aktif olan en önemli segmenttir. Çalışma bölgesinde K55 B yönünde uzanım gösteren Akşehir Fayı, Sultandağları metamorfik masifi ile Akşehir Grabenini dolduran alüvyonları birbirinden ayıran normal atımlı bir faydır. KB-GD yönünde uzanım gösteren Akşehir Grabeninin güney kenarında Akşehir Fayı boyunca alüvyonal yelpaze tortulları ve birikinti konileri ile bunlara eşlik eden yamaç molozları olağan olarak bulunur. Bunun yanı sıra, topoğrafyada yanal yönde izlenebilen fay sarplıkları, breşlenme kuşakları ve hidrotermal alterasyon zonları, Akşehir Fay Zonu üzerinde yaygın olarak gözlenebilen diğer önemli yapısal özelliklerdir. Akşehir Grabeni ve bunu sınırlayan Akşehir Fayı, daha çok orta büyüklükte depremlerin meydana geldiği sismik bir rejime sahiptir. Bu çalışmada bölgede meydana gelen tarihi ve aletsel dönemdeki depremlere dayanarak bölgenin deprem aktivitesi irdelenecektir.

Anahtar Kelimeler: Depremsellik, Akşehir grabeni, Akşehir fayı.

Seismicity of Akşehir Graben

Abstract

Akşehir Graben, one of the most important depression areas of SW Anatolia, is one of the regions where seismic activity is most intensely developed today. The Akşehir Graben extending in a NW-SE direction in the region is located in the eastern part of the Sultandağı elevation. The Akşehir Graben is bounded by the Akşehir Fault in the south. The Akşehir fault is the most important segment that forms the southern part of the Akşehir-Simav Fault Zone and is still active today. The Akşehir Fault, which extends in the N55 W direction in the study area, is a normal-slip fault separating the Sultandağı metamorphic massif and the alluvium filling the Akşehir graben. Alluvial fan sediments and accumulation cones and accompanying slope debris are commonly found along the Akşehir Fault on the southern edge of the Akşehir Graben, which extends in a NW-SE direction. In addition, fault scarp, breccia zones and hydrothermal alteration zones that can be observed laterally in the topography are other important structural features that can be widely observed on the Akşehir Fault Zone. The Akşehir Graben and the Akşehir Fault that limits it have a seismic regime in which mostly medium-sized earthquakes occur. In this study, the earthquake activity of the region will be examined based on the earthquakes in the historical and instrumental period.

Keywords: Seismicity, Akşehir graben, Akşehir fault.

¹Sorumlu yazar canan_oner@yahoo.com, ²fuzuliyagmurlu@sdu.edu.tr

1. GİRİŞ

Batı Anadolu ve GB-Anadolu'nun güncel tektonik yapısı, daha çok Anadolu'nun tümünü etkileyen bölgesel jeodinamik olayların kontrolünde biçimlenmiştir. Bu bölgesel jeodinamik olayları başlıca dört grup içinde toplamak mümkündür. Bunlar sırası ile (1) Arap levhasının Bitlis-Zagros bindirmesi boyunca Doğu Anadolu ve İran levhasının altına dalması, (2) Kuzey Anadolu Fayı (KAF) ve Doğu Anadolu Faylarının (DAF) etkisi altında Anadolu levhasının batıya doğru kayması; (3) Afrika levhasının Kıbrıs – Girit yayları boyunca Ege levhasının altına dalması ve (4) Batı Anadolu ve Ege levhalarının güneybatı yönünde kayması olarak özetlenebilir (Yağmurlu & Şentürk, 2005).

Anadolu levhasının KAF ve DAF'ın kontrolünde batıya doğru hareketi, Ege ve Batı Anadolu levhaları içinde K-G ve GB-KD yönünde gelişen genişleme rejimlerinin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bu genişleme rejimleri sonucunda Ege bölgesinde D-B yönlü grabenlerin yanı sıra, KB ve KD gidişli grabenlerin ve çöküntü alanları ortaya çıkmıştır.

Başlıca KD yönünde uzanım gösteren Fethiye–Burdur Fay Zonu (FBFZ), aynı zamanda Ege ve Batı Anadolu levhasının güney sınırını karşılamaktadır. FBFZ 'nun kuzeyinde kalan alanlarda Ege ve Batı Anadolu levhası güneybatıya doğru 3 cm/yıllık bir hızla kaymaktadır (Yağmurlu & Şentürk, 2005). GB-yönünde gelişen bu kayma hareketi, Ege ve Batı Anadolu bölgesinde, Muğla-Yatağan Fayı, Dinar Fayı, Akşehir Fayı ve Simav Fayı gibi günümüzde halen aktif olan KB-gidişli normal fay sistemlerinin ortaya çıkmasına neden olmuştur.

Batı Anadolu-Ege levhası sismik olarak oldukça aktif bir bölge olup özetlenen jeodinamik etkenlerin kontrolünde hızla genişlemeye uğramaktadır. K- G yönlü genişleme oranı yılda 30-40 mm civarındadır (Oral ve diğerleri, 1995; LePichon X., 1995). Kuzey-Güney genişleme ile ilişkili horst-havza graben sistemleri ve D-B uzanımlı normal faylanmalar Batı Anadolu-Ege Bölgesi'ndeki çöküntü alanları için karakteristiktir (McKenzie, 1978; Dewey ve Şengör, 1979; Taymaz & Price, 1992). Grabenlerle ilgili fay düzlemi çözümleri çoğunlukla kuzey-güney yönlü bir gerilmeye işaret eder (McKenzie D. P., 1972). Marmara Denizi ve çevresinde Kuzey Anadolu Fay Zonunun etkisi ile kuzeydoğu-güneybatıya doğru bir açılma vardır. Kuzey Anadolu Fay Zonunun ve

Anadolu levhasının güneybatı yönünde ki hareketi sonucu, Isparta Açısının doğu kanadı güneybatı yönünde rotasyona uğramıştır (Özkaymak ve diğerleri, 2017). Batı Anadolu'daki genel gerilme bir elin parmaklarının açılmasına benzer bir görünüm sunar (Şengör, 1980). Isparta açısı ve yakın çevresi, eski geçiş ve yeni tektonik dönemlerin birbirleri ile olan ilişkilerinin ve bu dönemde gelişen yapıların gözlenebildiği bir bölgedir (Koçyiğit, 1984).

Akşehir Grabeni ile ona eşlik eden ikincil grabenler Isparta açısının kuzeyi ile Orta Anadolu arasında yer almaktadır. KB yönünde uzanım gösteren Akşehir Grabeni, yörede boyları 10 ile 25 km arasında değişen normal fay segmentleri tarafından sınırlandırılmıştır. Ana faya paralel gelişmiş sentetik ve antitetik fay bileşenleri, Akşehir Fay Zonu boyunca olağan olarak gözlenir. KB yönünde uzanım gösteren Akşehir Fayı ile buna eşlik eden sentetik ve antitetik fay bileşenleri, Afyon Akşehir Grabeni boyunca, metamorfiklerden oluşan temel kayalarını, graben dolgularını ve yamaç molozlarını çoğu yerde keser (Koçyiğit ve Özacar, 2003). Akşehir Grabeni ana çizgilerde simetrik sayılabilecek bir çöküntü ovası özelliği taşır. Graben güneyden Akşehir Fayı, kuzeyden ise Çobanlar Fay Zonu ile sınırlanır. Her iki fay zonunda grabenin gelişinde rol oynamıştır. Ancak, bölgenin morfolojik özellikleri yanı sıra, tarihsel deprem kayıtları incelendiğinde, Akşehir grabeninin güney kenarının, deprensellik açısından, daha aktif olduğunu belirtmek mümkündür. Afyon Akşehir Grabeni güneyden Sultandağı metamorfik masifi ile sınırlanır. Grabenin Sultandağları ile olan sınır boyunca, oldukça dik ve genç sayılabilecek morfolojik falezler ve üçgen şekilli yamaçlar yer alır. Akşehir Fayı aynı zamanda, Batı Anadolu'da Akşehir-Simav Fay Sistemi olarak adlandırılan KB gidişli fay sisteminin en önemli bileşenlerinden biridir. Yukarıda da belirtildiği gibi, Akşehir Fayı günümüzde halen aktif ve yıkıcı deprem üreten bir faydır. Bu depremlerden ölçülebilen en yıkıcı deprem Mw= 6.1 olan ve 03/02/2002 de meydana gelen Sultandağı Depremidir.

2. ÇALIŞMA ALANININ JEOLJİSİ VE TEKTONİĞİ

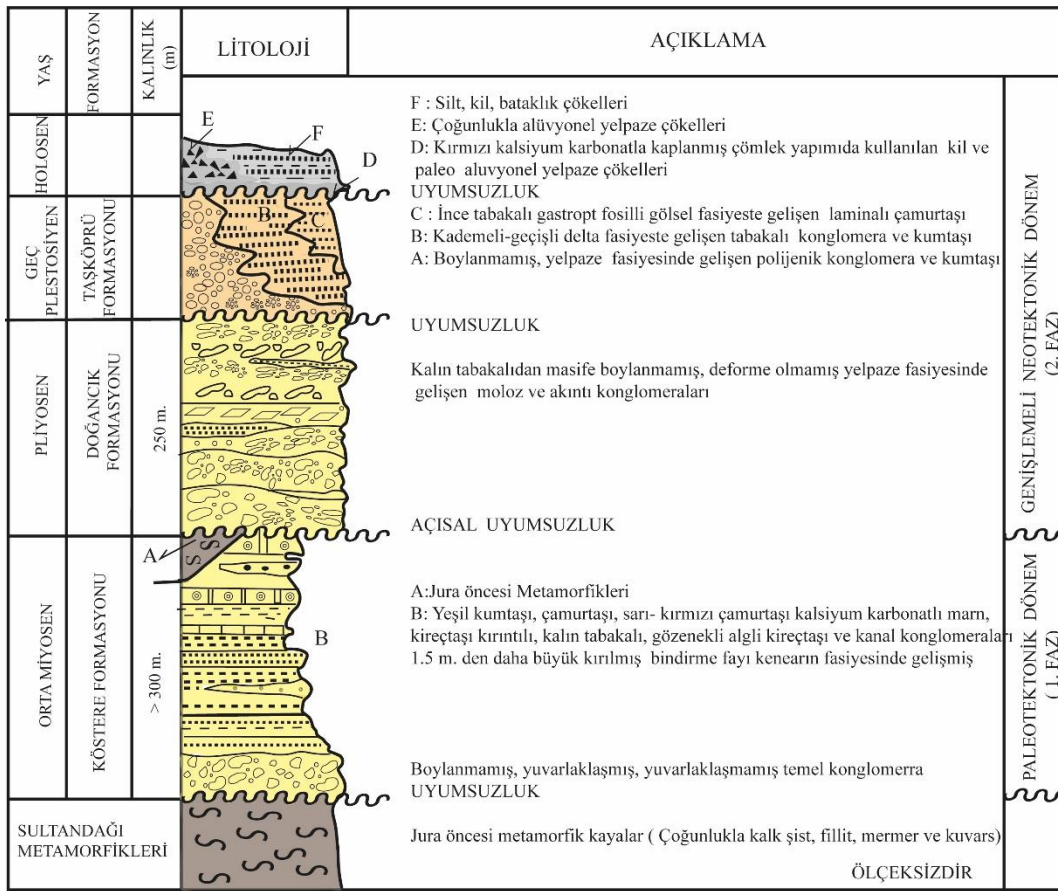
Sultandağı Masifi, Afyon Akşehir Grabenini güneyden sınırlar. Önceki araştırmacılar tarafından Sultandağı Metamorfikleri olan adlandırılan kristalin masif yapı egemen olarak düşük dereceli metamorfiklerden ve

metasedimanter kayalardan oluşur (Ketin, 1977; Şengör, Görür, & Şaroğlu, 1985; Aksoy & Bozdağ, 2008). Sultandağı masifini oluşturan düşük dereceli metamorfik kayalar, Orta Kambriyen-Üst Permiyen yaş aralığında değişen düşük dereceli metamorfik kayalar egemen olarak, rekristalize kireçtaşı, kuvarsit, meta-çakıltası, meta-kumtaşı, sleyt, fillit ve kalkışist gibi bileşenlerden meydana gelmiştir (Ketin, 1977). Yörede çalışan araştırmacıların bir bölümü Sultandağı Masifini oluşturan kayaçların Alpin Orojenezine bağlı olarak yeşilist fasiyesinde başkalaşım geçirdiklerini belirtirler. Akşehir Grabeninin güney bölümünde geniş yayılım gösteren Sultandağı Masifine ait metamorfik kayalar, grabeni dolduran Orta Miyosen ve Pliyo-Kuvaterner yaşlı karasal ve gölsel tortullar tarafından (Kösedere, Doğancık ve Taşköprü Formasyonları) uyumsuz olarak örtülmüştür (Demirkol, 1977; Aksoy & Bozdağ, 2008) (Şekil 1).

Akşehir ve Eber göllerinin içinde bulunduğu Akşehir Grabeni içinde kalın bir dolgu çökeli mi mevcuttur.

Grabeni dolduran tortul dolguları, iki ana grup içinde toplamak mümkündür. Bunlar alttan üste doğru (1) Orta-Geç Miyosen yaşlı gölsel tortul istif, (2) Pliyo-Kuvaterner yaşlı fluvial ve aluvyonal yelpaze tortullarından oluşan kırıntılı istifdir (Şekil 1). Her iki tortul istif arasında çoğu yerde açıl uyumsuzluk yer alır. Yersel olarak kömür düzeyleri içeren Orta-Geç Miyosen yaşlı gölsel istif, bazı araştırmacılar tarafından eski graben dolgusu olarak kabul ederek eski graben dolgusunu açıl uyumsuz olarak üstleyen Pliyo-Kuvaterner yaşlı fluvial tortulları da, yeni graben dolgusu olarak tanımlamışlardır (Koçyiğit & Deveci, 2005).

Yaşlı graben dolgusunu oluşturan gölsel tortullar egemen olarak Akşehir Grabeninin kuzey bölümünde yayılım göstermesine karşın, genç graben dolgusuna ait kırıntılı tortullar büyük bölümü ile grabenin güney kenarında, Sultan Dağlarının kuzey eteklerinde yayılım gösterir (Aksoy ve Bozdağ, 2008).



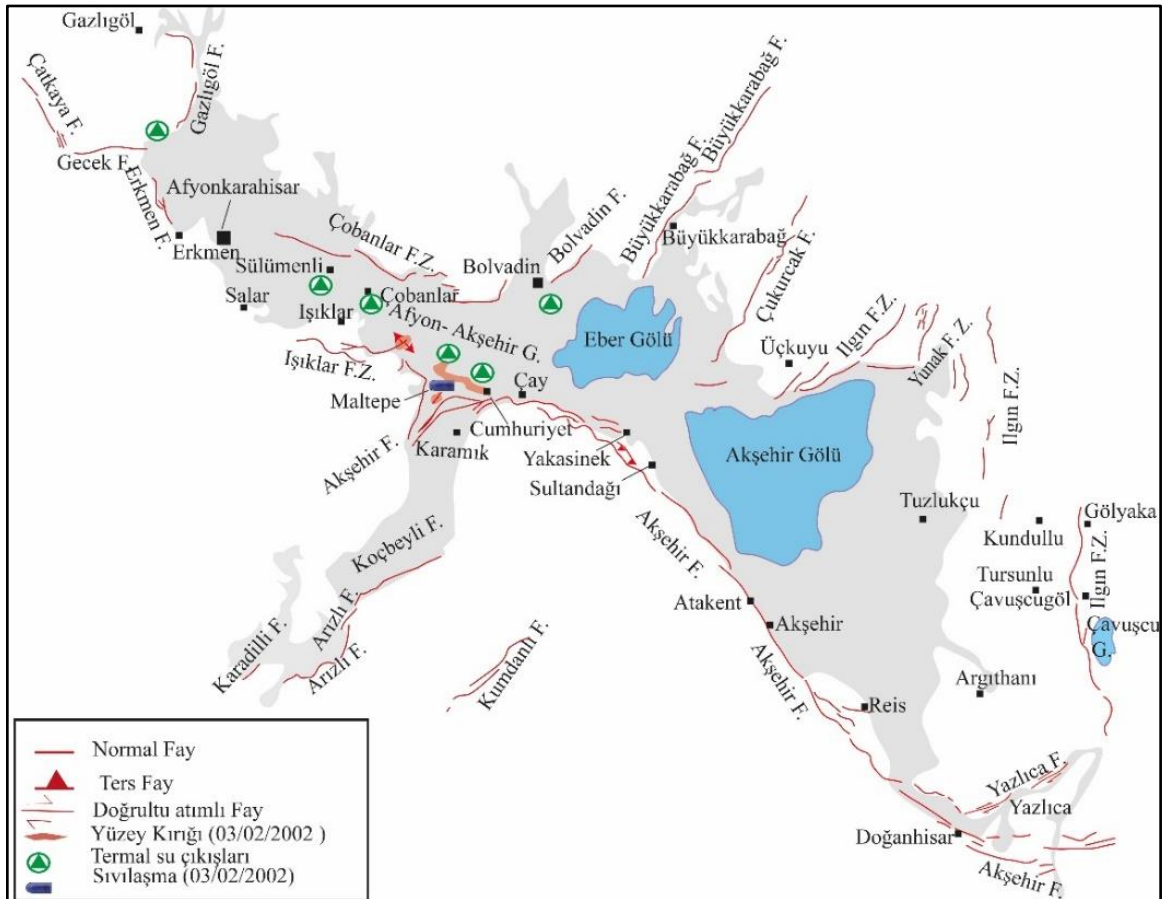
Şekil 1. Akşehir ve yakın çevresinin stratigrafik kesiti (Koçyiğit & Özacar, 2003'ten değiştirilmiştir)

3. AKŞEHİR FAYI

Akşehir Fayı, Akşehir-Simav Fay Zonunun güney bölümünü oluşturan en önemli segmenttir. Akşehir ilçe merkezi ile Sultandağ ilçesi arasında uzanım gösteren Akşehir Fayı, ana çizgilerde K55B doğrultusunda 100 km kadar uzanımlı olup, Sultandağları metamorfik masifi ile Akşehir grabenini birbirinden ayıran normal atımlı bir faydır. Fayın eğimi çoğunlukla 65-75° kuzeydoğuya doğrudur. KB-GD yönünde uzanım gösteren Akşehir Grabeninin güney kenarında Akşehir Fayı boyunca alüvyonal yelpaze tortulları ve birikinti konileri ile bunlara eşlik eden yamaç molozları olağan olarak bulunur. Bunun yanı sıra, topoğrafyada yanal yönde izlenebilen fay sarplıkları, breşlenme kuşakları ve hidrotermal alterasyon zonları, Akşehir Fay Zonu üzerinde yaygın olarak gözlenebilen yapısal özelliklerdir. Akşehir fayı Çay ilçesinin kuzeyinde, KD uzanımlı Karamık ve Bolvadin Fayları tarafından kesilir.

Akşehir Fayı ile buna eşlik eden aktif fay segmentleri üzerinde tarihsel ve aletsel dönemde orta ile büyük sayılabilecek magnitudlü (örneğin, 5-6.0 M) depremler meydana gelmiştir. Akşehir Grabeni içinde yer alan belli başlı aktif fay segmentlerini sırası ile, Akşehir Fayı, Çobanlar Fay Zonu, Işıklar Fay Zonu, Yunak Fay Zonu, ve Ilgın Fay Zonu bulunmaktadır (yerbilimleri.mta.gov.tr, 2020) . Bunun yanı sıra, bu faylara eşlik eden Bolvadin Fayı, Büyükkarabağ Fayı ve Çukurcak Fayları da sismik aktivite gösteren fay sistemlerini oluşturur. Akşehir grabeninde gerçekleşen büyük depremler daha çok Akşehir fay segmenti üzerinde gerçekleşmiştir.

2000-2002 yıllarında meydana gelen Çay ve Sultandağ Depremleri fayın Çay, Kali Çayı, Maltepe segmentlerinde yüzey kırığı meydana getirmiştir (Emre, ve diğerleri, 2003).



Şekil 2. Akşehir Grabeni ve yakın çevresinde yer alan fay sistemleri (yerbilimleri.mta.gov.tr, 2020; Koçyiğit ve diğerleri 2002'den derlenmiştir, ölüksizdir)

4. SİSMİK AKTİVİTE

Akşehir Grabeninde yoğun mikrosismik aktivite gözlenir (Tablo1,2 Şekil 3). Graben sınırlarında ve grabeni denetleyen fay/fay sistemler, üzerinde; 1900 yılından günümüze kadar büyüklüğü (Ms) 3.5 dan büyük 118 adet deprem meydana gelmiştir. Son yüzyılda magnitudü Mw=5.0'dan büyük 14 deprem meydana gelmiştir (www.koeri.boun.edu.tr). Depremler çoğunlukla yüzeye yakın derinliklerde meydana gelmiştir. Grabeni kontrol eden faylarda gelişen depremler incelendiğinde (1900-2020) deprem büyüklüğünün 3.5-4 aralığında kümelendiği görülmektedir. Bu depremlerin en yıkıcı olanları (1) Gökçeyaka - Emirdağ depremi (1.4.1919), (2) Tursunlu-Tuzlukçu depremi (26.9.1921), (3)

Akşehir grabeni ve yakın çevresinde tarihsel dönemde meydana gelen depremlere ait birçok çalışmalar bulunmaktadır (Pınar ve Lahn, 1956; Ozer, 2006; Özkaymak ve diğerleri, 2019). Çalışmamızda araştırmacıların tarihsel deprem verileri harita üzerinde gösterilmiştir (Şekil 3 ve Tablo 1,2). Grabeni kontrol eden faylarda gelişen depremler incelendiğinde (1900-2020) deprem büyüklüğünün 3.5-4 aralığında kümelendiği görülmektedir (http://www.koeri.boun.edu.tr, 2020).

20/11/1924 İnli - Çay depremi (20.11.1924), (4) Eber-Çay depremi (16.07.1946), (5) Eber - Çay depremi (15.12.2000) ile farklı zamanlarda meydana gelen Çay, Çobanlar, Hamidiye (Bolvadin) ve Taşköprü depremleridir. (Şekil 3).

Özellikle 2002 ve 2000 yıllarında meydana gelen ana depremler ve artçı şoklar birçok araştırmacı tarafından araştırılmıştır. Yapılan odak mekanizma çözümleri Akşehir Fayının eğim atımlı normal fay olduğunu doğrulamaktadır (Taymaz T., 1991).

Tablo 2. Aletsel dönem öncesi depremler (Pınar ve Lahn, 1956; Özer, 2006; Akyüz ve diğerleri, 2006, Özkaymak ve diğerleri, 2019).

No	Tarih	Haritada Kodu	Yer
1	1766	1766	Afyonkarahisar, Şuhut
2	1795	1795	Afyonkarahisar
3	3/11/1862	1862 a	Afyonkarahisar, Şuhut
4	14 /11/1862	1862b	Afyonkarahisar, Şuhut
5	Kasım- Aralık /1862	1862 c	Konya, Ilgın
6	26-27/6/1866	1866a	Konya, Ilgın
7	5 /5/1866	1866 b	Afyonkarahisar,Şuhut, Ağzıkara
8	Temmuz- Kasım/ 1866	1866c	Konya, Ilgın
9	Ekim, 1867	1867	Afyonkarahisar
10	1 /9/1873	1873	Afyonkarahisar
11	23 /12/ 1877	1877	Afyonkarahisar
12	28 /1/1885	1885	Afyonkarahisar
13	27 /3/ 1891	1891	Konya,Ilgın
14	23 /5/1897	1897	Afyonkarahisar

Tablo 1. 1900-2020 arasında meydana gelen magnitudü 4.5'ten büyük depremler

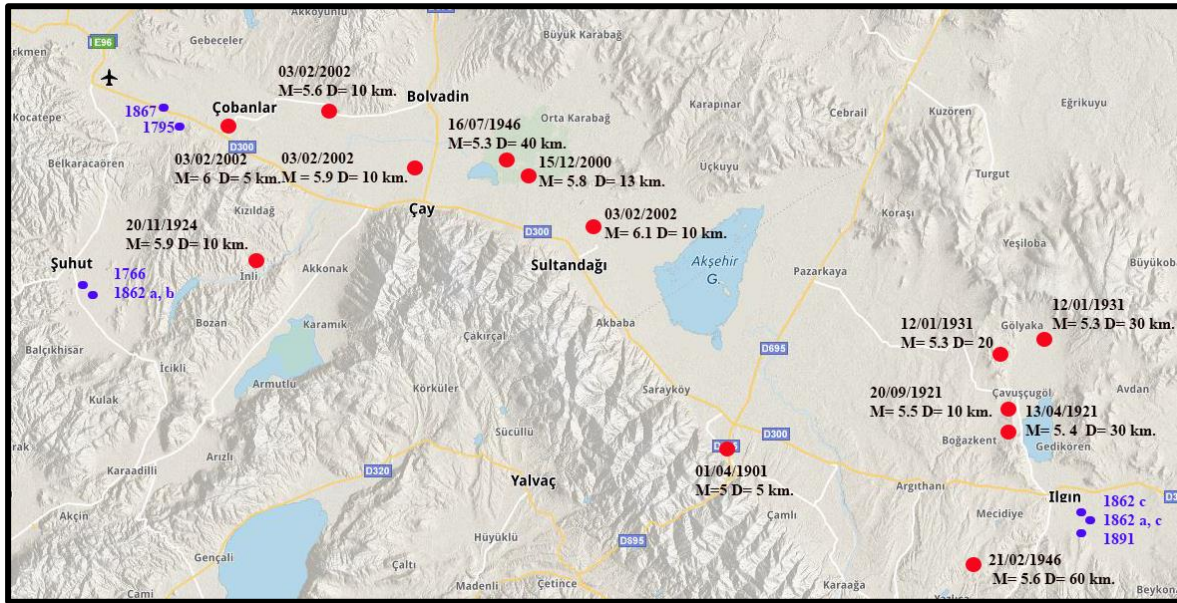
No	Olus tarihi	Olus zamani	Enlem	Boylam	Der(km)	xM	MD	ML	Mw	Ms	Mb	Tip	Yer
1	27.07.2011	09:58:13.10	383.368	318.680	5	4,8	0	4,8		0	4,8	Ke	GEDIKOREN-ILGIN (KONYA)
2	15.05.2005	10:54:26.92	386.217	307.803	5	4,5	0	4,5		0	0	Ke	DEGIRMENDERE- (AFYONKARAHISAR)
3	3.02.2002	11:54:34.50	386.300	310.100	10	4,8	4,5	0		0	4,8	Ke	CAY (AFYONKARAHISAR)
4	3.02.2002	11:39:55.10	386.500	310.100	10	5,1	4,6	0		0	5,1	Ke	CAY (AFYONKARAHISAR)
5	3.02.2002	09:26:44.10	386.800	308.200	5	6	5,9	0	6	0	0	Ke	COBANLAR (AFYONKARAHISAR)
6	3.02.2002	07:14:36.40	387.000	308.700	10	5,6	5,2	5,6		0	5,5	Ke	HAMIDIYE-BOLVADIN (AFYONKARAHISAR)
7	3.02.2002	07:11:28.60	385.800	312.500	10	6,1	6,1	0	6	0	0	Ke	TASKOPRU-SULTANDAGI (AFYONKARAHISAR)
8	22.03.2001	06:21:17.60	387.400	308.700	10	4,8	4,8	0		0	0	Ke	KOCAOZ-COBANLAR (AFYONKARAHISAR)
9	15.12.2000	16:44:44.20	386.300	311.900	13	5,8	5,8	0		0	0	Ke	EBER-CAY (AFYONKARAHISAR)
10	17.01.1986	02:11:52.30	385.500	313.700	39	4,6	0	0		0	4,6	Ke	TASKOPRU-SULTANDAGI (AFYONKARAHISAR)
11	17.04.1982	17:31:44.20	381.600	321.300	0	4,5	0	0		0	4,5	Ke	CESMECIK-KADINHANI (KONYA)
12	4.04.1970	12:06:04.70	389.000	303.000	5	4,5	4,5	0		0	0	Ke	CATKUYU-SINANPASA (AFYONKARAHISAR)
13	29.03.1970	02:37:11.80	390.100	304.000	33	4,6	4,6	0		0	0	Ke	IHSANIYE (AFYONKARAHISAR)
14	29.03.1970	02:27:11.80	390.100	304.000	33	4,7	4,5	4,5	4,7	4,4	4,6	Ke	IHSANIYE (AFYONKARAHISAR)
15	28.03.1970	21:37:04.70	387.000	314.000	5	4,8	4,8	0		0	0	Ke	CUKURCAK-SULTANDAGI (AFYONKARAHISAR)
16	24.04.1969	02:49:37.00	384.000	319.000	26	4,5	4,3	4,3	4,5	4,2	4,4	Ke	YORAZLAR-ILGIN (KONYA)
17	22.06.1956	00:46:53.80	384.800	319.400	40	4,8	4,7	4,6	4,8	4,6	4,7	Ke	TEKELER-ILGIN (KONYA)
18	16.07.1946	19:45:30.50	386.300	311.500	40	5,3	5	5	5,3	5,1	5,1	Ke	EBER-CAY (AFYONKARAHISAR)
19	21.02.1946	15:43:12.20	382.400	317.900	60	5,6	5,4	5,3	5,6	5,5	5,4	Ke	SEBİLLER-ILGIN (KONYA)
20	12.01.1931	15:55:34.00	385.000	319.000	30	5,3	5	4,9	5,3	5	5	Ke	GOLYAKA-ILGIN (KONYA)
21	12.01.1931	15:06:12.40	384.700	318.000	20	5,3	5	4,9	5,3	5	5	Ke	KUNDULLU-TUZLUKCU (KONYA)
22	20.11.1924	20:27:45.00	385.500	307.800	10	5,9	5,7	5,6	5,9	5,9	5,6	Ke	INLI-CAY (AFYONKARAHISAR)
23	26.09.1921	09:26:10.10	384.200	317.900	10	5,5	5,3	5,3	5,5	5,4	5,3	Ke	TURSUNLU-TUZLUKCU (KONYA)
24	13.04.1921	04:54:05.00	384.000	318.000	30	5,4	5,1	5,1	5,4	5,2	5,1	Ke	TURSUNLU-TUZLUKCU (KONYA)
25	1.04.1901	00:00:01.00	384.000	314.000	5	5	5	0		0	0	Ke	ATAKENT-AKSEHIR (KONYA)

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Akşehir Fayı KB yönünde 100 km'ye ulaşan uzunluğu ile Batı Anadolu'nun en önemli aktif faylarından biridir. Akşehir fayı, Sultandağı metamorfik masifi ile Akşehir Grabenini dolduran Pliyo-Kuvaterner yaşlı tortullar arasında gelişmiştir. Bölgede temeli oluşturan Sultandağı Masifi daha çok düşük dereceli metamorfiklerden ve meta-sedimanter kayalardan oluşur. Sultandağı metamorfik masifini kuzeyden sınırlayan Akşehir fayı boyunca, topografyada yanal yönde izlenebilen basamaklı yapıların yanı sıra, hidrotermal alterasyon kuşakları ve breşlenme zonları olağan olarak gözlenir.

Akşehir grabenini güneyden sınırlayan Akşehir fayı, bölgedeki en önemli aktif fay segmentini oluşturur. Bu nedenle yörede tarihsel ve aletsel dönemde meydana gelen büyük sayılabilecek depremlerin önemli bir bölümü Akşehir Fay Segmenti üzerinde oluşmuştur.

Akşehir Fayı ve Akşehir Grabeninde aletsel dönemde meydana gelen depremler incelendiğinde Mw 6 dan büyük bir deprem görülmemektedir (<http://www.koeri.boun.edu.tr>). Farklı araştırmacıların tarihsel dönem için yaptıkları çalışmalarda meydana gelen depremlerin Mw olarak 6 nın üstünde olmağı görüşü mevcuttur (Özkaymak ve diğerleri, 2019; Akyüz ve diğerleri, 2006). Akşehir Fayı üzerinde meydana gelen depremleri mal ve can kaybına neden olmasının en büyük nedeni yerel zemin özellikleri ile yapı stoğundaki kalite eksikliği olmalıdır. 2000 ve 2002 yılında Çay ve Sultandağı ilçelerinde meydana gelen 5.9 ve 6.1 büyüklüğünde ki depremlerden sonra, Akşehir Fayı ile ilgili pek çok araştırma ve fay çözümleri yapılmıştır. Bu araştırmalar ve fay çözümleri sonucunda Akşehir fayının normal bir fay olduğu doğrulanmıştır.



Şekil 3. 1900-2020 tarihleri arasında grabende meydana gelen magnetütü 5'ten büyük depremler (<http://www.koeri.boun.edu.tr>, 2020)

KAYNAKLAR

- Aksoy, R., & Bozdağ, A. (2008). Doğanhisar-Hüyük (Konya) arasında Sultandağları Masifinin Yapısal özellikleri. Selçuk Üniversitesi Müh-Mim. Derg., s. 23: 37-45.
- Akyüz, S., Uçarkuş, G., Şatır, D., & Dikbaş, A. (2006). 3 Şubat 2002 Çay depreminde meydana gelen yüzey kırığı üzerinde paleosismolojik araştırmalar. *Yerbilimleri*, 27(1), 41-52.
- Angelier, J. (1994). Fault slip analysis and paleostress reconstruction. P. Hancock (Dü.) içinde, *Continental Deformation: Pergamon Press* (s. 53–100). Oxford.
- Baybura, T. (2017). Bolvadin’de (Afyon-Akşehir Grabeni,Afyon) Gözlenen Yüzey Deformasyonlarının Jeolojik, Jeomorfolojik ve Jeodezik Analizi. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 60 :169-188.
- Boray, A., Şaroğlu, F., & Emre, Ö. (1985). Isparta Büklümünün Kuzey Kesiminde Doğu-Batı Daralma İçin Bazı Veriler. *Jeoloji Mühendisliği*, 9-20.
- Bozkurt, E. (2000). Timing of Extension on the Büyük Menderes Graben, Western Turkey and its Tectonic Implications. E. Bozkurt, J. Winchester, & J. (. Piper içinde, *Tectonics and Magmatism in Turkey and the Surrounding Area*. Geological Society.
- Bozkurt, E. (2001). Neotectonics of Turkey. *Geodinamica Acta* (14), 14:1-3.
- Bozkurt, E., & Park, R. G. (1994). Southern Menderes Massif: an incipient metamorphic core complex in western Anatolia, Turkey. *Journal of the Geological Society*(151), 213-216.
- Bozkurt, E., & Sözbilir, H. (2004). Geology of the Gediz Graben: new field evidence and its tectonic significance. *Geological Magazine* (141), 63–79.
- Cohen, H. A., Dart, C. J., Akyüz, H. S., & Barka, A. (1995). Syn-rift sedimentation and structural development of Gediz and Büyük Menderes Graben, western Turkey. *Journal of the Geological Society*, 152, 629-638.
- Demirkol, C. (1977). Yalvaç-Akşehir dolayının jeolojisi. Konya: Selçuk Üniversitesi.
- Dewey J.F. ve Şengör A.M.C. (1979). Aegean and Surrounding Regions: Complex Multiplate and Continuum Tectonics in A Convergent Zone. *Geological Society of America Bulletin*, 90:84-92.
- Dewey, J. (1988). Extensional Collapse Oforogens. *Tectonics*, 7, 1123-1139.
- Emre, Ö., Duman, T., Doğan, A., Özalp, S., Tokay, F., & Kuşcu, İ. (2003). Surface Faulting Associated with the Sultandağı Earthquake (Mw 6.5) of 3 February 2002, Southwestern Turkey. *Seismological Research Letters*, 74 (4), 382-392.
- Hetzl, R., Ring, U., Akal, C., & Troesch, M. (1995). Miocene NNEdirected extensional unroofing in the Menderes Massif, southwestern Turkey. *Journal of Geological Society*, 52, 639–654. doi: doi:10.1144/gsjgs.152.4.0639.
- <http://www.koeri.boun.edu.tr>. (2020). adresinden alındı.
- Işık, V., G., S., & Cemen, I. (2003). Ductile-brittle transition along the Alas, ehir detachment fault and its structural relationship with the Simav detachment fault, Menderes massif, western Turkey. *Tectonophysics* (374), 1-18.
- Ketin, İ. (1968). Türkiye'nin genel tektonik durumu ile başlıca deprem bölgeleri arasındaki ilişkiler. *MTA Enst. Derg*, s. 71: 129-134.
- Ketin, İ. (1977). Türkiye'nin başlıca orojenik olayları ve paleocoğrafik evrimi. *MTA Ens. Der.*, s. 88: 1-4.
- Koçyiğit, A., & Deveci, Ş. D. (2005). Akşehir-Simav fay sistemi: güneybatı Türkiye’de neotektonik rejimin başlama yaşı ve deprensellik [Akşehir Simav fault system: initiation age of the neotectonic regime and seismicity in the southwestern Turkey. *Deprem Sempozyumu Özler Kitabı*, (s. 26). Kocaeli.
- Koçyiğit, A. (1984). Güneybatı Türkiye ve Yakın Dolayında Levha İçi Yeni Tektonik Gelişim. *Geological Society of Turkey Bulletin*, (27), 1-16.
- Koçyiğit, A., & Özacar, A. (2003). Extensional Neotectonic Regime through the NE Edge of the Outer Isparta Angle, Sw Turkey: New Field and

Seismic Data. Turkish Journal of Earth Sciences (12), 67–90.

Koçyiğit, A., Bozkurt, E., Kaymakç, N., & Şaroğlu, F. (2002). 3 Şubat 2002 Çay (Afyon) Depreminin Kaynağı ve Ağır Hasarın nedenleri Akşehir Fay Zonu. Ankara: Ortadoğu Teknik Üniversitesi.

Koçyiğit, A., Ünay, E., & Saraç, G. (2000). Episodic Graben Formation and Extensional Neotectonic Regime in West Central Anatolia and the Isparta Angle: A Key Study in the Akşehir-Afyon Graben, Turkey.

Koçyiğit, A., Yusufoğlu, H., & Bozkurt, E. (1999). Evidence from the Gediz Graben for episodic two-stage extension in western Turkey. Journal of the Geological Soci-ety(156), s. 605–616.

Koçyiğit, A., Yusufoğlu, H., & Bozkurt, E. (1999). Evidence from the Gediz Graben for Episodic Two-Stage Extension in Western Turkey. Journal of the Geological Society, 156, 605–616.

Le Pichon, X., Chamot-Rooke, C., & Lallemand, S. (1995). Geodetic determination of the kinematics of central Greece with respect to Europe: Implications for Eastern Mediterranean Tectonics. Journal of Geophysical Research, 100, 12675-12690.

McKenzie, D. (1978). Active Tectonics of the Alpine-Himalayan Belt: The Aegean Sea and Surrounding Regions. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 55, 217-254.

McKenzie, D. P. (1972). Active tectonics of the Mediterranean region. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 30: 109-185.

Oral, M. B., Reilinger, R. E., Toksöz, M. N., Kong, R. W., Barka, A. A., Kınık, I., & Lenk, O. (1995). Global positioning system offers evidence of plate motions in eastern Mediterranean. EOS Transac., 76, 9.

Oral, M., Reilinger, R., Toksöz, M., King, R., B. A., Kinik, I., & Lenk, O. (1995). Global Positioning System Offers Evidence of Plate Motions in Eastern., (s. 76:9-11.).

Özer, N. (2006). New information on earthquake history of the Akşehir-Afyon Graben System, Turkey, since the second half of 18th century. 6: 1017–1023.

Özer, N., Altınok, Y. U., Yalçınkaya, E., Altpekin, Ö., Pınar, A., Kanlı, İ., & Şahin, Ş. (2002). 3 Şubat Afyon

(Eber- Çay) Deprem Değerlendirmeleri. İstanbul Üniversitesi Müh. Fak. Yerbilimleri Dergisi, 11-24.

Özkaymak, Ç., Sözbilir, H., Geçievi, M., & Tiryakioğlu, İ. (2019). Late Holocene coseismic rupture and aseismic creep on the Bolvadin Fault, Afyon Akşehir Graben, Western Anatolia. Turkish Journal of Earth Science, 28: 787-804.

Pınar, N., & Lahn, E. (1952). Türkiye Depremleri İzahli Katalogu. Ankara: Bayındırlık Bakanlığı, Yapı ve İmar İşleri Reisliği.

Soysal, H., Sipahioğlu, S., Kolçak, D., & Altınok, Y. (1981). Türkiye ve çevresinin tarihsel deprem kataloğu (MÖ 2100-MS 1900). TÜBİTAK.

Şengör, A. (1980). Türkiye'nin Neotektoniğinin esasları. Türkiye Jeoloji Kurumu Konferans Dizisi, (s. 40). Ankara.

Şengör, A., Görür, N., & Şaroğlu, F. (1985). Strike-slip Faulting and Related Basin Formation in Zones of Tectonic Escape: Turkey as a Case Study, Strike-slip Deformation, Basin Formation, and Sedimentation. Soc. Econ. Paleont. Min. Spec. Pub., 37:227-264.

Taymaz, T., Tan, O., & Yolsal, S. (2008). Türkiye'deki Son Yıkıcı Depremler ve Ege ve Marmara Denizlerinin Aktif Tektoniği. Balkan Ülkelerinde Deprem İzleme ve Sismik Tehlikenin Azaltılması.

Taymaz T., J. J. (1991). Active Tectonics of the North ve Central Aegean Sea. Geophysical Journal International, 106:433-490.

Taymaz, T., & Price, S. (1992). The 1971 May 12 Burdur Earthquake Sequence, SW Turkey: A Synthesis of Seismological and Geological Observations. Geophysical Journal International, 108, 589-603.

Yağmurlu, F., & Şentürk, M. (2005). Güneybatı Anadolu'nun güncel tektonik yapısı. Türkiye Kuvaterner Sempozyumu V (s. 02-03). İstanbul: İTÜ Avrasya Yer Bilimleri Enstitüsü.

yerbilimleri.mta.gov.tr. (2020). adresinden alındı

Yusufoğlu, H. (1998). Palaeo-and Neo-Tectonic Characteristics of Gediz and Küçük Menderes Grabens in West Anatolia. Phd Thesis, Middle East Technical University (unpublished).251 p.

Zanchi, A., & Angelier, J. (1993). Seismotectonic of western Anatolia: regional stress orientation from geophysical and geological data. Tectonophysics, 222, 259-274.

Türkiye’deki İklim Bölgelerine Göre Binalarda Isı Yalıtım Uygulamaları

Ümit ÜNVER¹ , Eren ADIGÜZEL² , Enes ADIGÜZEL³ , Süleyman ÇİVİ⁴ , Khandan ROSHANAËİ⁵ 

¹Yalova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Yalova, 77200, Türkiye

^{2,3,4}Yalova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Yalova, 77200, Türkiye

⁵Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Karabük, 78050, Türkiye

Derleme Makalesi, Geliş Tarihi: 04.10.2020, Kabul Tarihi: 23.11.2020

Özet

Bu çalışmada binalarda ısı yalıtımı hakkında ayrıntılı bir literatür taraması verilmiştir. Binalarda kullanılan ısı yalıtım malzemeleri, uygulama yöntemleri tanıtılmıştır. Isı yalıtım hesaplamalarında kullanılan “Derece-Gün”, “Termoekonomik Optimizasyon” ve “TS 825 Standardı” metotları hakkında karşılaştırmalı bilgiler verilmiştir. Çalışmada Türkiye’nin farklı coğrafi konumlarında, binalarda ısı yalıtımını ve bina duvarlarında değişen koşullara göre EPS, XPS, taş yünü, cam yünü vb. yalıtım malzemelerinden hangilerinin kullanılacağını, kullanılacak malzemenin optimum kalınlık ve geri ödeme sürelerini inceleyen çalışmalar derlenerek tablolar halinde sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Binalarda enerji verimliliği, Binalarda ısı yalıtımı, Isı yalıtım uygulamaları, Enerji verimliliği

Application of Thermal Insulation in Buildings by Climate Zones in Turkey

Abstract

In this study, a detailed literature review about thermal insulation in buildings is given. Thermal insulation materials used in buildings and their application methods are introduced. Comparative information has been compiled on the "Degree-Day", "Thermoeconomic Optimization" and "TS 825 Standard" methods those are used in thermal insulation calculations. In the paper, the studies examining, which insulation materials to use (EPS, XPS, rock wool, glass wool etc.) in buildings envelop, depending on the changing conditions are compiled and presented in tables. The literature review was performed for different geographic locations of Turkey.

Keywords: Energy efficiency in buildings, Thermal insulation in buildings, Thermal insulation applications, Energy efficiency.

¹Sorumlu yazar umit.unver@yalova.edu.tr, ²erena1653@gmail.com, ³enesa3453@gmail.com, ⁴suleymancivi094@gmail.com,

⁵khandan.roshanaei@gmail.com

1. GİRİŞ

Günümüzde gerek küresel ısınmayla ilgili problemler (Al-Sanea, 2002), gerekse enerji temininin ekonomi üzerindeki yükü (Dombaycı vd., 2017) gibi birçok nedenden dolayı enerji verimliliği çalışmaları hayati öneme sahiptir. Enerji verimliliği çalışmalarıyla toplam karbon ayak izi düşürülemezse, gelecek nesillere ne insani yaşam standartlarına sahip bir ülke, ne de içinde yaşanılabilir bir dünya bırakmamız mümkündür. Sürdürülebilir bir dünya için enerji verimliliği çalışmalarının, en yüksek enerji tüketen sektörden başlaması tavsiye edilmektedir. Bu sektör de çöl ikliminden (Al-Sanea vd., 2012) ılıman iklime kadar (Arena ve De Rosa, 2003) farklı iklimlere sahip Dünya'nın birçok bölgesinde bina sektörü olarak belirlenmiştir. Literatürde, toplam enerji kullanımı içerisinde binaların payının Avrupa'da %40 (De Alegría Mancisidor vd., 2009), İngiltere'de %50 (Arena ve De Rosa, 2003), Filistin'de %60 dan fazlası olduğu belirtilmektedir. CO₂ salımında toplam emisyonun %70 inin insani aktivitelerden (UNEP, 2009), Avrupa birliği ülkelerinde salımının %40 daha fazlasının ise bina sektöründen (Dimoudi ve Tompa, 2008; Cabeza, 2010) kaynaklandığı belirtilmektedir. Bu yüzden Avrupa birliği mevzuatına "20-20-20" direktifi eklenmiş ve %20 enerji verimliliği ve %20 CO₂ emisyonlarının azaltılması talimatı verilmiştir (Rodríguez-Soria, 2015).

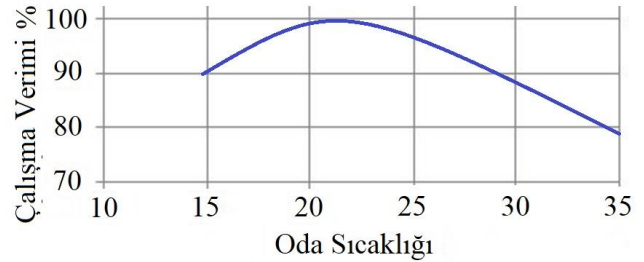
Ülkemizde de enerjinin büyük bir kısmı binalarda tüketilmektedir ve bu enerjinin %80'i ısıtma soğutma amaçlı kullanılmaktadır (Gürel ve Cingiz, 2011). Enerjinin en çok tüketildiği sektörde (bina sektörü) en fazla enerji iklimlendirme amaçlı kullanıldığından, yalıtımla enerji verimliliğinde yapılacak olan en küçük iyileştirmenin toplam enerji verimliliği ve toplam karbon ayak izi üzerindeki yaygın etkisinin önemli olacağı belirtilmektedir (Gölcü vd., 2006). Bu yüzden, bu çalışmada binalarda yalıtım konusu ele alınmıştır.

Isı yalıtımı, uygun şekilde uygulandığında ısı akış hızını yavaşlatan malzeme veya malzemeler kombinasyonudur. Yalıtım malzemeleri, yüksek ısı direnci nedeniyle binaya giren veya binadan çıkan ısı akışını engeller veya azaltır (ASHRAE, 2001). Özellikle zorlu iklim koşullarına sahip bölgelerde bulunan binalarda, enerji verimliliğini artırma yönünde önemli katkı sağlar (Al-Sanea, 2012; Al-Homoud, 2001). Isı yalıtımında belirlenen en ekonomik yalıtım kalınlığı, toplam maliyetin minimum noktasına karşılık gelen kalınlıktır (optimum yalıtım kalınlığı) (Gürel ve Cingiz, 2011). Bununla birlikte, Türkiye'de her iklim koşulunda uygulanacak yalıtım kalınlıkları TS 825 Standardında

belirtilmektedir. TS 825 (2008) Standardının amacı, binaların iklimlendirme için harcadıkları enerjide tasarruf sağlamak ve gerekli enerjinin hesaplanması konusunda kullanılacak olan standart hesap metodunu ve değerlerini tarif etmektir.

Binalarda iklimlendirme, ısı konforu sağlamak amacıyla yapılır. Isıl konfor, kişinin bulunduğu çevreyle ilgili bir sorunu-şikâyeti olmaması hali veya insanın sıhhatli ve üretken olabileceği ısı parametrelerin sağlanması olarak açıklanabilir (İşbilir, 2009). Isıl konforu tahmin etmek için ısı ortam hakkında doğru bilgiye ihtiyaç vardır. Sıcaklık, hız ve nem kabaca ısı ortamı temsil edebilir (Kaynaklı vd., 2003). Aynı mekânda bulunan insanlar aynı derecede memnuniyete sahip değildir. Çünkü ısı konforu, öznel bir değerlendirme olup hisler ve duygulara dayanmaktadır (Kaynaklı vd., 2003). Isıl konforun 6 parametreye sahiptir. Bunlar çevresel ve kişisel parametreler olarak ikiye ayrılır. Havanın sıcaklığı, izafi nemi, hızı ve ortalama ışınım sıcaklığı çevresel parametrelerdir ve kişinin hareketlilik düzeyi ve giysi direnci kişisel parametrelerdir (Kaynaklı vd., 2002). Kapalı alanda bulunan kişilerin ruh hallerinin iyi ve çalışma kapasitelerinin maksimum olmasını sağlayan şartlara "konfor aralığı" denir (Al-Sanea vd., 2012). Kabul edilebilir oda hava sıcaklığı yaz aylarında 21-22 °C, kış aylarında ise 20-21 °C'dir (İşbilir, 2009). Oda sıcaklığının çalışma verimine etkisi diyagram Şekil 1.'de verilmiştir (Seppanen, 2006).

Konfor aralığı; odada bulunan havanın sıcaklığı, çevredeki yüzeylerinin sıcaklığı (Öztürk, 2011; Mcquiston, 2000), havadaki nemi ve hava hızı ile karakterize edilmektedir. Konfor aralığının sağlanmasındaki önemli parametrelerden biri iç yüzey sıcaklığıdır. Tablo 1'de çeşitli konfor durumları için iç ortam sıcaklığı ile iç yüzey sıcaklığı arasındaki ilişki görülmektedir (Usta, 2009).



Şekil 1. Sıcaklığın çalışma verimine etkisi (Seppanen, 2006)

Tablo 1. İç ortam (Ti) ve İç yüzey (Ty) sıcaklıkları arasındaki farka göre konfor şartları (Usta, 2009)

Ti-Ty	Konfor Durumu
2	Çok konforlu
3	Konforlu
4	Az konforlu
6	Konforsuz
8,5	Soğuk
>8,5	Çok soğuk

İç ortam sıcaklığı ile iç yüzey sıcaklığı farkının 2-3 °C olması, konfor hissiyatı oluşturmaktadır. İç ortam sıcaklığı ile iç yüzey sıcaklığı farkının 6 °C'nin üzerinde olması durumunda konfor hissiyatından söz edilememektedir. Binalarda yeterli yalıtım yapılmazsa ısı konfor sağlanamamakta, bu da harcanan yakıtın yalnızca binayı değil atmosferi de ısıtmasına ve gereğinden fazla yakıt harcanmasına neden olmakta, binanın kullanım maliyetini yükseltirken, aynı zamanda yakıtların atmosfere saldıkları, sağlığı tehdit eden gazlarla, çevrede oluşacak kirlilikte artışa neden olmaktadır (Sezer, 2005).

2. UYGULAMA YERİNE GÖRE YALITIM ÇEŞİTLERİ

İzolasyon malzemeleri ısı akışına engel olduğu için, binalarda doğru izolasyon ile önemli ölçüde maliyet tasarrufu sağlanabilir. Bina bölümlerinde uygulanabilecek yalıtım çeşitleri ve bazı önemli uygulama esasları aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

2.1. Döşemelerde ısı yalıtımı

Toprak zeminle temas halindeki döşemelerde, asmolen tavan, ara bölgede bulunan döşemelerde ve döşemelerde ısıtılamayan hacim üstü bölgelere uygulanan ısı yalıtım çeşididir. Dikkat edilmesi gereken hususlar döşemedeki beton yüzeyinin düzgün ve temiz olması, toz ve atıklardan arındırılmasıdır. Isı yalıtımı için seçilecek olan yalıtım malzemesinin yeterli düzeyde bası gerilmesine karşı dirence sahip olması gerekmektedir (TCCŞB, 2015).

2.2. Dış duvarda ısı yalıtımı

Binanın dış duvarlarındaki dış veyahut iç bölgelerden ısı yalıtımının gerçekleştirilmesidir. Yalıtım levhaları arasında boşluk kalmamasına önem gösterilmelidir. Yaz aylarında yalıtımlı duvar iç yüzey sıcaklığı ile yalıtımsız duvar iç yüzey sıcaklığı arasında 17–18 °C civarı bir fark meydana gelmektedir (Çengel, 1998; Incropera, 2001).

Tablo 2. Binalarda ısı kayıp yerleri ve oranları (Aşkadar, 2005, Altınışik, 2006)

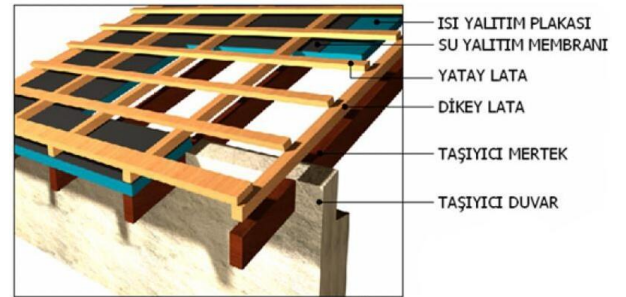
	Çok Katlı Bina	Tek Katlı Bina
Dış Duvar	40%	25%
Pencere	30%	20%
Çatı	7%	22%
Bodrum	6%	20%
Döşemesi		
Hava Kaçığı	17%	13%

2.3. Tavan arası yalıtım

Çatılarda kullanılan ısı yalıtım malzemeleri üç farklı şekilde uygulanabilir; mertek arasına, mertek üzerine, mertek altına.

2.4. Pencerelerde ısı yalıtımı

Düz cam üniteleri, artık yerlerini çift veya üçlü cam ünitelerine sahip olan ısı-güneş kontrol kaplamalı ve ısı kontrol kaplamalı ünitelere devretmektedir. Isı-güneş kontrol kaplamalı olan cam ünitelerin kullanımı sayesinde pencerelerde oluşacak ısı kaybı, standart çift camlı ünitelerle kıyaslandığında önemli oranda azalma sağlamaktadır.



Şekil 2. Mertek arasına, mertek altına, mertek üzerine yalıtım

Binalarda meydana gelen ısı kayıpları dış duvar, pencere, çatı, bodrum döşemesi ve hava kaçağı olmak üzere 5 yerde incelenebilir. Binaların farklı yerlerinde meydana gelen ısı kayıplarının oranları, binaların çok katlı veya tek katlı olmasına göre farklılık gösterebilir (Kürekçi, 2016; Yıldız vd., 2008).

3. ISI YALITIMINDA KULLANILAN MALZEME ÇEŞİTLERİ

Yalıtımda kullanılacak yerlere göre birçok malzeme çeşidi mevcuttur (TS 7316 EN 13163/AC, 2009; TS 901-1 EN13162, 2005). Yalıtım malzemeleri inorganik, organik, kombine ve yeni teknoloji maddeleri olmak üzere 4 farklı sınıfta sınıflandırılır (Papadopoulos, 2005). Malzemeyi ısı yalıtımında kullanılabilen bir malzeme olarak tanımlayabilmek için, CEN Standardı veya ISO Standardı esas alınarak, ısı iletkenlik katsayısının 0,065 W/m.K 'den küçük olması gerekir (Şimşek, 2019; Özer, 2006). Isı yalıtım malzemeleri, ısı depolama alanı değildir (Al-Sanea, 2011). Yalıtımda kullanılacak olan malzemenin sahip olduğu ısı iletkenlik katsayı değeri ile malzemenin ısı geçişine karşı gösterdiği direnç ters orantılıdır. Isı yalıtım malzemelerinde uygulandıkları alanlara göre farklı özellikler aranmaktadır. Bunlar malzemenin yoğunluğu, ısı iletkenlik katsayısı, yangın sınıfı, mekanik dayanımı, sıcaklık dayanımı, su emme kapasitesi, buhar difüzyon direnci ve boyutsal kararlılıktır (Şimşek, 2019; Şimşek, 2019; Özer, 2006). Tablo 3'de İşbilir (2009) ve Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından verilen ısı yalıtım malzemelerinin ısı iletkenlik katsayıları karşılaştırılmıştır.

Tablo 3'te verilen cam yünü ve ahşap yünü ısı iletim katsayısı, iki kaynakta da farklılıklar göstermektedir. Taş yünü, EPS, XPS malzemelerinin ısı iletkenlik katsayıları ise uyum içerisindedir. Tablo 4'de bazı ısı yalıtım malzemelerinin çeşitli parametreler yardımı ile karşılaştırılması yapılmıştır.

Su buharı difüzyon direnç katsayısı düşük olan malzemeler (cam yünü, taş yünü) su buharının ve nemin dışarı çıkışına karşı herhangi bir direnç göstermezler. Su buharı difüzyon direnç katsayısı yüksek olan XPS malzemesi ise nemin dışarı çıkmasına izin verir ancak taş yünü ve cam yününe göre daha fazla direnç gösterir. Isıl iletkenlik katsayısına bakıldığında XPS malzemesinin yalıtım için cam yünü ve taş yünü malzemelere göre daha avantajlı olduğu görülmektedir buna karşı XPS'nin sıcaklık dayanımı taş yününe göre daha azdır.

Tablo 3. Günümüzde en sık tercih edilen ısı yalıtım malzemelerinin ısı iletkenlik katsayıları

Malzemeler	Isıl İletkenlik Katsayısı (İşbilir, 2009; Özenç, 2007)	Isıl İletkenlik Katsayısı (TCÇŞB, 2015)
Cam Yünü	0,004	0,035-0,050
Taş Yünü	0,04	0,05-0,050
EPS	0,04	0,035-0,040
XPS	0,028-0,031	0,030-0,040
Ahşap yünü	0,09-0,15	0,035-0,076

Tablo 4. Isı yalıtım malzemelerinin çeşitli parametreler ile karşılaştırılması

	Cam Yünü (Özer, 2006)	Taş Yünü (Özenç, 2007)	XPS (RG, 2008)	Cam Köpüğü (Uzun, 2013)
Yoğunluk (kg/m ³)	14-100	30-150	25-48	100-200
Isıl İletkenlik Değeri (W/m.K)	0,04	0,04	0,03	0,052
Sıcaklık Dayanımı (°C)	-50/+250	650-1000	-50/+75	-260/+430
Su Buharı Difüzyon Direnç Katsayısı (μ)	1	1	80-225	10000

Tablo 5. Isı yalıtım malzemelerinin farklı bina yapıda kullanımı (Şimşek, 2019)

Yapı Bölmesi	XPS	EPS	Taş yünü	Cam yünü	Gaz beton
Bodrum Kat Tabanı	Basınç Dayanımı Açısından En Uygun ve En Fazla Tercih Edilen Malzeme	Yeterli Basınç Dayanımı Sağlamıyor	Yeterli Basınç Dayanımı Sağlamıyor. Ekonomik Değil.	Tercih Edilmiyor Yeterli Basınç Dayanımı Sağlamıyor	Tercih Edilmiyor Fazla Alan Kaybına Neden Olur Ekonomik Değil.
Teras Çatılar	Yaygın Olarak Tercih Edilen Malzeme	Üzerinde Gezinilmeyen Çatılarda Kullanımı Uygun. (Basınç Dayanımı Düşük Malzeme)	Suya Karşı Korunmalı Gezinilmeyen Teras Çatılar İçin Daha Uygun	Suya Karşı Korunmalı. Gezinilmeyen Teras Çatılar İçin Daha Uygun	Tercih Edilmemekte
Döşemeler	Uygun	Yeterli Basınç Dayanımı Sağlamıyor. Ezilebilir.	Yeterli Basınç Dayanımı Sağlamıyor Aşşap Elemanlar İle Ezilmesi Engellenmeli Ekonomik Değil	Yeterli Basınç Dayanımı Sağlamıyor. Aşşap Elemanlar İle Ezilmesi Engellenmeli Ekonomik Değil	Uygun Değil
Cepheler (28.50 M'nin Altında)	Yangın Yönetmeliğine Göre Uygun Değil	Yangın Yönetmeliğine Göre B1 Sınıfına Sahip Sertifikası Olan EPS'nin Kullanımı Uygunudur.	Uygun	Uygun	Uygun
Cepheler (28.50 Üzerinde)	Yangın Yönetmeliğine Göre Uygun Değil	Yangın Yönetmeliğine Göre Uygun Değil	Uygun	Uygun	Uygun
Zemin Kotu Üzerindeki 1.5 M Mesafe	Yangın Yönetmeliğine Göre Uygun Değil	Yangın Yönetmeliğine Göre Uygun Değil	Uygun	Uygun	Uygun
Bina Yüksekliği 6.50 M'den Fazla Olan Binalarda Pencere ve Benzeri Boşluklarının Yan Kenarları	Yangın Yönetmeliğine Göre Uygun Değil	Yangın Yönetmeliğine Göre Uygun Değil	Uygun	Uygun	Uygun
Eğimli Çatılar	Uygun	Uygun	Yangın yalıtımı sağladığı için tercih edilmekte Suya karşı korunmalı	Yangın yalıtımı sağladığı için tercih edilmekte Suya karşı korunmalı	Tercih edilmemekte
Farklı Yüksekliğe Sahip Bitişik Nizamdaki Yapılarda, Alçak Binanın Çatı Hızasındaki Yüksek Bina Katının Dış Cephe Kaplaması	Yangın Yönetmeliğine Göre Uygun Değil	Yangın Yönetmeliğine Göre Uygun Değil	Uygun	Uygun	Uygun

4. ISI YALITIMININ HESAPLANMA METOTLARI

Isı yalıtımının hesaplanması için en sık kullanılan üç yöntem;

- i. Derece-gün (ömür-maliyet optimizasyonu),
- ii. Termoeconomik optimizasyon,
- iii. TS 825 Standardıdır.

- Isı yalıtımının yanında ses ve yangın yalıtımlarının da gerekli olup olmadığı,
- Kullanılacak yalıtım malzemesinin bulunduğu ortam koşullarındaki ömrü,
- Bina yalıtımıyla ilgili prosedürlere/yönetmeliklere uygunluğudur.
- Binalarda ısı yalıtımı hesaplanırken bu parametreler de dikkate alınırsa enerji verimliliği en iyi şekilde sağlanmış olur.

5. TÜRKİYE'DE ÇEŞİTLİ İLLERDE GERÇEKLEŞTİRİLEN ISI YALITIM ÇALIŞMALARI

Tablo 6'da Türkiye'nin bütün iklim bölgeleri için gerçekleştirilmiş, farklı yakıt türleri için hesaplanan optimum yalıtım kalınlığını inceleyen çalışmaların sonuçları sunulmuştur. Değerlendirilen çalışmalar arasında en düşük yalıtım kalınlığı 0,0022 m XPS malzemesi ile kömür kullanımı durumunda Aydın için, en yüksek yalıtım kalınlığı ise 0,314 m EPS malzemesi ile LPG kullanımı durumunda Sivas için tespit edilmiştir. Tablo 6, hesaplama yapılan her bir il için kıyaslama yapılabilmesi için mümkün olduğu kadar alternatifli olarak verilmiştir. Örneğin (Uçar ve Balo, 2009) Aydın için optimum izolasyon kalınlığı 0,0022 m = 2,2 mm olarak, Bolattürk, (2006) de 0,041 m = 41 mm ve Fertelli (2013) te de 0,035 m = 35 mm olarak verilmektedir. Burada Fertelli (2013) ve Bolattürk (2006) arasında %150 ye yakın fark bulunmaktadır. Bununla birlikte kıyaslanabilir büyüklüklerdir. Ancak (Uçar ve Balo, 2009) nolu referansta verilen 2,2 mm'lik polistren plaka kalınlığı ne piyasa şartlarını yansıtan gerçekçi ne de mühendislik açısından anlamlı bir ölçüdür. Bu çalışmada bahsedilen yalıtım kalınlığını uygulamadan önce diğer kaynaklara başvurmakta fayda vardır.

Aydın için yapılan çalışmalarda meydana gelen farkın en önemli sebeplerinden biri, optimum yalıtım kalınlığı hesaplanırken, bölgenin Derece Gün sayısı, yakıt fiyatı, yalıtım malzemesinin fiyatı ve yakıtın alt ısı değerlerinin göz önüne alınmış olmasıdır.

Literatür araştırmasında örnek alınan makalelerde, ısı kaybı hesaplarında kullanılan derece gün sayısı, iç ortam sıcaklığının 15 °C den itibaren 24 °C ye kadar farklı sıcaklıklar kullanılmasıyla değişmektedir. DG hesaplanırken dış ortam sıcaklığı da sonucu değiştirmektedir. Benzer şekilde yakıt ve hammaddesi ithal edilen polistren yalıtım malzemesinin maliyeti de hem dünyadaki petrol fiyatlarına hem de Türkiye'deki döviz kuruna bağlı olarak değişmektedir. Yakıtın alt ısı

değeri kömür haricindeki diğer yakıtlar için yaklaşık kabul edilmektedir. Ancak yerli ve ithal kömür arasında yakıtın alt ısı değeri açısından önemli ölçüde fark bulunmaktadır. Tablo 6 de ele alınan makalelerde gözlenen bu değişiklikler sonuca ciddi oranda tesir etmektedir. Bu yüzden de literatürde yer alan bilgilerin alternatifli olarak incelenmesi ve mümkünse bu makalede olduğu gibi detaylı literatür taramalarından kıyaslamalı olarak ele alınmasının daha doğru olduğu değerlendirilmektedir.

Tablo 6'da dikkati çeken bir başka önemli nokta: bütün çalışmalarda elde edilen yalıtım kalınlığı değerleri birbirleriyle farklılıklar gösterse de, yakıtı göre optimum yalıtım kalınlığı sıralaması aynıdır. Diğer bir deyişle, bütün çalışmalar en kalın yalıtımın LPG, daha sonra sırasıyla elektrik, fuel-oil, doğalgaz ve yerli kömür için gerekli olduğu konusunda birbirini tasdik etmektedir. Tablo 7'de yalıtımın geri ödeme süreleri verilmiştir. Burada sunulan sonuçlar, optimum yalıtım kalınlığı analizinde elde edilen sonuçlara paralel olarak en kısa geri ödeme süresinin LPG kullanılan durumda ve en uzun geri ödeme süresinin yerli kömür kullanıldığı durumda sağlandığı tespit edilmektedir.

Farklı yakıt türlerinin incelendiği çalışmalarda genellikle ısıtma DG durumu dikkate alınmıştır. Bunun doğal bir sonucu olarak soğuk iklimlerin geri ödeme süreleri sıcak iklimdeki illere göre daha kısa olmaktadır. Geri ödeme süresi en kısa olan durum, doğal gaz kullanım durumunda Erzurum'da cam yünü ile yapılan yalıtımda 0,07 yıl olarak belirlenmiştir (Tolun, 2010). Bu süre yaklaşık 26 güne denk gelmektedir. Bu sonuca göre Erzurum'da yapılacak olan yalıtım yatırımı, yalıtılacak mahallin ısıtılması için gereken 1 aylık yakıt masrafindan kısa olmaktadır. Tolun (2010) a göre, taş yünü ve EPS ile yapılan yalıtımların geri ödeme süreleri de sırasıyla 36 ve 72 gün olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar mantıklı ve anlamlı değerler değildir. Yalıtımın bu sonuçlar göz önüne alınarak yapılmaması, diğer bilimsel çalışmaların da değerlendirilmesi ve kıyaslanması gerekmektedir. Tablo 7'ye göre en uzun geri ödeme süresi ise XPS ile yalıtılan bina için doğalgaz kullanılması durumunda 4,5 yılla İskenderun olarak belirlenmiştir (Uçar ve Balo, 2009). Ilıman bir iklime sahip olan İskenderun bölgesi için Isıtma DG değeri de küçük olduğundan, geri ödeme süresi oldukça uzun olmaktadır. Ancak tabii ki, yaz aylarında soğutma yapılan dönemlerde de yalıtım büyük önem arz etmektedir. Soğuk iklimlerde kışın ısıtma ne kadar maliyetli ise, sıcak iklimlerde de yazın yapılan soğutma o derece maliyetlidir. Bu yüzden iki bölge arasında karar verirken yalnızca ısıtma DG te değil soğutma DG e göre de analiz yapmak gerekmektedir.

Tablo 6. Yalıtım malzeme çeşitlerinin, illere ve yakıt türüne göre optimum yalıtım kalınlıkları (m)

<i>Şehirler</i>	XPS					EPS					Taş Yünü					Cam Yünü				
	Doğalgaz	Kömür	Fuel-Oil	LPG	Elektrik	Doğalgaz	Kömür	Fuel-Oil	LPG	Elektrik	Doğalgaz	Kömür	Fuel-Oil	LPG	Elektrik	Doğalgaz	Kömür	Fuel-Oil	LPG	Elektrik
Adana (Bolattürk, 2008)	-	-	-	-	0,04- 0,02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Adana (Bolattürk,2006)	0,024	0,031	0,055	0,067	0,060	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ağrı (Uçar ve Balo, 2009)	0,0314	0,0261	0,0619	0,0764	0,0648	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ağrı (Bolattürk,2006)						0,070	0,083	0,133	0,155	0,142	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ankara (Tolun, 2010)	-	-	-	-	-	0,038	-	-	-	-	0,050	-	-	-	-	0,113	-	-	-	-
Ankara (Kurekci, 2016)	-	-	-	-	-	0,076	0,062	0,112	0,168	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ankara (Yıldız vd., 2008)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,05	0,05	0,12	0,1	0,12	0,075	0,06	0,06	0,1	0,1
Antalya (Aktemur, 2018)	-	-	-	-	-	0,08	0,092	-	0,16	-	-	-	-	-	-	0,08	0,092	-	0,158	-
Antalya (Bolattürk, 208)	-	-	-	-	0,032- 0,025	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Antalya (Tolun, 2010)	-	-	-	-	-	0,016	-	-	-	-	0,021	-	-	-	-	0,058	-	-	-	-
Antalya (Bolattürk,2006)	0,030	0,037	0,065	0,078	0,070	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ardahan (Bolattürk,2006)	0,079	0,093	0,147	0,172	0,158	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Aydın (Bolattürk, 2008)	-	-	-	-	0,033- 0,027	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Aydın (Uçar ve Balo, 2009)	0,0050	0,0022	0,0210	0,0286	0,0225	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Aydın (Bolattürk,2006)	0,033	0,041	0,071	0,084	0,076	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Şehirler	XPS					EPS					Taş Yünü					Cam Yünü				
	Doğalgaz	Kömür	Fuel-Oil	LPG	Elektrik	Doğalgaz	Kömür	Fuel-Oil	LPG	Elektrik	Doğalgaz	Kömür	Fuel-Oil	LPG	Elektrik	Doğalgaz	Kömür	Fuel-Oil	LPG	Elektrik
Aydın (Fertelli, 2013)	0,020	0,035	0,065	0,081	0,067	-	-	-	-	-	0,000	0,013	0,042	0,057	0,043	-	-	-	-	-
Balıkesir (Kon, 2017)	0,050	0,051	0,073	0,100	-	0,071	0,072	0,103	0,139	-	-	-	-	-	-	0,097	0,099	0,138	0,185	-
Bursa (Sisman, 2007)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,047	-	-	-	-	-	-	-	-
Denizli (Dimoudi ve Tompa, 2008)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,048	0,082	-	-	-	-	-	-	-
Denizli (Dombaycı vd, 2006)	-	-	-	-	-	0,076	0,095	0,138	0,174	0,259	0,032	0,043	0,068	0,089	0,138	-	-	-	-	-
Elazığ (Ucar ve Balo, 2009)	0,0182	0,0190	0,0360	0,0551	0,0448-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Erzincan (Çomaklı ve Yüksel, 2003)	-	-	-	-	-	-	0,0851	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Erzincan (Bolattürk, 2006)	0,058	0,070	0,113	0,132	0,121	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Erzurum (Tolun, 2010)	-	-	-	-	-	0,059	-	-	-	-	0,077	-	-	-	-	0,165	-	-	-	-
Erzurum (Çomaklı ve Yüksel, 2003)	-	-	-	-	-	-	0,1048	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Erzurum (Sisman, 2007)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,080	-	-	-	-	-	-	-	-
Erzurum (Kurekci, 2016)	-	-	-	-	-	0,109	0,130	0,158	0,232	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Eskişehir (Sisman, 2007)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,061	-	-	-	-	-	-	-	-
Eskişehir (Ünalın vd., 2006)	0,056	-	-	-	-	0,07	-	-	-	-	0,04	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Şehirler	XPS					EPS					Taş Yünü					Cam Yünü				
	Doğalgaz	Kömür	Fuel-Oil	LPG	Elektrik	Doğalgaz	Kömür	Fuel-Oil	LPG	Elektrik	Doğalgaz	Kömür	Fuel-Oil	LPG	Elektrik	Doğalgaz	Kömür	Fuel-Oil	LPG	Elektrik
Hakkâri (Ünalın vd., 2006)	0,061	0,073	0,118	0,138	0,126	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hatay (Anber ve Çelik, 2014)	0,04	0,04	-	-	-	0,02	0,03	-	-	-	0,03	0,04	-	-	-	0,04	0,05	-	-	-
Hatay (Bolattürk, 2008)	-	-	-	-	0,034-0,026	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Isparta (Bolattürk,2006)	0,054	0,064	0,105	0,123	0,113	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
İskenderun (Bolattürk, 2008)	-	-	-	-	0,037-0,016	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
İskenderun (Bolattürk,2006)	0,019	0,024	0,046	0,056	0,050	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
İstanbul (Tolun, 2010)	-	-	-	-	-	0,028	-	-	-	-	0,037	-	-	-	-	0,088	-	-	-	-
İstanbul (Bolattürk,2006)	0,043	0,052	0,087	0,103	0,094	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
İstanbul (Kurekci, 2016)	-	-	-	-	-	0,060	0,073	0,091	0,137	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
İzmir (Bolattürk, 208)	-	-	-	-	0,032-0,027	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
İzmir (Sisman, 2007)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,033	-	-	-	-	-	-	-	-
İzmir (Kon, 2017)	0,044	0,045	0,062	0,081	-	0,064	0,065	0,086	0,114	-	-	-	-	-	-	0,084	0,089	0,118	0,152	-
İzmir (Kurekci, 2016)	-	-	-	-	-	0,042	0,052	0,066	0,101	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
İzmir (Yıldız vd., 2008)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,03	0,00	0,06	0,05	0,1	0,03	0,03	0,1	0,075	0,1
Kars (Çomaklı ve Yüksel, 2003)	-	-	-	-	-	-	0,107	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kars (Kon, 2017)	0,070	0,072	0,107	0,147	-	0,099	0,101	0,149	0,203	-	-	-	-	-	-	0,133	0,136	0,197	0,267	-

Şehirler	XPS					EPS					Taş Yünü					Cam Yünü				
	Doğalgaz	Kömür	Fuel-Öil	LPG	Elektrik	Doğalgaz	Kömür	Fuel-Öil	LPG	Elektrik	Doğalgaz	Kömür	Fuel-Öil	LPG	Elektrik	Doğalgaz	Kömür	Fuel-Öil	LPG	Elektrik
Kocaeli (Ucar ve Balo, 2009)	0,0106	0,0113	0,0252	0,0408	0,0324	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Konya (Aktemur, 2018)	-	-	-	-	-	0,12	0,147	-	0,286	-	-	-	-	-	-	0,119	0,145	-	0,282	-
Konya (Kon, 2017)	0,057	0,059	0,086	0,127	-	0,081	0,083	0,121	0,177	-	-	-	-	-	-	0,110	0,112	0,161	0,233	-
Malatya (Fertelli, 2013)	0,044	0,065	0,109	0,131	0,110	-	-	-	-	-	0,022	0,042	0,084	0,105	0,085	-	-	-	-	-
Manisa (Bolattürk,2006)	0,036	0,044	0,075	0,089	0,081	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mardin (Bolattürk,2006)	0,047	0,057	0,094	0,111	0,101	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mersin (Bolattürk, 208)	-	-	-	-	0,034-0,020	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Nevşehir (Kurekci, 2016)	0,059	0,070	0,114	0,133	0,122	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sivas (Aktemur, 2018)	-	-	-	-	-	0,129	0,16	-	0,314	-	-	-	-	-	-	0,128	0,158	-	0,309	-
Sivas (Kon, 2017)	0,061	0,062	0,092	0,126	-	0,085	0,087	0,129	0,176	-	-	-	-	-	-	0,116	0,118	0,171	0,232	-
Sivas (Kurekci, 2016)	-	-	-	-	-	0,089	0,107	0,130	0,193	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sivas (Fertelli, 2013)	0,058	0,084	0,135	0,162	0,137	-	-	-	-	-	0,036	0,060	0,109	0,134	0,111	-	-	-	-	-
Trabzon (Bolattürk,2006)	0,040	0,049	0,082	0,097	0,089	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Trabzon (Fertelli, 2013)	0,031	0,049	0,085	0,104	0,086	-	-	-	-	-	0,009	0,027	0,061	0,079	0,062	-	-	-	-	-
Şanlıurfa (Aktemur, 2018)	-	-	-	-	-	0,107	0,121	-	0,205	-	-	-	-	-	-	0,107	0,121	-	0,205	-
Uşak (Bolattürk,2006)	0,048	0,058	0,096	0,112	0,103	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tablo 7. Yalıtım malzeme çeşitlerinin, illere ve yakıt türüne göre geri ödeme süreleri (yıl)

Şehirler	XPS					EPS					Taş Yünü					Cam Yünü				
	Doğalgaz	Kömür	Fuel-Oil	LPG	Elektrik	Doğalgaz	Kömür	Fuel-Oil	LPG	Elektrik	Doğalgaz	Kömür	Fuel-Oil	LPG	Elektrik	Doğalgaz	Kömür	Fuel-Oil	LPG	Elektrik
Adana (Bolattürk, 208)	-	-	-	-	3.39-4.87	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Adana (Bolattürk,2006)	3.50	2.86	1.91	1.74	1.83	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ağrı (Ucar ve Balo, 2009)	2.50	2.48	2.15	1.87	2.01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ağrı (Bolattürk,2006)	1.70	1.58	1.35	1.29	1.32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ankara (Tolun, 2010)	-	-	-	-	-	0.38	-	-	-	-	0.18	-	-	-	-	0.12	-	-	-	-
Ankara (Kurekci, 2016)	-	-	-	-	-	2.02	1.73	1.46	1.03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Antalya (Aktemur, 2018)	-	-	-	-	-	2.60	0.70	-	0.22	-	-	-	-	-	-	1.84	0.61	-	0.20	-
Antalya (Bolattürk, 208)	-	-	-	-	3.81-4.39	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Antalya (Tolun, 2010)	-	-	-	-	-	0.96	-	-	-	-	0.46	-	-	-	-	0.30	-	-	-	-
Antalya (Bolattürk,2006)	2.91	2.47	1.76	1.62	1.70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ardahan (Bolattürk,2006)	1.61	1.51	1.31	1.26	1.29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Aydın (Bolattürk, 208)	-	-	-	-	3.74-4.15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Aydın (Ucar ve Balo, 2009)	3.15	3.13	2.80	2.52	2.66	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Aydın (Bolattürk,2006)	2.68	2.31	1.69	1.57	1.64	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Şehirler	XPS					EPS					Taş Yünü					Cam Yünü				
	Doğalgaz	Kömür	Fuel-Oil	LPG	Elektrik	Doğalgaz	Kömür	Fuel-Oil	LPG	Elektrik	Doğalgaz	Kömür	Fuel-Oil	LPG	Elektrik	Doğalgaz	Kömür	Fuel-Oil	LPG	Elektrik
Bursa (Sisman, 2007)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.28	-	-	-	-	-	-	-	-
Denizli (Dimoudi ve Tompa, 2008)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.40	1.60	-	-	-	-	-	-	-
Denizli (Dombaycı vd, 2006)	-	-	-	-	-	1.55	1.43	1.29	1.22	1.15	3.03	2.39	1.81	1.60	1.37	-	-	-	-	-
Elazığ (Ucar ve Balo, 2009)	2.75	2.74	2.40	2.13	2.27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Erzincan (Çomaklı ve Yüksel, 2003)	-	-	-	-	-	-	1.58	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Erzincan (Bolattürk,2006)	1.86	1.70	1.41	1.35	1.38	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Erzurum (Tolun, 2010)	-	-	-	-	-	0.21	-	-	-	-	0.10	-	-	-	-	0.07	-	-	-	-
Erzurum (Çomaklı ve Yüksel, 2003)	-	-	-	-	-	-	1.45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Erzurum (Sisman, 2007)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.54	-	-	-	-	-	-	-	-
Erzurum (Kurekci, 2016)	-	-	-	-	-	1.50	1.29	1.88	0.77	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Eskişehir (Sisman, 2007)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.89	-	-	-	-	-	-	-	-
Eskişehir (Bolattürk,2006)	1.91	1.74	1.43	1.36	1.40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hakkâri (Bolattürk,2006)	1.81	1.67	1.39	1.33	1.36	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hatay (Anber ve Çelik, 2014)	1.55	0.97	-	-	-	1.93	1.54	-	-	-	1.52	1.14	-	-	-	1.28	0.94	-	-	-
Hatay (Bolattürk, 208)	-	-	-	-	3.67-4.32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Şehirler	XPS					EPS					Taş Yünü					Cam Yünü				
	Doğalgaz	Kömür	Fuel-Oil	LPG	Elektrik	Doğalgaz	Kömür	Fuel-Oil	LPG	Elektrik	Doğalgaz	Kömür	Fuel-Oil	LPG	Elektrik	Doğalgaz	Kömür	Fuel-Oil	LPG	Elektrik
İskenderun (Bolattürk, 208)	-	-	-	-	3.47-5.47	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
İskenderun (Bolattürk,2006)	4.51	3.49	2.13	1.90	2.02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Isparta (Bolattürk,2006)	1.94	1.77	1.45	1.37	1.41	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
İstanbul (Tolun, 2010)	-	-	-	-	-	0.55	-	-	-	-	0.26	-	-	-	-	0.17	-	-	-	-
İstanbul (Bolattürk,2006)	2.22	1.98	1.55	1.45	1.50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
İstanbul (Kurekci, 2016)	-	-	-	-	-	2.41	2.08	1.75	1.23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
İzmir (Bolattürk, 208)	-	-	-	-	3.81-4.19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
İzmir (Sisman, 2007)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.82	-	-	-	-	-	-	-	-
İzmir (Kurekci, 2016)	-	-	-	-	-	3.12	2.68	2.26	1.59	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kars (Çomaklı ve Yüksel, 2003)	-	-	-	-	-	-	1.45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kocaeli (Ucar ve Balo, 2009)	3.78	2.95	2.60	2.33	2.46	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Konya (Aktemur, 2018)	-	-	-	-	-	0.23	0.18	-	0.10	-	-	-	-	-	-	0.24	0.17	-	0.09	-
Manisa (Bolattürk,2006)	2.52	2.19	1.64	1.53	1.59	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mardin (Bolattürk,2006)	2.10	1.89	1.51	1.42	1.47	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Mersin (Bolattürk, 208)	-	-	-	-	3.65-4.93	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	XPS					EPS					Taş Yünü					Cam Yünü				
Şehirler	Doğalgaz	Kömür	Fuel-Oil	LPG	Elektrik	Doğalgaz	Kömür	Fuel-Oil	LPG	Elektrik	Doğalgaz	Kömür	Fuel-Oil	LPG	Elektrik	Doğalgaz	Kömür	Fuel-Oil	LPG	Elektrik
Nevşehir (Kurekci, 2016)	1.85	1.70	1.41	1.34	1.38	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sivas (Aktemur, 2018)	-	-	-	-	-	0.23	0.16	-	0.09	-	-	-	-	-	-	0.21	0.15	-	0.08	-
Sivas (Kurekci, 2016)	-	-	-	-	-	1.78	1.53	1.29	0.91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Trabzon (Bolattürk,2006)	2.33	2.06	1.58	1.48	1.54	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Şanlıurfa (Aktemur, 2018)	-	-	-	-	-	1.15	0.47	-	0.17	-	-	-	-	-	-	0.95	0.42	-	0.16	-
Uşak (Bolattürk,2006)	2.08	1.87	1.49	1.41	1.46	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

6. SONUÇLAR

Binalarda ısı yalıtımının doğru bir şekilde yapılması sonucunda, hem ekonomik hem de enerji bazında tasarruf sağlandığı anlaşılmaktadır. Isı yalıtımı sayesinde ısıtma, soğutma giderlerinde azalma ve yapılarda konforlu bir ortam oluşacağı için enerjide tasarruf sağlanır. Bu çalışmada yalıtım konusunda elde edilen çıkarımlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır;

1. Binalarda ısı yalıtımı sadece dış duvar ile sınırlı değildir. Binanın çatı, yer, tavan, çatı arası vb. bölgelerine yalıtımın yapılması gerektiği ve her bölgenin kendisine göre optimum yalıtım kalınlığı ve farklı malzemesinin olduğu görülmektedir.
2. Binalarda ısı yalıtımı için optimum kalınlığın tespitinin de 3 farklı metot kullanılmaktadır; Ömür maliyet optimizasyonu, Termoeconomik optimizasyon, TS 825.
3. TS 825 Standardı uygulanarak yapılan optimum yalıtım kalınlığı hesabı, ömür maliyet optimizasyon ve termoeconomik optimizasyon metodları ile yapılan optimum yalıtım kalınlığı hesaplarından daha düşük çıktığı ve bu sayede geri ödeme süresinin de diğer iki metoda nazaran daha düşük olduğu görülmektedir.
4. Isı yalıtımı çevre kirliliği ile de doğru orantılıdır. Isı yalıtımının olmadığı binalarda gereksiz yakıt tüketimi gerçekleştiği için hava kirliliği meydana gelir. Bu da hem küresel ısınmaya hem de iklim değişikliğine sebep olur.
5. Optimum yalıtım kalınlığı ile ilgili yapılan çalışmalar arasında uyumsuzluklar vardır. Bu yüzden bu çalışmanın benzeri, belirli bir bölgeye odaklanarak ilgili literatürü detaylı olarak taramak, uygulamacı mühendislere yol gösterici olacağı değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

Aktemur, C. (2018) Determination of optimum insulation thicknesses, energy savings and environmental impacts with respect to heating and cooling degree-days for different climate regions of Turkey. *International Journal of Energy Applications and Technologies*, 5(1), 29-43.

Al-Sanea, S. A., Zedan, M. F. (2002) Optimum insulation thickness for building walls in a hot-dry climate. *International Journal of Ambient Energy*, 23(3), 115-126.

Altınışık, K. (2006) “Isı Yalıtımı”, Nobel Yayın Dağıtım, Yayın No:954, 1. Basım, Ağustos, Ankara.

Al-Homoud, M. S. (2005) Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials. *Building and environment*, 40(3), 353-366.

Anber A., Çelik A. (2014) Hatay İli İçin Optimum Yalıtım Kalınlığının Belirlenmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, Lisans Bitirme Tezi, İstanbul.

Arena, A. P., De Rosa, C. (2003) Life cycle assessment of energy and environmental implications of the implementation of conservation technologies in school buildings in Mendoza—Argentina. *Building and Environment*, 38 (2), 359-368.

ASHRAE (2001) American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers (ASHRAE). *Handbook of Fundamentals*, Atlanta, GA, USA, Chapter 23.

Aşkar, M.A. (2005) “Isı Yalıtımı ve Konutlarda Enerji Verimliliği” İzolasyon Dünyası, Sayı.55, Eylül-Ekim, s.54-58.

Bolattürk, A. (2006) Determination of optimum insulation thickness for building walls with respect to various fuels and climate zones in Turkey. *Applied thermal engineering*, 26(11-12), 1301-1309.

Bolattürk, A. (2008) Optimum insulation thicknesses for building walls with respect to cooling and heating degree-hours in the warmest zone of Turkey. *Building and environment*, 43(6), 1055-1064.

Cabeza, L. F., D (2010) Experimental study on the performance of insulation materials in Mediterranean construction. *Energy and Buildings*, 42(5), 630-636.

Çengel, Y.A. (1998) “Heat Transfer”, a Practical Approach, Mc Graw Hill Book.

Çomaklı, K., Yüksel, B. (2003) Optimum insulation thickness of external walls for energy saving. *Applied thermal engineering*, 23(4), 473-479.

de Alegría Mancisidor, I. M., de Basurto Uruga, P.D., (2009) European Union's renewable energy sources and energy efficiency policy review: The Spanish perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Initiative, C. Buildings and climate change.

- Dimoudi, A., Tompa, C.(2008) Energy and environmental indicators related to construction of office buildings. *Resources, Conservation and Recycling*, 53(1-2), 86-95.
- Dombaycı, Ö. A., Gölcü, M., Pancar, Y. (2006) Optimization of insulation thickness for external walls using different energy-sources. *Applied Energy*, 83(9), 921-928.
- Dombaycı, Ö. D (2017) Thermoeconomic method for determination of optimum insulation thickness of external walls for the houses: Case study for Turkey. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 22, 1-8.
- Fertelli, A. (2013) Determination of optimum insulationthickness for different building walls in Turkey. *Transactions of FAMENA*, 37(2), 103-113.
- Gölcü, M., D (2006) Denizli için optimum yalıtım kalınlığının enerji tasarrufuna Etkisi ve sonuçları. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21(4).
- Gürel, A. E., Cingiz, Z. (2011) Farklı dış duvar yapıları için optimum ısı yalıtım kalınlığı tespitinin ekonomik analizi. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 15(1), 75-81.
- Incopera, F.F., DeWitt, D.P. (2001) “Isı ve Kütle Geçişinin Temelleri”, *Literatür Yayınevi*, 4.Ed., İstanbul.
- İ. Uzun, (2013) *Yönetmelikler Işığında Isı Yalıtım Uygulamaları*, EPS Sanayi Derneği (EPSDER) Yayınları, Inovasya ajans.
- İşbilir, D. (2009) *Binalarda ısı yalıtımı uygulamaları ve sorunlarının araştırılması -Doctoral dissertation*, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kaynaklı, Ö., D. (2002) “Otomobil İçinde Isıtma ve Soğutma Süreçlerinde Isıl Konforun Simülasyonu, OTEKON’02 Otomotiv Teknolojileri Kongresi Kongre Kitabı, Bursa, sy.127.
- Kaynaklı, O., D (2003) Calculation of thermal comfort zones with the ambient parameters. In *IEEEES-1 the first international exergy, energy and environment symposium*, Izmir, Turkey, (pp. 13-17).
- Kaynaklı, Ö., D. (2003) Sürekli rejim enerji dengesi modeline göre ısıl konfor bölgeleri. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(1), 23-30.
- Kaynaklı, O. A (2008) study on residential heating energy requirement and optimum insulation thickness. *Renewable Energy*, 33(6), 1164-1172.
- Kon, O. (2017) Determination of optimum insulation thicknesses using economical analyse for exterior walls of buildings with different masses. *An International Journal of Optimization and Control: Theories & Applications (IJOCTA)*, 7(2), 149-157.
- Kurekci, N. A.(2016) Determination of optimum insulation thickness for building walls by using heating and cooling degree-day values of all Turkey’s provincial centers. *Energy and Buildings*, 118, 197-213.
- McQuiston, F., D (2000) *Heating, Ventilating and Air Conditioning (Analysis and Design)*, Fifth edition, John Wiley & Sons, Inc.
- Ozel, M. (2011) Thermal performance and optimuminsulation thickness of building walls with different structure materials. *Applied Thermal Engineering*, 31(17-18), 3854-3863.
- Öztürk, İ. T. (2011) *Isıl Konfor ve Enerji Verimliliği*, 2011. X. Ulusal tesisat mühendisliği kongresi, 13/16 Nisan 2011/İzmir. *Bildiriler Kitabı*. Cilt 2 s. 1465-1482.
- Özer, M. (2006)“Yapılarda Isı ve Su Yalıtımları”,*İnşaat Mühendisleri Odası, İstanbul Şubesi, İstanbul*.
- Özenç, A. (2007) “Edirne’deki Isı Yalıtım Uygulamaları”, *Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*.
- Papadopoulos, A. M. (2005) State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments. *Energy and buildings*, 37(1), 77-86.
- Rodríguez-Soria, B., D (2015) Quantitative analysis of the divergence in energy losses allowed through building envelopes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 1000-1008.
- RG (2008) *Resmi Gazete* 29 Ekim 2008 Perşembe. Sayı: 27019 “Binalarda Isı Yalıtımı Yönetmeliği”.
- S.A. Al-Sanea, M.F. Zedan, S.N. Al-Hussain, (2012) Effect of thermal mass on performance of insulated building walls and the concept of energy savings potential, *Applied Energy* 89 430–442.
- S.A. Al-Sanea, M.F. Zedan, (2011) Improving thermal performance of building walls by optimizing insulation layer distribution and thickness for same thermal mass, *Applied Energy* 88 3113–3124.

Seppänen, O., Fisk, W. J., and Lei, Q.H. (2006) Room Temperature and Productivity in Office Work eScholarship Repository, Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California (2006).

Sezer, F. Ş. (2005) Türkiye’de ısı yalıtımının gelişimi ve konutlarda uygulanan dış duvar ısı yalıtım sistemleri.

Şimşek, Z. (2019) Konut Yapılarında kullanılan Isı Yalıtım Malzemelerin İncelenmesi. Technological Applied Sciences, 14(4), 147-162.

Sisman, N., Kahya E., Aras N., ve Aras H. (2007) Determination of optimum insulation thicknesses of the external walls and roof (ceiling) for Turkey's different degree-day regions. Energy Policy, 35(10), 5151-5155.

TCCŞB (2015) Isı Yalıtım Uygulama Kılavuzu, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara.

TSE (2005) TS 901–1 EN13162 Isı Yalıtım Mamulleri – Binalarda kullanılan- Fabrika yapımı mineral yün (MW) mamuller- Özellikleri.

TSE (2008) TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları.

TS (2009) 7316 EN 13163/AC Isı Yalıtım Mamulleri – Binalar için- Fabrikasyon olarak imal edilen – Genleştirilmiş Polistiren Özellikleri.

Tolun, M. (2010) Farklı derece-gün bölgeleri için yalıtım probleminin incelenmesi (Doctoral dissertation, Enerji Enstitüsü).

UNEP (2009) United Nations Environmet Programme, Report: Buildings And Climate Change: A Summary for Decision-makers, 2009. ISBN: 987-92-807-3064-7.

Ucar, A., Balo, F. (2009) Effect of fuel type on the optimum thickness of selected insulation materials for the four different climatic regions of Turkey. Applied Energy, 86(5), 730-736.

Usta, S. (2009) TS 825" Binalarda Isı Yalıtım Kuralları" Standardına Göre İkinci Bölgede Bulunan Bir Binanın Yalıtımsız ve Yalıtımlı Durumlarının Enerji Verimliliği Bakımından Karşılaştırılması. Electronic Journal of Construction Technologies/Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, 5(1).

Ünalın, H., Gökaltun, E., & Uğurlubilek, R. (2006). Yapı Kabuğunda Isı Kayıplarının Azaltılması ve Bir İyileştirme Projesi Örneği. Tesisat Mühendisliği Dergisi, 94, 49-56.

Yıldız, A Gurlek, G., Erkek, M., ve Ozbalta, N., (2008) Economical and environmental analyses of thermal insulation thickness in buildings. Journal of Thermal Science and Technology, 28(2), 25-34.

Biyoproses Çalışmalarında Deneysel Tasarım Yönteminin Uygulanması

Meryem Sena AKKUŞ*¹ , Sema KARABUDAK*² 

*Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi, Ankara, 06010, Türkiye

Derleme Makalesi, Geliş Tarihi: 10.10.2020, Kabul Tarihi: 23.11.2020

Özet

Deneysel tasarım yöntemleri yapılan deneylerin maliyetlerini düşüren, sonuçların güvenilirliğini artıran, az deneyle istenen hedefe kısa sürede ulaştırılan tekniklerdir. Biyolojik proses çalışmalarında istenen hedefe yönelik, hedefi doğrudan veya dolaylı olarak etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Uygun deneysel tasarım yöntemiyle gerçeğe en yakın ve hassas sonuca ulaşmak mümkündür. Yapılan bu çalışmada literatürde yaygın olarak kullanılan deneysel tasarım yöntemlerinden tam faktöriyel dizaynı, Taguchi metodu, Box-Behnken tasarımı, merkezi kompozit tasarımı ve Plackett-Burman tasarım yöntemlerinin biyoproseslerde en uygun değer koşullarına nasıl ulaştığını ve bu çalışmalarda deneysel tasarım yöntemlerinin uygulama örnekleri hakkında bilgi verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Deneysel tasarım yöntemleri, Proses optimizasyonu, Biyoproses.

Application of Experimental Design Method in Bioprocess Studies

Abstract

Experimental design methods are the techniques that reduce the costs of the experiments performed, increase the reliability of the results, and reach the desired goal in a short time with less experimentation. In the work of biological processes, there are many factors aimed at the desired goal, that affect the target directly or indirectly. It is possible to reach the most accurate and accurate result with the appropriate experimental design method. In this study, information is given about how the full factorial design, Taguchi method, Box-Behnken design, central composite design, and Plackett-Burman design methods, which are among the widely used experimental design methods in the literature, reach the most appropriate value conditions in implementations and application examples of these methods in bioprocess studies.

Keywords: Experimental design methods, Process optimization, Bioprocess.

¹Sorumlu yazar msaakkus@ybu.edu.tr, ²skarabudak@ybu.edu.tr

1. GİRİŞ

Deneyel tasarım, deneysel sonuçların analizinden sonra deneyde etkili olan parametrelerden bazıları seçerek, ilgilenilen bir yanıt üzerine etkilerini tespit etmek için kontrollü bir şekilde değiştirildiği bir süreç analiz şeklidir. Bu analiz süreci çeşitli bağımsız faktörlerin bağımlı bir faktör üzerindeki etkilerinin belirlenmesi için de kullanılmasını mümkün kılmaktadır (Keskin Gündoğdu vd., 2016). Simülasyon deneylerinin dikkatli bir şekilde planlanması ve tasarlanması, modelin girdilerindeki değişikliklerin çıktıları üzerindeki etkilerini tahmin etmenin etkili yollarını sunarak, zamandan ve emekten tasarruf sağlamak için yardımcı olmaktadır. Deney tasarım yöntemleri birçok alanda uygulanabilmekle birlikte, biyolojik çalışmalarda kullanımı daha yaygındır. Biyoteknolojik prosesler, prosesin performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilecek çok sayıda değişkeni, besleme malzemesi özelliği ve hammadde özelliği bulunması sebebiyle oldukça karmaşıktır. Deneyel tasarım yöntemleriyle deneye etki eden birçok faktörün değişik seviyeleri, aynı anda incelenmekte ve bir faktörün durumu, diğer faktör veya faktörlerin değişik seviyelerinde ele alınabilmektedir. Bu çalışmada biyolojik proseslerin tasarım aşamasında yaygın olarak kullanılan deney tasarım yöntemleri tartışılmıştır.

2. DENEY TASARIMI

Tarafsız, hassas ve iyi organize edilmiş bir deney tasarlamak için deneyin planlama aşamasında bilimsel bir yaklaşım gereklidir (Özkan vd., 2019). Klasik deney tasarımı yaklaşımlarından olan Tek seferde tek faktör yöntemi (one factor at a time), pek çok ürünün ve analitik yöntemin geliştirilmesi ve optimizasyonunda kullanılmıştır. Bu yaklaşımda faktörlerden biri uygun bir aralıkta (veya seviyelerde) değiştirilirken diğer değişkenler sabit tutulmaktadır (Ghanem vd., 2009). Ancak bu yaklaşımda, deneye etki eden ilgili tüm değişkenlerin birleşik etkisini görmek mümkün olmamaktadır. Tek seferde tek faktörün araştırıldığı bu yöntem uygulama zamanı açısından verimli olmamakla birlikte optimum seviyeleri tespit etmek için bir dizi deney gerektirmektedir. Üstelik bu yöntemin sonuçlarının güvenilirliği düşüktür ve hata oranı yüksektir (Alshehria vd., 2016). Bununla birlikte, istatistiksel bir deneysel tasarım yöntemiyle prosese etki eden tüm parametreleri optimize ederek tek seferde tek faktör metodunun eksikliklerinin üstesinden gelmek mümkündür. İstatistiksel deney tasarım yöntemleri bir veya daha fazla ölçülebilir girdi değişkenleri arasındaki regresyon modelini deneysel olarak tanımlamaktadır. Bu

yöntemler ortam koşullarının optimizasyonu, verimi artırma, yapılan deney sayısı ve maliyetini düşürme bakımından büyük avantajlar sağlamaktadır (Özkan vd., 2019). Bu metodların etkin kullanımı ile prosesin kontrol edilmesi kolay olmaktadır. Birçok deney tasarım modeli bulunmakla birlikte bu modeller birkaç ortak adımdan oluşmaktadır. Bu ortak adımlar Şekil 1'de verilmiştir (Jacyna vd., 2019).



Şekil 1. Deney tasarımı modeli metodolojisine göre deney tasarımı (Jacyna vd, 2019'dan uyarlanmıştır)

Deneyel bir plan oluşturmak için bu adımları takip etmek, planlanan çalışmanın daha verimli olmasına yardımcı olabilir. Yapılacak araştırma yeni veya iyi bilinmeyen bir sistemse, prosedürün ilk aşaması, istenen yanıtları (örneğin; ürün verimi ve verimlilik) etkileyebilecek faktörlerin seçimi olmalıdır. Bu faktörlerin kontrol edilmesi kolay olmalı (örneğin konsantrasyon, sıcaklık, akış hızı) ve ayrıca test edilecek aralıkları önceden belirlenmelidir. Bazı deneylerde bu aralıkları belirlemek için bir dizi tarama testi yapılır. Yapılan test deneylerinin sonuçları değerlendirilerek, yalnızca verilen süreci etkileyen en önemli parametreler seçilir ve çalışma aralığı belirlenir. Ayrıca bu durum önemli sayıda deneyin yapılmasını da engelleyecektir. Deneyin bir sonraki adımı gözlemlenecek parametreleri ve değerlerinin karşılaması gereken kriterleri yani yanıtları belirlemektir. Bu aşamada, deneye etki eden en önemli parametreler de belirlenebilir. Hem faktörler hem de yanıtlar belirlendikten sonra uygun deney planı seçilir. Alınmak istenen bilginin ayrıntısı, maliyet ve süreye bağlı olarak, uygun deney tasarım yöntemlerinden biri seçilir (Jacyna vd., 2019).

Seçilen yöntemle rasgeleleştirme kullanılarak, kontrolsüz değişkenlerin elde edilen sonuçlar üzerindeki

etkisini en aza indirmek amaçlanır. Araştırma planında bazı deneysel noktalar için tekrarların dahil edilmesi, incelenen örneğin rastgele hatalardan nasıl etkilendiğini belirlemeye yardımcı olacaktır. Özetle, deney tasarımı ve optimizasyonu yaklaşımında, araştırmanın dikkatli bir şekilde planlanması, bir ölçüm verisi matrisi elde etmek için planlanan deneylerin yapılması, deney sonuçlarının istatistiksel analizi ve yorumlanması ile bilimsel süreç tamamlanır.

3. BİYOPROSESLERDE DENEY TASARIMI

Son yirmi yılda önemi ve değeri anlaşılan biyoteknoloji "Biyolojik kökenli ham maddelerden aşı, gıda gibi yeni ürünler üretmek için mühendislik ve biyolojik bilim ilkelerinin uygulanması" olarak tanımlanabilir. Başka bir deyişle, "Canlı organizma / ürünü veya ürünlerinin insan sağlığını ve insan çevresini değiştirmek veya iyileştirmek için kullanılması"dır (Verma vd., 2011). Biyoteknolojinin birçok uygulama alanı olmakla birlikte bunların başında sanayi ve laboratuvar ölçekli üretim ve çalışmalar gelmektedir. Biyoteknolojik çalışmaların birçoğunda substrat canlı organizmalar tarafından ürüne dönüştürülmektedir.

Biyoproses, bir biyoreaktörde enzim, mikroorganizmalar, bitki hücreleri veya hayvan hücreleri gibi biyokatalizörlerin farmasötik, yiyecek, ve yakıt gibi ürünlerin üretiminde kullanıldığı deneysel bir süreçtir (Singh, 2015).

Biyoproses teknolojileri, hem birden çok parametrenin ayarlanmasını hem de mühendislik ilkelerinin uygulanmasını engelleyen komplikasyonları içerdikleri için etkili problem çözme yöntemlerini gerektirmektedir (Lee vd., 2006).

Bir biyoprosese yapılan herhangi bir girişim, belirli çıktıları etkileyen veya etkilemeyen çok sayıda etkileşimli ve etkileşimsiz faktörlerle sonuçlanır. Örneğin, büyüme faktörleri, vitaminler ve mikrobiyal stres faktörleri gibi ortam koşullarının değiştirilmesi organizmada değişimlere yol açmaktadır. Bu durum deneyde amaçlanan sonucu doğrudan etkilemektedir. Bu karmaşayı gidermek için sisteme uygun deneysel yasarım yöntemlerinden birisi seçilerek gerçek koşullara uygun optimizasyon yapılabilir.

3.1. Tarama Tasarımları

Deneysel tasarımının temel amacı, planlanan bir çalışmadan elde edilecek bilgi miktarını en üst düzeye çıkarırken, deney sayısını ve dolayısıyla elde edilen veri miktarını en aza indirmeye çalışmaktır. Bu tür deneysel

tasarımlar, süreci etkileyen faktörleri aramaya ve bazı durumlarda çalışılan parametreler arasında meydana gelen etkileşimleri fark etmeye odaklanacaktır. Tarama amaçlı en popüler deneysel tasarım yöntemleri Faktöriyel Tasarımlardır. Bu tasarım yöntem, deneylerdeki faktörlerin aynı anda değiştiği temeline dayanır. Bu tasarımda iki ya da daha fazla faktörün ana etkilerini ve birbirleriyle etkileşimlerinin etkilerini aynı anda araştırmak için kullanılan bir yöntemdir (Özkan vd., 2019). Faktöriyel tasarımlardan yaygın olarak kullanılan yöntemlerden birisi tam faktöriyel deney tasarımıdır. Tam faktöriyel deney tasarımının çok boyutlu bir yöntem olması sebebiyle proseslerin maliyetlerinin azaltılması, kalitenin artırılması sağlanabilmektedir. Tam faktöriyel yöntemine göre deney sayısı Eşitlik 1'de verilmiştir.

$$N = n^k \quad (1)$$

Eşitlik 1'de verilen N deney sayısını, n seviye sayısını, k faktör sayısını göstermektedir (Zümrüt, 2009).

Deny tasarımı incelene parametreler arasındaki etkileşimlerin ihmal edilebilir ya da toplam deney sayısının çok yüksek olduğu durumlarda kısmi faktöriyel tasarım yaklaşımı uygulanabilmektedir.

En basit tarama yöntemlerinden biri olan Plackett-Burman Tasarımı (PBD) iki seviyeli kısmi faktöriyel tasarım yöntemidir. Biyolojik örneklerin kararlı olmaması, çevreden kolayca etkilenmesi ve ayrıca biyoproseslerde gerçekleşen biyokimyasal ve fizikokimyasal değişiklikler Plackett-Burman tasarımının uygulanmasını popüler hale gelmiştir (Jacynavd., 2019).

Plackett-Burman tasarımından deney sonuçlarına bağlı çeşitli faktörlerin etkilerini tanımlamak için Eşitlik 2'de verilen denklem kullanılır.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i \chi_i \quad (2)$$

Eşitlik 2'de verilen Y yanıt, β_0 sabit, β_i doğrusal katsayıyı, X_i seçilen faktör derecelerini göstermektedir. Bu yöntemle deneysel sonuçların varyans analizinde, ANOVA testiyle anlamlı faktörler seçilir (Plackett vd., 1946; Wang vd., 2009).

3.2. Optimizasyon Dizayını

Faktöriyel Tasarımlar genelde değişken seçiminde kullanırken, optimum parametre değerlerine ulaşmak için Yanıt Yüzey Yöntemi kullanılır. Bu yöntem sadece

optimum koşulları belirlemekle kalmayıp, aynı zamanda bir süreci tasarlamak için gerekli bilgileri de verecektir. Yanıt Yüzey Yöntemi, özel deneysel tasarımları Taylor birinci ve ikinci dereceden denklemlerle birleştiren optimum koşulları belirlemeye yönelik bilimsel bir yaklaşımdır. Bu yöntemde, yanıtı (verim, safsızlık seviyesi vb.) tanımlayan Taylor genişleme eğrisinin yüzeyi belirlenir. Ayrıca bu yöntemde değişkenlerin sayısı önemlidir. Değişken sayısı arttıkça tasarımların gerektirdiği deney sayısı da katlanarak artmaktadır. Faktörler ve yanıtlar arasında elde edilen ilişkilerin grafiksel gösterimi, Yanıt Yüzey Yöntemi'nin diğer bir avantajıdır. Yanıt Yüzey Yöntemi'nin temeli olan Taylor denklemi Eşitlik 3'te verilmiştir.

$$Y=A+B \cdot X_1+C \cdot X_2+\dots\dots\dots+H \cdot X_1^2+I X_2^2+\dots\dots\dots+M \cdot X_1 \cdot X_2+N \cdot X_1 \cdot X_3+\dots\dots\dots \quad (3)$$

Eşitlik 3'teki A,B,C...denklem terimlerinin katsayılarını, X_1 ; değişken 1 için doğrusal terim, X_2 ; değişken 2 için doğrusal terimi, X_1^2 ; değişken 1 için doğrusal olmayan kare terimi, X_2^2 ;değişken 2 için doğrusal olmayan kare terimini, $X_1 \cdot X_2$; değişken 1 ve değişken 2 için etkileşim terimini, $X_1 \cdot X_3$; değişken 1 ve değişken 3 için etkileşim terimini göstermektedir (Geiger, 2014; Jacynavd., 2019).

Optimizasyon tasarımında yaygın kullanılan diğer bir yöntem, Merkezi Kompozit Tasarımıdır (MKT). Bu yöntemde aksel noktalar (α) ve merkez noktalar olmak üzere iki faktöriyel nokta bulunur. Yöntemin iki faktöriyel noktası, deneydeki bir faktörün + (en yüksek) veya - (en düşük) düzeyleridir. Aksel noktalar Eşitlik 4'te verilen denklemle belirlenir. Eşitlikte verilen k değeri bağımsız değişken sayısını ifade etmektedir (Türk, 2016).

$$\alpha = 2k/4 \quad (4)$$

Merkez noktalar ise deneysel hatayı tahmin etmek için tekrar edilen noktalardır. Sonuç olarak MKT'de her bir parametrenin beş düzeyi vardır. Bunlar +1 ve -1 faktöriyel noktalar + α ve - α aksel noktalar, 0 olarak ifade edilen merkez noktasıdır. MKT yöntemi uygulanarak elde edilen sonuçlar karesel model kullanılarak değerlendirilir (Eşitlik (5)).

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i \chi_i + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} \chi_i \chi_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} \chi_i^2 \quad (5)$$

Bu model n tane değişkenin lineer etkilerini, karesel etkilerini ve aralarındaki etkileşimi dikkate almaktadır. Burada verilen Y yanıt, β_0 sabit katsayıyı, β_i lineer katsayı, β_{ij} , i ve j değişkenleri arasındaki etkileşim

etkisini ve k faktör sayısını tarif etmektedir. En küçük kareler yönteminde ise regresyon analizi ile de ikinci derece modeldeki katsayılar tahmin edilerek regresyon denklemi oluşturulur. Oluşturulan denklemle de yanıtlar için tahmini sonuçlar elde edilerek, tahminlerin doğruluğu, modelin deney tasarımı için yeterliliği kontrol edilir (Türk, 2016).

Deneysel çalışmada gözlemlenecek yanıtı etkileyen faktörleri sistematik olarak doğrusal, üssel ve ikili etkilerinin incelendiği bir yaklaşım olan yüzey yanıt metoduna alternatif olan diğer bir yöntem Box-Behnken tasarımıdır. Bu yöntemde, minimum (-1), orta (0) ve maksimum (+1) olmak üzere her bir değişkenin eşit aralıkta üç farklı seviyede ölçümü yapılarak yanıt değişkenindeki değişim incelenmektedir (Arslan vd., 2018). Bu tasarımlarda 1. ve 2. dereceden model katsayılarının etkili bir şekilde kestirimi yapılabilir. Aynı sayıda faktörün olduğu deney için, MKT'ye göre daha az nokta içerdiğinden bu yöntem daha ekonomiktir. Fakat içinde faktöriyel tasarım bulundurmadığı için ardışık sıralı denemeler için uygun olmadığı, yani yapılmış bir faktöriyel tasarımdaki denemelerle birleştirilemeyeceği unutulmamalıdır. Ayrıca bu tasarımda eksen noktaları bulunmadığı için faktör seviyelerinin alt ve üst limitlerinin dışına çıkılması mümkün değildir (Demir vd., 2017).

Taguchi metodu, bir deney tasarım yöntemi olmasının ötesinde özellikle yüksek kalitede sistem tasarımı için son derece faydalı bir tekniktir. Bu yöntemde faktörler arasındaki etkileşimler belirli ölçüde ihmal edilir. Taguchi Deney Tasarımı yönteminde elde edilen deney sonuçları sinyal/gürültü (S/N) oranına çevrilerek değerlendirilmektedir. Sinyal değeri sistemin verdiği ve ölçülmek istenen gerçek değeri, gürültü değeri ise ölçülen faktör içerisindeki istenmeyen faktörlerin etkisini temsil etmektedir. Sinyal/gürültü oranının hesaplamasında deneyler sonucunda ulaşılmaması hedeflenen yanıtın özelliği önemlidir. Buna göre düşük değer iyi (yaklaşımın amacı en düşük değere ulaşmak), yüksek değer iyi (yaklaşımın amacı en yüksek değere ulaşmak) ve nominal değer iyi (yaklaşımın amacı ortalama bir değere ulaşmak) olmak üzere her üç yaklaşıma göre S/N hesaplaması yapılır. Seçilen yaklaşıma göre yapılan hesaplamada büyük olan S/N değeri deney tasarımı için en iyi performansı göstermektedir (İç vd., 2016).

En küçük en iyi olduğu durumda;

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (6)$$

En büyük en iyi olduğu durumda;

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (7)$$

Nominal en iyi olduğu durumda:

$$S/N = -10 \log \left(\frac{\bar{y}^2}{S^2} \right) \quad (8)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (9)$$

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (10)$$

Eşitliklerde y_i ; performans yanıtını, i gözlem değerini, n ; deneme test sayısını, \bar{y} ; ortalama değeri, S^2 ; gözlem değerlerinin varyansını ifade etmektedir. Ayrıca varyans analizi ANOVA testi ile yapılır. Faktörlerin proses üzerine etkileri istatistiksel olarak ortaya konulur (Yang vd., 1998).

Hem S/N oranı, hem de varyans analizi değerlendirerek faktörlerin, prosesi optimum performansa ulaştırarak kombinasyonu belirlenir. Bu tasarımı diğer deney tasarımlarından ayıran önemli bir unsur da faktörlerin birbirinden bağımsız olarak değerlendirilebilir olmasıdır (Savaşkan vd., 2010).

Son olarak, deney tasarım yöntemlerinden birisi olan Plackett-Burman yaklaşımıyla çok sayıdaki faktörlerden hangilerinin yanıt üzerinde etkisinin olduğu tespit edilmektedir. Bu tasarımın avantajı diğer tasarım yöntemlerine göre daha az sayıda deneme gerektirmesi olup, dezavantajı ise yapılarının karmaşık olmasıdır. Bu tasarım iki seviyeli kesirli faktöriyel tasarımlardan oluşmaktadır.

N sayıda deneyde, $k=N-1$ değişken olduğunda ve deney sayısı N'nin 4'ün katı olduğu durumlarda kullanılmaktadır. Plackett-Burman tasarımları kübik olup, geometrik olmayan tasarımlar olarak adlandırılmaktadır (Karşoğlu vd., 2015).

4. BİYOPROSES ÇALIŞMALARINDA DENEYSEL TASARIM YÖNTEMLERİNİN UYGULAMALARI

Biyoproseslerde gerçekleştirilen işlemin verimliliği, performansı, ürün kalitesi gibi istenen hedefi direk veya dolaylı olarak etkileyen çok sayıda değişken bulunmaktadır. Klasik deney tasarımı yaklaşımlarından en çok uygulanan tek seferde tek faktör yöntemi ile optimum değere ulaşmak ekonomik olmamakla birlikte sonuçların hassasiyeti düşük olmakta ve deneysel süreç oldukça zaman almaktadır. Günümüzde bu olumsuzlukları gidermek için deneysel tasarım yöntemleri uygulanmaktadır. Bu yöntemle klasik yöntemle göre daha az sayıda deney, birçok değişkenin etkisi aynı anda görülebilmektedir. Elde edilen verilerin işlenmesiyle seçilen değişkenlerin optimum değerlerinde istenen amaca ulaşmanın mümkün olduğu görülmektedir.

Literatürde deneysel tasarım yöntemlerinin uygulandığı biyoproses çalışmaları incelendiğinde büyük bir çoğunluğunda organizmanın ürettiği besiyerinin bileşimi, biyokütle miktarı, ortam sıcaklığı ve pH'ın optimize edildiği görülmektedir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan deneysel tasarım yöntemlerinden tam faktöriyel dizaynı, Taguchi metodu, Box-Behnken tasarımı, merkezi kompozit tasarımı ve Plackett-Burman tasarımının uygulandığı bazı biyolojik proses çalışmalarının listesi Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 1'den de görüldüğü gibi yapılan biyoproses çalışmalarında çok geniş bir yelpazede işlemler yapılmaktadır. Örneğin; canlıların ürettiği bazı enzimlerin üretimi, laktik asit üretimi, biyohidrojen üretimi, mikrobiyal canlıların metabolit ürünlerinin verimliliği, biyosurfaktant üretim koşullarının belirlenmesi gibi birçok biyoteknolojik uygulamada çeşitli deneysel tasarım yöntemlerinin uygulandığı ve istenen hedefe ulaşıldığı görülmektedir.

Tablo 1. Biyoproses çalışmalarında kullanılan deneysel tasarım yöntemlerinin uygulama örnekleri

Proses	Kullanılan deneysel tasarım yöntemi	Faktörler	Yanıt	Referans
Biyosüpfaktant üretimi	Tam faktöriyel dizayn	Pepton konsantrasyonu, maya konsantrasyonu, amonyum sülfat derişimi, üre derişimi (amonyum sülfat ve maya özütü önemli ölçüde etkilemiştir. ΔST (yüzey gerilimi farkı) ve EI (emülsifikasyon indeksi) proses için bağımlı değişken olarak tespit edilmiştir.	0.5 g/L maya özütü kullanarak ΔST için 20.9 mNm ⁻¹ ve EI için % 73.1	(Fontes vd., 2010)
Bijinensis species Laktik asit üretimi	Tam faktöriyel dizayn	Sıcaklık, pH, çalkalama hızı, enzim konsantrasyonu, tampon konsantrasyonu, yüzey aktif madde tipi, yüzey aktif madde konsantrasyonu	Statik koşullar altında yağsız süt ortamındaki Lb22b suşu, peynir altı suyuna göre 2.30 kat daha fazla laktik asit üretmiştir.	(Tari vd., 2010)
Biyohidrojen üretimi	Tam faktöriyel dizayn	Ortam pH'ı ve sıcaklık	Maksimum verim ve hidrojen üretim oranları sırasıyla 308 mL H ₂ / g substrat ve 11.5 mL / saat bulunmuştur.	(Wang vd., 2009)
<i>Aspergillus oryzae</i> CBS 819.72 tarafından α -amilaz üretimi	Taguchi metodu	MgSO ₄ , KH ₂ PO ₄ , üre, soya küspesi hidrolizatı, kazeinik asit hidrolizat, gliserol, (NH ₄) ₂ SO ₄ , CoCl ₂ derişimleri	α -amilaz üretimi 151.1 U/mL'ye ulaşmıştır.	(Kammoun vd., 2008)
İnek gübresinin anaerobik fermantasyonu ile hidrojen üretimi	Taguchi metodu	Çalkalama hızı, pH, sıcaklık, substrat konsantrasyonu, K ₂ HPO ₄ derişimi	Sıcaklık ve pH'nın hidrojen üretimi için etkin parametre olduğu anlaşılmıştır.	(Wang vd., 2013)
<i>Bacillus licheniformis</i> KBR6 tarafından tanaz üretimi	Taguchi metodu	Sıcaklık, pH, tanik asit konsantrasyonu, fosfat konsantrasyonu, nitrojen konsantrasyonu, Mg ²⁺ iyon konsantrasyonu	Üretilen maksimum tanaz 0.43 U/mL'ye ulaşmıştır.	(Mohapatra vd., 2009)
Biyooetanol fermantasyon verimi	Box–Behnken Tasarımı	<i>S. cerevisiae</i> inokulum oranı, <i>S. cerevisiae</i> şeker konsantrasyonu, Fermantasyon süresi	Biyooetanol verimi (20 g/ L, % 2 inokulum, aşıda, 2 günlük sürede) tüketilen şeker göre % 45.55 ve verimlilik 0.19 kg / m ³ h	(Coban vd., 2012)

			değerdedir.	
Mısır kepeğinden <i>Trichosporon oleaginosus</i> ATCC20509 kullanılarak mikrobiyal lipit üretimi	Box–Behnken Tasarımı	Biyokütle miktarı, asit yüklemesi ve ön işlem süresi	En yüksek şeker verimine 0.53 g / g mısır kepeği hidrolizatlarından 30 dakika süreyle% 5 katı yüklemesi ve% 1 asit yüklemesi ön işlem koşulunda elde edildi.	(Lee vd., 2017)
<i>Aspergillus niger</i> kullanılarak pektinaz üretimi için biyoproses optimizasyonu	Box–Behnken Tasarımı	Enzim konsantrasyonu, (NH ₄) ₂ SO ₄ , K ₂ HPO ₄ , MgSO ₄ .5H ₂ O, KCl ve FeSO ₄ .5H ₂ O derişimleri	109.63 U / mL pektinaz üretimi gerçekleştirilmiştir.	(El Enshasy vd., 2018)
<i>Trichoderma virens</i> tarafından kitinaz üretimi	Merkezi Kompozit Tasarımı	Başlangıç pH değerleri, kitin, amonyum sülfat ve metanol konsantrasyonları	Tasarımdan elde edilen verilen öngörülen değer 0.1495 U/mL kitinazdır. Bu parametreler laboratuvarında test edilmiş ve elde edilen nihai kitinaz konsantrasyonu 0.1471U/mL bulunmuştur.	(Wasli vd., 2009)
Tarımsal Atıktan <i>Trichoderma Reesei</i> RutC30 Kullanarak Selülaz Üretimi	Merkezi Kompozit Tasarımı	Sıcaklık, substrat konsantrasyonu, indüktör konsantrasyonu, pH, inokulum yaşı ve çalkalama hızı	Modelden tahmin edilen maksimum selülaz üretimi 10.50 U / mL'dir	(Muthuvelayudham vd., 2010)
İnek dışkısından <i>Bacillus halodurans</i> IND18 tarafından karboksimetilselülaz üretimi	Merkezi Kompozit Tasarımı	Substratın pH'ı, pepton derişimi ve sodyum dihidrojen fosfat derişimi konsantrasyonu	Optimum koşullarda 4210 IU/g enzim aktivitesinin model tahmini deneysel olarak 4140 IU/g olarak doğrulanmıştır.	(Vijayaraghavan vd., 2016)
<i>Azadirachta indica</i> kültüründe hücre büyümesi ve azadirachtin üretimi için optimizasyon	Plackett–Burman Tasarımı	Glikoz derişimi, nitrat derişimi, fosfat konsantrasyonu, MgSO ₄ .7H ₂ O derişimi, inokulum seviyesi	Maksimum kuru hücre ağırlığı ve azadirachtin üretimi sırasıyla 21.2 g/L ve 2.65 mg/g olarak gerçekleştirilmiştir.	(Prakash vd., 2005)
<i>S.cerevisiae</i> tarafından önceden işlenmiş buğday samanı hidrolizatından etanol üretimi	Plackett–Burman Tasarımı	Substrat konsantrasyonu, Tween 80 konsantrasyonu, β-glukozidaz dozu, selülaz derişimi, hidroliz süresi, çalkalama hızı	Optimum koşullar altında etanol verimi 0.45 g/L/saat ile 16.4 g/L etanol konsantrasyonu elde edilmiştir.	(Singh vd., 2012)

<p><i>Candida famata</i>'nın rekombinant suşu tarafından flavin mononükleotid üretimi</p>	<p>Plackett–Burman Tasarımı</p>	<p>Sakkaroz, üre, maya miktarları, KH_2PO_4, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{CaCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7\text{Na}_3 \cdot \text{NH}_2\text{O}$, $\text{BeSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, NaF, KH_2PO_4, $\text{CaCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{BeSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ derişimleri</p>	<p>Maksimum flavin mononükleotid üretimi olarak 133.7 mg/L belirlenmiştir</p>	<p>(Yatsyshyn vd., 2010)</p>
---	---------------------------------	--	---	------------------------------

5. SONUÇLAR ve TARTIŞMALAR

Yapılacak olan çalışmada ya da bir üretimde maliyeti azaltan, kaliteyi arttıran, sonuçların güvenilirliğinin yüksek olmasını sağlayan bilimsel bir yaklaşım olan deney tasarım yöntemlerinin uygulanması önem arz etmektedir. Amaçlanan hedefi etkileyen birçok bilinen ve bilinmeyen faktörlerin etki ettiği karmaşık biyolojik proseslerde en hassas ve en kısa sürede sonuca ulaşmanın, sisteme uygun deneysel tasarım yöntemlerinden biri veya birkaçını birlikte uygulayarak mümkün olduğu görülmüştür. Bu çalışmada yaygın kullanılan deneysel tasarım yöntemleri ve bu yöntemlerin biyoproses çalışmalarında uygulamaları hakkında bilgi verilmiştir.

KAYNAKLAR

Alshehria, A.N., Ghanem, K.M., Al-Garni, S.M. 2016. Application of a five level central composite design to optimize operating conditions for electricity generation in a microbial fuel cell, *Journal of Taibah University for Science*, 10(6), 797-804.

Arslan, A., Topkaya, E., Bingöl, D., Veli, S. 2018. Removal of anionic surfactant sodium dodecyl sulfate from aqueous solutions by O₃/UV/H₂O₂ advanced oxidation process: Process optimization with response surface methodology approach, *Sustainable Environment Research*, 28(2), 65-71.

Coban, I., Sargin, S., Celiktas, M.S., Yesil-Celiktas, O. 2012. Bioethanol production from raffinate phase of supercritical CO₂ extracted *Stevia rebaudiana* leaves, *Bioresource technology*, 120, 52-59.

Demir, Ö., Aksu, B., Özsoy, Y. 2017. İlaç formülasyonu geliştirilmesinde deney tasarımı (doe) seçimi ve kullanımı.

El Enshasy, H.A., Elsayed, E.A., Suhaimi, N., Abd Malek, R., Esawy, M. 2018. Bioprocess optimization for pectinase production using *Aspergillus niger* in a submerged cultivation system, *BMC biotechnology*, 18(1), 71.

Fontes, G.C., Fonseca Amaral, P.F., Nele, M., Zarur Coelho, M.A. 2010. Factorial design to optimize biosurfactant production by *Yarrowia lipolytica*, *Journal of Biomedicine and Biotechnology*, 2010.

Geiger, E.O. (2014). Statistical methods for fermentation optimization *Fermentation and Biochemical Engineering Handbook* (pp. 415-422): Elsevier.

Ghanem, K.M., Al-Garni, S.M., Al-Shehri, A.N. 2009. Statistical optimization of cultural conditions by response surface methodology for phenol degradation by a novel *Aspergillus flavus* isolate, *African Journal of Biotechnology*, 8(15).

İç, Y.T., Duran, H., Keçeci, B., Emreca, İ., Bilgiç, B. 2016. Çok yanıtlı Taguchi eniyilemesine yönelik bir bilgisayar uygulamasının geliştirilmesi, *Politeknik Dergisi*, 19(3), 311-323.

Jacyna, J., Kordalewska, M., Markuszewski, M.J. 2019. Design of Experiments in metabolomics-related studies: An overview, *Journal of pharmaceutical and biomedical analysis*, 164, 598-606.

Kammoun, R., Naili, B., Bejar, S. 2008. Application of a statistical design to the optimization of parameters and culture medium for α -amylase production by *Aspergillus oryzae* CBS 819.72 grown on gruel (wheat

grinding by-product), *Bioresource technology*, 99(13), 5602-5609.

Karslıoğlu, Z., Baray, A., Özçakar, N. 2015. PVC tesisat bağlantı parçaları üretiminde fire probleminin çözümünde Plackett-Burman deney tasarımı yaklaşımı, *İstanbul Üniversitesi İşletme Fakültesi İşletme İktisadi Enstitüsü Yönetim Dergisi*, 26(79), 180-207.

Keskin Gündoğdu, T., Deniz, I., Çalışkan, G., Şahin, E.S., Azbar, N. 2016. Experimental design methods for bioengineering applications, *Critical reviews in biotechnology*, 36(2), 368-388.

Lee, J.-E., Vadlani, P.V., Faubion, J. 2017. Corn bran bioprocessing: Development of an integrated process for microbial lipids production, *Bioresource Technology*, 243, 196-203. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.065>

Lee, K.-M., Gilmore, D.F. 2006. Statistical experimental design for bioprocess modeling and optimization analysis, *Applied biochemistry and biotechnology*, 135(2), 101-115.

Mohapatra, P.D., Maity, C., Rao, R., Pati, B., Mondal, K. 2009. Tannase production by *Bacillus licheniformis* KBR6: Optimization of submerged culture conditions by Taguchi DOE methodology, *Food Research International*, 42(4), 430-435.

Muthuvelayudham, R., Viruthagiri, T. 2010. Application of central composite design based response surface methodology in parameter optimization and on cellulase production using agricultural waste, *International Journal of Chemical and Biological Engineering*, 3(2), 97-104.

Özkan, G., Akkuş, M.S., Özkan, G. 2019. The effects of operating conditions on hydrogen production from sodium borohydride using Box-Wilson optimization technique, *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(20), 9811-9816. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.12.134>

Plackett, R.L., Burman, J.P. 1946. The design of optimum multifactorial experiments, *Biometrika*, 33(4), 305-325.

Prakash, G., Srivastava, A.K. 2005. Statistical media optimization for cell growth and azadirachtin production in *Azadirachta indica* (A. Juss) suspension cultures, *Process Biochemistry*, 40(12), 3795-3800.

Savaşkan, M., Taptık, Y., Ürgen, M. 2010. Deney tasarımı yöntemi ile matkap uçlarında performans optimizasyonu, *İTÜ Dergisi*, 3(6), 117-128.

Singh, A., Bishnoi, N.R. 2012. Enzymatic hydrolysis optimization of microwave alkali pretreated wheat straw and ethanol production by yeast, *Bioresource Technology*, 108, 94-101.

Singh, R. 2015. Chapter 3-Hybrid Membrane Systems–Applications and Case Studies, *Membrane Technology and Engineering for Water Purification (Second Edition)*, Publisher: Elsevier Science & Technology Books. Pages 179, 281.

Tari, C., Ustok, F.I., Harsa, S. 2010. Production of food grade β -galactosidase from artisanal yogurt strains, *Food Biotechnology*, 24(1), 78-94.

Türk, T. 2016. Merkezi Kompozit Tasarımı Kullanılarak Bakır Cürufundan Arsenik Liçinin İncelenmesi, *Yerbilimleri Dergisi*, 37(3), 193-202.

Verma, A.S., Agrahari, S., Rastogi, S., Singh, A. 2011. Biotechnology in the realm of history, *Journal of Pharmacy and Bioallied Sciences*, 3(3), 321.

Vijayaraghavan, P., Prakash Vincent, S.G., Dhillon, G.S. 2016. Solid-substrate bioprocessing of cow dung for the production of carboxymethyl cellulase by *Bacillus halodurans* IND18, *Waste Management*, 48, 513-520. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.10.004>

Wang, J., Wan, W. 2009. Experimental design methods for fermentative hydrogen production: a review, *International journal of hydrogen energy*, 34(1), 235-244.

Wang, K.-S., Chen, J.-H., Huang, Y.-H., Huang, S.-L. 2013. Integrated Taguchi method and response surface methodology to confirm hydrogen production by anaerobic fermentation of cow manure, *International journal of hydrogen energy*, 38(1), 45-53.

Wasli, A.S., Salleh, M.M., Abd-Aziz, S., Hassan, O., Mahadi, N.M. 2009. Medium optimization for chitinase production from *Trichoderma virens* using central composite design, *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 14(6), 781-787.

Yang, W.p., Tarng, Y. 1998. Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method, *Journal of materials processing technology*, 84(1-3), 122-129.

Yatsyshyn, V.Y., Fedorovych, D.V., Sibirny, A.A. 2010. Medium optimization for production of flavin mononucleotide by the recombinant strain of the yeast *Candida famata* using statistical designs, *Biochemical Engineering Journal*, 49(1), 52-60.

Zümrüt, Z. (2009). *Tam Faktöriyel Deney Tasarımı Tekniği İle Hidroksiapatit Kaplı Titanyum İmplant Malzemelerin Mekanik Özellikleri Üzerine Parametrelerin Etkisi*. Fen Bilimleri Enstitüsü.

İLERİ MÜHENDİSLİK ÇALIŞMALARI VE TEKNOLOJİLERİ DERGİSİ

Robotic Design and Modeling of Medical Lower Extremity Exoskeletons

İsmail ÇALIKUŞU¹ , Esmâ UZUNHİSARCIKLİ² , Mehmet Bahadır ÇETİNKAYA³ , Uğur FİDAN⁴ 

¹Nevşehir Hacıbektâş Veli University, Vocational High School, Department of Biomedical Device Technology, Nevşehir, 50300, Turkey

²Kayseri University, Vocational High School, Department of Biomedical Device Technology, Kayseri, 38280, Turkey

³Erciyes University, Engineering Faculty, Department of Mechatronics, 38039, Kayseri, Turkey

⁴Afyon Kocatepe University, Engineering Faculty, Department of Biomedical Engineering, 03200, Afyonkarahisar, Turkey

Review Article, Received Date: 11.10.2020, Accepted Date: 13.12.2020

Abstract

This study aims to explain the development of the robotic Lower Extremity Exoskeleton (LEE) systems between 1960 and 2019 in chronological order. The scans performed in the exoskeleton system's design have shown that a modeling program, such as AnyBody, and OpenSim, should be used first to observe the design and software animation, followed by the mechanical development of the system using sensors and motors. Also, the use of OpenSim and AnyBody musculoskeletal system software has been proven to play an essential role in designing the human-exoskeleton by eliminating the high costs and risks of the mechanical designs. Furthermore, these modeling systems can enable rapid optimization of the LEE design by detecting the forces and torques falling on the human muscles.

Keywords: Modeling, Exoskeleton, AnyBody, LEE, Rehabilitation.

Robotik Alt Ekstremitte Dış İskeletlerin Modellenmesi ve Tasarımı

Özet

Bu çalışmanın amacı, 1960-2019 yılları arasında robotik Alt Ekstremitte Dış İskelet (LEE) sistemlerinin gelişimini kronolojik sırayla açıklamaktır. Dış iskelet sisteminin tasarımında yapılan taramalar, öncelikle tasarım ve yazılım animasyonunu gözlemlemek için AnyBody ve OpenSim gibi bir modelleme programının kullanılması gerektiğini, ardından sensörler ve motorlar kullanılarak sistemin mekanik olarak geliştirilmesi gerektiğini göstermiştir. Ayrıca OpenSim ve AnyBody kas-iskelet sistemi yazılımlarının kullanımının, mekanik tasarımların yüksek maliyet ve risklerini ortadan kaldırarak insan-dış iskelet tasarımında önemli rol oynadığı kanıtlanmıştır. Ayrıca, bu modelleme sistemleri, insan kaslarına düşen kuvvetleri ve torkları tespit ederek LEE tasarımının hızlı optimizasyonunu sağlayabilir.

Anahtar Kelimeler: Modelleme, Dış iskelet, AnyBody, AEDİ, Rehabilitasyon.

¹Corresponding author ismailcalikusu@nevsehir.edu.tr, ²uzunhise@kayseri.edu.tr, ³cetinkaya@erciyes.edu.tr, ⁴ufidan@aku.edu.tr

1. INTRODUCTION

In the world, many people lose their functionality of lower limbs and motor skills due to musculoskeletal diseases caused by either aging, such as in the elderly population or traffic accidents (O'Sullivan, Schmitz, & Fulk, 2019). Hence, many people need physical therapy to regain their lost motor skills and muscle functions. After the Second World War, mechanically designed exoskeleton systems have evolved towards mechanical designs with technology development. The Robotic exoskeleton system (RES) has been used to improve patient and rehabilitation (Calabrò et al., 2016). RES is used for medical purposes in patients and the military and industry for more comfortable transport of heavy loads by providing backbone support. However, this study focuses only on the design and modeling of RES for physical therapy.

Robotic LEE Systems (RLEES) are rehabilitation tools used to develop or recover walking ability in partial or total ability due to stroke, spinal cord injury (SCI), orthopedic, and neurological causes. With this robotic system, the neuronal pathway is activated to regain the nervous system (Louie, Eng, & Lam, 2015). The treatment's primary purpose is to mobilize the untreated lower extremities' normal distribution by providing support without causing any harmful side effects to the patients. The exoskeleton system plays an active role in gaining movement abilities such as standing, walking up the stairway, and climbing, especially in people with impaired mobility (Bogue, 2015; Federici, Meloni, Bracalenti, & De Filippis, 2015; Li et al., 2015; Nam et al., 2017; Riener, 2016).

The development of robotic exoskeleton has always been limited until the last 15 years due to being an expensive, lengthy, and complicated process. With the animation and computer-aided modeling programs such as OpenSim and AnyBody, these design processes and costs have been minimized in recent years (Agarwal, Narayanan, Lee, Mendel, & Krovi, 2010).

The rest of the paper is organized into five parts. The first part introduces the historical development and emphasized features of the RLEES designs. In the second part, the design similarities and differences between the robotic systems are discussed. The lower extremity muscle groups based on modeling and the simulation models are emphasized in the third part. In the fourth part, biomechanical analysis and design processes that are performed with modeling programs have been examined. In the last part, the modeling programs, the

characteristics of the model designs that are designed today are examined, and predictions on the possible designs in the future are discussed.

2. THE DEVELOPMENTAL FEATURES OF ROBOTIC LEE SYSTEMS

The First LEE "Hardiman" was designed in 1960 for military purposes to balance the legs' load distribution. Medically, the first robotic exoskeleton system is the Lokomat developed by Hocoma (Figure 1). The Lokomat consists of a gait orthosis mounted on a treadmill and a weight support unit that supports it. Lokomat supports and assists the patient's walking by providing functional gait training, especially for lower extremity problems (Riener, 2016). The Lokomat with having a total of 4 degrees of freedom (DOF) has the necessary trigger mechanism to provide the patient with sufficient torque for linear motion in the hip, knee, and sagittal plane (Michaud, Cherni, Begon, Girardin-Vignola, & Roussel, 2017). The simulation programs and algorithms of Lokomat provide a virtual reality environment while the patient is walking and increases the patient's mobility (Wallard, Dietrich, Kerlirzin, & Bredin, 2015). Functional motion and sensory stimulation, controlled by computer commands, help patients to walk by synchronizing with the treadmill according to the typical walking pattern in patients with Multiple Sclerosis (MS) and Spinal Cord Injury (SCI) (Hussain, Jamwal, & Ghayesh, 2017; Sapiee, Marhaban, Ishak, & Miskon, 2018).



Figure 1. Lokomat gait rehabilitation robot (Riener, 2016).

Another medical robot is the Active Leg Exoskeleton (ALEX) gait rehabilitation robot, developed by Delaware University for patients having gait disabilities (Yan, Cempini, Oddo, & Vitiello, 2015). ALEX (Figure 2) is designed using a force field controller to move humans

by the regular walking pattern in the desired trajectory. With seven degrees of freedom (DOF) points ((three in the waist joint, two in the hip joint (flexion/extension and abduction/adduction), one in the knee joint (flexion/extension) and one in the ankle (plantar / dorsiflexion)) ALEX has more DOF than Locomat. The sagittal plane's hip and knee joints move linearly with the actuators, while the wrist joints are passively designed with springs (B. Chen et al., 2016). The hip and knee joints are also equipped with force-torque sensors and encoders for feedback on human joints. ALEX is a clinically approved, exoskeleton gait system. It is used effectively in the rehabilitation of stroke patients. The human gait model and training are very close to an average persons' walking distance and speed. Thus, it provides safe and effective walking (Banala, Kim, Agrawal, & Scholz, 2008; J. Li et al., 2019).



Figure 2. ALEX III Gait Rehabilitation Robot (Stegall, Zanotto, & Agrawal, 2017).

Another gait assisting exoskeleton robot used in the lower extremity patients is the EksoGT device (Figure 3) developed by Ekso Bionics (Richmond, CA, USA). This exoskeleton robot is used to improve the mobility, strength, and endurance of patients with spinal cord injury, partial or complete loss of function in lower limb limbs due to stroke, traumatic brain injury, and MS (J. Li et al., 2019). Also, EksoGT is the first exoskeleton used in the treatment process of patients with stroke and approved by the US Food and Drug Commission (FDA) (Sirlantzis, Larsen, Kanumuru, & Oprea, 2019). EksoGT has a total of 6 DOFs, 3 DOFs per leg. Hip and knee DOF joints are actively designed to assist the patient in moving on the sagittal plane. In contrast, the ankle DOF joint was designed to be passive during the movement. For rehabilitation, the exoskeleton's support can be adjusted in parallel with the development of the patient. Clinically, EksoGT allows the patient to walk in a very similar way to a regular gait model of a healthy

person by providing additional walking opportunities (Bionics, 2016).



Figure 3. EksoGT Lower Extremity Exoskeleton (Gardner, Potgieter, & Noble, 2017).

The use of LEEs for therapeutic purposes also includes the treatment of paraplegic patients. The first of these robots was the ReWalk exoskeleton (Figure 4), developed by ReWalk Robotics (Marlborough, MA, USA). ReWalk exoskeleton was developed to increase patients' health quality with Spinal Cord Injury (SCI) daily at home and in public areas. ReWalk exoskeleton allows people with SCI to coordinate healthy hip and knee movements to keep them standing and walking (Raab, Krakow, Tripp, & Jung, 2016). ReWalk is controlled by a computer program that receives signals from sensors, sensing the motion intention attached to the patients. It detects the self-initiated gait by sensing the upper body's forward inclination and imitate the natural walking pattern of a healthy person with a strong body (RANJITHA, 2019). According to the clinical study results of ReWalk LEE, paralyzed patients can practically stand up, which presents excellent opportunities for enabling patients with paralytic disorders to achieve substantial independence and restore their quality of life. These results also show that patients experience a reduction in secondary complications from wheelchair life, such as depression and neuropathic pain (Esquenazi, Talaty, Packel, & Saulino, 2012; Hartigan et al., 2015).



Figure 4. Sections of ReWalk LEE(Manns, Hurd, & Yang, 2019).

Another gait assisting exoskeleton is Vanderbilt, developed by Goldfad (Figure 5). It provides gait assistance to patients suffering from lower extremity problems. This exoskeleton was designed like a “Lego puzzle” as in it could easily be split into pieces and reassembled (Federici et al., 2015; Rupal, Singla, & Virk, 2016). This exoskeleton’s weight is only 27 kg, but it can be used in patients up to 200 kg. The data from the sensors placed on the patient’s hip and knee joints is evaluated with an embedded computer system, and the patient is allowed to perform repetitive movements with the actuators in the knee and hip(Gurvinder & Virk, 2016). Another feature of Vanderbilt is its functional electrical stimulation with robotic assisting. This feature allows the robot to work with the muscles while at the same time reducing the energy consumption as well as helping to heal the physiological wounds of the patient (Kirsch, Alibeji, Dicianno, & Sharma, 2016; Yan et al., 2015).



Figure 5. Vanderbilt Gait Assisting Exoskeleton.

CUHK-EXO LEE system, as shown in Figure 6 from Hong Kong University, is designed to help patients having paralysis to perform routine daily movements such as sitting, standing, and walking(B. Chen et al., 2018; Yan et al., 2015). CUHK-EKO LEE has a backpack, crutches, and a user interface. This exoskeleton’s most important feature is that it has an anthropomorphic structure to provide maximum synchronization between user movement and robot joints mechanically(B. Chen et al., 2018; Liang et al., 2018). Another feature of this exoskeleton is that crutches use smart machine technology as part of human interaction. Sensor usage in crutches provides information about the patient’s motion used to control the knee and hip actuator movements and establish the necessary angles(B. Chen et al., 2015).

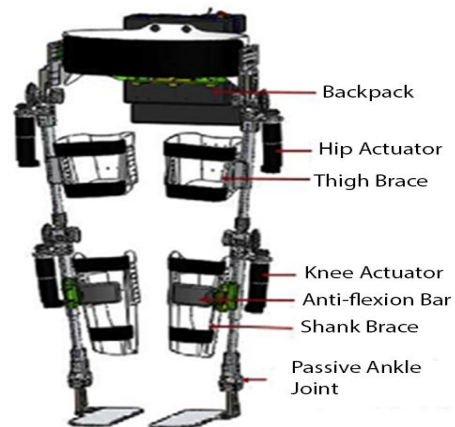


Figure 6. CUHK-EXO Exoskeleton (B. Chen, Zhong, et al., 2017).

Figure 7 displays the Hybrid Assistive Limb (HAL) is a wearable robot designed to rehabilitate patients with chronic physical disability in the lower extremity muscles due to a disease such as a stroke (Grasmücke, Cruciger, Meindl, Schildhauer, & Aach, 2017). While

potentiometers are used to measure the joint angle, the ground response force sensors, gyroscope and accelerometer are used for a body posture assessment. Skin surface electromyography (SEMG) electrodes placed on the knee and the hip are used to predict the intended movement (Cha & Kim, 2018; Chinmilli, Redkar, Zhang, & Sugar, 2017). Also, HAL uses a control system that allows the user and the exoskeleton to synchronize their movements.



Figure 7. HAL exoskeleton (Jansen et al., 2018).

The Windwalker project organized by Twente University could be considered a new perspective in LEE designs (Figure 8). This exoskeleton design project consists of three main elements: Brain-Computer Interface (BCI), Virtual Reality, and mechanical design control (Mironov, Kastalskiy, Lobov, & Kazantsev, 2017). Mechanically, the MindWalker exoskeleton is equipped with support for flexion/extension and knee flexion/extension. These actuators are designed using the Series Elastic Actuating (SEA) principle, based on the muscles' anatomical features, allowing different control implementations and safe and compliant interactions with their surroundings (Y. Li et al., 2019). In this exoskeleton, an algorithm has been developed to determine the user-intended motion to assist weight shift and online-adaptation of the step width in maintaining balance. This algorithm works with smart sensors such as precision joint angle sensors, inertial measuring units (IMU), force/torque sensors, obstacle detection, etc. These sensors are connected to a network generated by the fast field bus system called EtherCAT (B. Chen, Zhao, Ma, Qin, & Liao, 2017; Ren, Deng, Zhao, & Li, 2018; Wang et al., 2014).

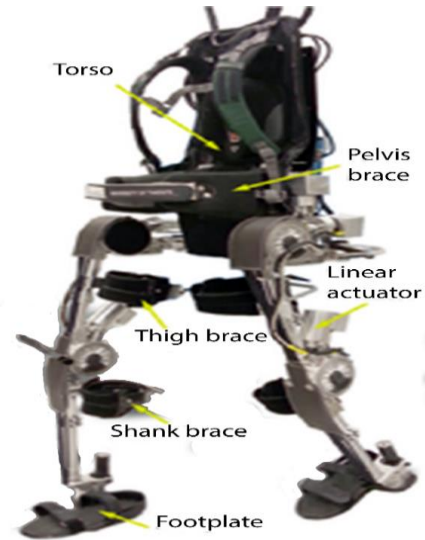


Figure 8. Prototype design of Mindwalker Exoskeleton (Wang et al., 2015).

3. SIMILAR AND DIFFERENT ASPECTS OF LEE SYSTEMS

In recent years, the studies of all LEEs on the hip and knee joints, whether mechanical or robotic, are designed with dynamic movement capability where the ankle joint is designed as passive. LEE designs are aimed to support a balanced distribution of the load and aid the human backbone (Zhang et al., 2017). The mechanical parts design intends to ensure a balanced distribution of the load, thus reducing the weight and effort on the spine, joints, and muscles to the minimum (B. Chen, Zhong, et al., 2017; Meng et al., 2015). RLEE assisted gait training and treatment programs to aim to improve the patient's neuronal pathway activity by increasing muscle and joint activities. The robotic gait-assisted system is based on the human gait model, and therefore, the human gait analysis must be well studied. In gait analysis studies, EMG and joint freedom are analyzed by video and image processing. These methods are generally used to determine the movement and movement intention (Bulea, Lerner, & Damiano, 2018). It has recently been observed that EEG and EMG are used together to assess RLEEs (Crea et al., 2018). Artificial intelligence algorithms are applied to work following physiological and robotic applications (Haeberle et al., 2019; Ling, Yu, & Li, 2019). Additionally, utilized visual-virtual games enable patients to perform their movements without being clenched and increase their participation in the rehabilitation process (Mubin, Alnajjar, Jishtu, Alsinglawi, & Al Mahmud, 2019).

Table 1. Some commercial LEE's and their properties.

Exoskeleton Name	Usage Purpose	Actuated DOF	Actuator	Sensors	Specific Design Features
BLEXX (Agrawal, Dube, Kansara, Shah, & Sheth, 2016; Zoss, Kazerooni, & Chu, 2005)	Human Strength Augmentation Gait Assistance	Hip Flexion/Extension Hip Abduction/Adduction Knee Flexion/Extension Ankle Flexion/Extension	Electric Motor	Force sensor	Body local area network Hybrid position and force controller
HAL 5 (Shah, Mascarenhas, Menon, & Mengle, 2019; Yeung & Tong, 2018)	Human Strength Augmentation Gait Rehabilitation	Hip Flexion/Extension Knee Flexion/Extension Shoulder Flexion/Extension Elbow Flexion/Extension	DC servo Motor Harmonic reducer	Plantar pressure sensor Angle sensor Gyroscope	Conscious recognition based on plantar pressure and torso angle
HEXAR (W. Kim, Kim, Lim, Moon, & Han, 2017; Yeem, Heo, Kim, & Kwon, 2018)	Human Strength Augmentation	Hip Flexion/Extension Knee Flexion/Extension	Electric Motor	Physical Human-Robot Interaction (pHRI) sensor Force sensor	pHRI-based control Quasi-anthropomorphic Active/Passive/Quasi-passive Joint
LOKOMAT(Riener, 2016; Yue, Lin, Zhang, Qiu, & Cheng, 2018)	Gait Rehabilitation	Hip Flexion/Extension Knee Flexion/Extension	Electric Motor	Position sensor Force Sensor	Bodyweight support system Visual feedback
ROBOGAIT(Poberznik, 2018; van Hedel & Aurich, 2016)	Gait Rehabilitation	Hip Flexion/Extension Knee Flexion/Extension	Electric Motor	Position sensor Force Sensor	Weight supported system Visual feedback
ALEX (UNIVERSITY OF DELEWARE-USA) (Jin, 2018; Nam et al., 2017)	Gait Rehabilitation for stroke patients	Hip Flexion/Extension Knee Flexion/Extension	Linear Actuator (Max Torque:50Nm)	Encoder Force torque Footswitch sensor	Human-robot coordination
EKSO BIONICS (Brenner, 2016)	Human Strength Augmentation Gait Rehabilitation	Hip Flexion/Extension Knee Flexion/Extension	Electric Motor	Position sensor Force Sensor Pressure sensor	Microcomputer controlled algorithm
REWALK(Neuhaus et al., 2011; Ortlieb, Bouri, & Bleuler, 2017)	Human Locomotion Assistance	Hip Flexion/Extension Knee Flexion/Extension	Electric Motor	Position sensor Force Sensor Pressure sensor Internal sensor	Windows operated computer Graphical user interface
VANDERBILT (Murray & Goldfarb, 2012; Rupal et al., 2016)	Human Locomotion Assistance	Hip Flexion/Extension Knee Flexion/Extension	Electric Motor	Position sensor Force Sensor	Low weight Functional electrical stimulation

CUHK-EXO(B. Chen et al., 2018; B. Chen, Zhong, et al., 2017)	Human Locomotion Assistance	Hip Flexion/Extension Knee Flexion/Extension	Electric Motor	Force sensing sensor Force sensor	Motion intention recognition PD controller Human-machine interface with mobile phone
--	-----------------------------	---	----------------	--------------------------------------	--

Although the designs mechanically are similar to each other, their sensor technologies and control algorithms are differentiated. Musculoskeletal modeling has gained importance in applying control algorithms and design features, which are expensive and time-consuming to be tested in real exoskeletal systems (Valente, Crimi, Vanella, Schileo, & Taddei, 2017). Therefore, the Table 2. Types of LEE Designed in Universities.

following sections are focused on the application of Musculoskeletal modeling in LEE modeling. Table 1 presents the commercially produced RLEEs, and Table 2 features the prototype RLEEs produced by universities.

Exoskeleton Name	Usage Purpose	Actuated DOF	Actuator	Sensors	Specific Design Features
Walking Assistance LEE (Yonsei University of South Korea) (J.-H. Kim et al., 2015; Li et al., 2015)	Patients with lower limb analysis	Hip Flexion/Extension Knee Flexion/Extension	200 W Brushless DC Motor, Harmonic reducer, Hip joint torque:79.3Nm, Knee joint torque:42.2Nm	Angle, Force, Plantar contact, and Inclinometer sensor	Cop Stability control Kinematic Analysis
IHMC Mobility Assist Exoskeleton (Florida Institute for Human and Machine Cognition - America) (Ansari, Atkeson, Choset, & Travers, 2015; Park, Lee, Shin, & Cho, 2015)	Paralysis patients for human locomotion assistance	Hip Flexion/Extension, Abduction/Adduction Knee Flexion/Extension	RSEA Mong BN34-25Eu-02 brushless motor, Harmonic reducer, Output Torque:80Nm	An optical rotary encoder, Linear encoder, Footswitch	Position control, Force/Torque control
Lower Limb Power-Assist Exoskeleton (Japan Saga University) (Li et al., 2015)	Lower extremity weakness for daily usage	Hip Flexion/Extension Knee Flexion/Extension	Maxon Dc motors	Encoder, Force, EMG, Laser Ranging, Plantar contact sensor	ZMP stability control Conscious EMG signal based control
Wearable Power Assist Locomotor (WPAL-Japan Nagoya University) (Fuse et al., 2019; Yatsuya et al., 2018)	Patient with lower limb analysis	Hip Flexion/Extension Knee Flexion/Extension Ankle dorsiflexion/plantar Flexion	DC Servo Motor	Three axes angular acceleration, Plantar pressure sensor Encoder	Swing phase Step trajectory Control of lower limb
ATLAS (Centre for automation and Robotics in Spain) (Cestari, Sanz-Merodio, Arevalo, & Garcia, 2014; Sanz-Merodio, Cestari, Arevalo, & Garcia, 2012)	Quadriplegic patients	Hip Flexion/Extension Knee Flexion/Extension	Brushless Maxon motors. Harmonic reducer, Peak torque:57Nm, Average Torque: 32Nm	Plantar pressure distribution sensor Angle Sensor	Cop stability Control, Conscious recognition

Lower Body Exoskeleton (University of Salford UK) (Costa & Caldwell, 2006)	Patients with lower-limb paralysis	Hip Flexion/Extension, Abduction/Adduction Knee Flexion/Extension Ankle dorsiflexion/plantar Flexion	Pneumatic muscle actuator (pMAs), Torque:60 Nm	EMG sensor	The design of the actuator
Knee-Ankle-Foot Robot (National University of Singapore) (G. Chen, Salim, & Yu, 2015; G. Chen & Yu, 2014)	Rehabilitation robot	Knee Flexion/Extension Ankle dorsiflexion/plantar Flexion	Maxon DC brushless motor, Harmonic reducer, screw nut, Maximum output torque:700N	EMG sensor, Angular sensor Force sensor Acceleration sensor	The design of the actuator Gait phase Classification
Ortholog (the Rio Grande do Sul Federal University-Brazil) (Roer, Abehsera, & Sagi, 2015)	Gait rehabilitation for Spinal cord injury patients	Hip Flexion/Extension Knee Flexion/Extension	24V/150WDC Motor Planetary gear reducer	Encoder	Brain wave control
Walking Supporting Exoskeleton(WSE((Necmettin Erbakan University-Turkey) (Önen, Botsah, Kalyoncu, Şahin, & Tinkır, 2017)	Human walking assistance for Disabled People	Hip Flexion/Extension Knee Flexion/Extension	24V/100W DC Servo motor Reducer (100:1)	Plantar Pressure sensor Holzer effect sensor	Design of mechanical structure
Robotic Exoskeleton(Carlos III :University Spain) (González-Vargas, Ibáñez, Contreras-Vidal, Van der Kooij, & Pons, 2016)	Robotic walking assistance for Lower limb patients	Hip Flexion/Extension	Hip 24V/90W Maxon DC Motor	Inclinometer Force Sensor Imu Sensor	Trajectory Control

4. MODELING OF LEE ROBOTS

The design process of LEE robots includes hazards and risks due to the inability to fully understand the human-robot interaction(Skantze & Johansson, 2015). For this reason, the modeling of robots in terms of mechanical design and control mechanisms of LEEs is essential. Modeling enables the design of ergonomic systems to balance the load on the human body and the robotic garments' durability to be worn on humans.

The interaction between the musculoskeletal system and the exoskeleton's design needs to be well understood for maximum effect and minimum discomfort. For this purpose, many modeling programs such as MSC software, Freebody, Matlab, SimMechanics, Maplesim, AnyBody, and OpenSim are being used to perform dynamic analysis exoskeletons on the human neuromuscular structure. The most widely used modeling software with high-quality data production on humans' musculoskeletal system is the AnyBody Tech commercial software and Open-source OpenSim modeling software.

4.1. OpenSim Modelling Software

OpenSim is open-source software developed by Stanford University in 2007 and is a modeling program for the musculoskeletal system. This modeling program enables kinematic and dynamic analysis of gait and body movement(Khamar, Edrisi, & Zahiri, 2019). It enables new active and passive prostheses, such as new exoskeletons, based on the data analysis and model generation. An example of this is the study conducted by Baskar H et al.(2016) using OpenSim in which application of a LEE musculoskeletal model showed a reduction of torque and metabolic energy requirement for the hips, knees, and wrists during gait (Baskar & Nadaradjane, 2016; Mortensen & Merryweather, 2018).

4.2. AnyBody Modelling Software

The AnyBody modeling system is a commercial software offered by AnyBody Tech, enabling the analysis of human interaction with the external environment. AnyBody allows modeling of the lower limb, upper extremity, or the whole body in any desired size (Huysamen, Nugent, & O'Sullivan, 2014). In this way, kinematic and dynamic analysis of the person's

walking and daily movements in the desired height and weight can be simulated (Díez et al., 2017). Also, the effects of joint-span, muscle strength, and torques, and human-exoskeleton interactions can be investigated. AnyBody Tech enables the design of ergonomic LEEs suitable for human skeletal structure through modeling according to the human musculoskeletal system. Access to previous exoskeleton models acts as a base and starts to design new exoskeletons (Zhou, Li, & Bai, 2017). An example of this is Fournier B. (2018) 's study, the modelling and characterization of a passive biomimetic ankle for a Lower Extremity Powered Exoskeleton (LEPE), defining requirements for a mechanical ankle design that can reduce crutch loads and thus extend the use of LEPE. In this study, it has been suggested that passive variable stiffness including second-order elastic spring elements for ankle using the existing exoskeletal and crutches models can be applied in the biomimetic ankle functions of the ankles and thus, the LEPE user will have increased vertical movement, control and reduced use of crutches(B. Fournier, 2018).

5. MODELLING AND BIOMECHANICAL ANALYSIS OF LEE

To examine an exoskeleton's physical behavior, it is necessary to perform kinematic and dynamic analysis and obtain a mathematical model. If the rotation of angle positions generated by the hip and knee joints during a single human walking cycle is identified, the actuator forces required to generate the walking movement can be calculated. As the exoskeleton is a system that assists in walking movements, the assisted movement is considered to be slow motion, and the dynamic loads are neglected. LEE models are generally based on the double pendulum system with 2 DOFs which are considered parallel to the exoskeleton. The free-body diagram representing the system is shown in Figure 9. 11 represents the thigh bone while l2 represents the calf bone. θ_1 shows the position in which the hip joint refers in the vertical direction, while θ_2 indicates the position of the knee joint relative to the thigh. The P1 and P2 show the variable lengths of the upper and lower actuators, respectively. It is possible to calculate the length of the two actuators as a function of the hip and knee angle positions. In particular, P2 is calculated using Equation 1.

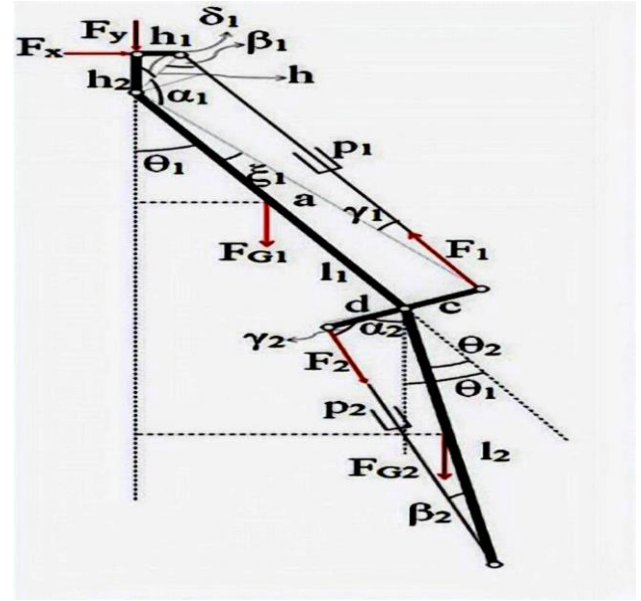


Figure 9. Kinematic structure of double DOF exoskeleton.

$$\begin{cases} \alpha_2 = \frac{\pi}{2} - \theta_2 \\ P_2 = \sqrt{l_2^2 + d^2 - 2l_2d \cos \alpha_2} \end{cases} \quad (\text{Eq.1})$$

On the other hand, P1 can be calculated as in Equation 2.

$$\begin{cases} \alpha = \sqrt{l_1^2 + c^2} \\ h = \sqrt{h_1^2 + h_2^2} \\ \xi_1 = \sin^{-1} \frac{c}{a} \\ \delta_1 = \sin^{-1} \frac{h_1}{h} \\ \alpha_1 = \pi - \theta_1 - \xi_1 - \delta_1 \\ P_1 = \sqrt{\alpha^2 + h^2 - 2ah \cos \alpha_1} \end{cases} \quad (\text{Eq.2})$$

After calculating the actuators' length, other angles such as those between the upper and lower structures can be easily obtained using Equations 3 and 4, respectively.

$$\begin{cases} \beta_2 = \sin^{-1} \left(\frac{d}{P_2} \sin \alpha_2 \right) \\ \gamma_2 = \pi - \alpha_2 - \beta_2 \end{cases} \quad (\text{Eq.3})$$

$$\begin{cases} \beta_1 = \cos^{-1} \left(\frac{h^2 + P_1^2 - \alpha^2}{2hP_1} \right) \\ \gamma_1 = \pi - \alpha_1 - \beta_1 \end{cases} \quad (\text{Eq.4})$$

F_{G1} and F_{G2} , taking into account the force motion system, the thigh and the Center of Mass (COM) represents forces resulting from gravity, F1 and F2 represent the upper and lower actuation forces. M1 and M2 are the approximate weights of the thigh and cavity sections applied to the COM, respectively. Tibia and femur forces, generated by the actuators, are calculated the balancing torque from a simple knee and hip center using Equations 5 and 6, respectively.

$$F_2 = \frac{m_2 g \frac{l_2}{2} \sin(\theta_1 - \theta_2)}{l_2 \sin \beta_2} \quad (\text{Eq.5})$$

$$F_1 = \frac{m_1 g \frac{l_1}{2} \sin \theta_1 + m_2 g (l_1 \sin \theta_1 + \frac{l_2}{2} \sin(\theta_1 - \theta_2))}{h \sin \beta_1} \quad (\text{Eq.6})$$

Equation 5 and 6 show how to achieve upper and lower actuator forces as a function of hip and knee angular positions θ_1 and θ_2 (Daines, 2019; Xinyi, Haoping, Yang, Zefeng, & Laurent, 2015). LEE modeling has been used to perform mechanical requirements and biomechanical analyses of human exoskeleton interactions. This provides convenience to the LEE designer in terms of both time and cost. Also, it allows the development of optimal LEE designs for muscles and joints (Arslan, Karabulut, Ortes, & Popovic, 2019). The literature's initial studies show that each leg and joint group's length is treated as a rotating joint of a body, and each joint is similar to a robot arm model. In these studies, joint angles and human movement can be considered as angular. Although such studies are known as skeletal models, they are considered as double pendulum models with simple two or three DOFs. Such models are often used to test and develop control algorithms with programs such as Matlab and SimMechanics (Ashkani, Maleki, & Jamshidi, 2017; Virk et al., 2016). The purpose of these control algorithms is to balance inertia and to provide users with low impedance, ensuring gait is performed with the least possible energy (Weerasingha, Withanage, Pragnathilaka, Ranaweera, & Gopura, 2018). In order to examine the effects of the exoskeleton on muscles and joints, the effects of extra weights and dimensions on joint angles are added to the musculoskeletal model with a three dimensional (3D) exoskeleton created by CAD software (Wu et al., 2019). Recently, 3D LEE models installed in musculoskeletal modeling programs such as AnyBody and OpenSim enable specific exoskeletal system designs for patients with distress and mobility problems due to their musculoskeletal system. (Lajeunesse, Routhier, Vincent, Lettre, & Michaud, 2018). Besides, with the development of new control paradigms, it is possible to design eliminate or minimize the negative effects of movements and related mechanisms that cause extra force on musculoskeletal system, such as walking, sitting, jumping, rope jumping, etc.

Studies on LEE model designs according to the human muscle model and their effects have started in recent years. One of these studies investigates the lower extremities model's effect on the musculoskeletal model on OpenSim conducted by Ferrari et al.(2008) (Ferrari et al., 2008). In this study, joint and joint angles were analyzed dynamically by biomechanical analysis during normal gait with and without LEE. However, the lack of ground reaction force and ground contact model analysis

in the study decreased the results' accuracy. In the study conducted by Xu et al. (2019), RLEE design with Magnetorheological Actuators was analyzed using the AnyBody modeling program. The system is operated in two modes: robot and active human mode. Inactive robot mode, it is seen that RLEE provides adjustable torque and reduces power consumption compared to the active human model(Xu et al., 2019). The study was conducted by B. N. Fournier et al. (2018) designed two RLEE models, SCI and biomimetic. It was observed that the biomimetic model could be used in RLEE designs to reduce crutch requirement and optimization of the SCI model to provide more effective walking with a crutch (B. N. Fournier, Lemaire, Smith, & Doumit, 2018). In the study of Cho. et al. (2012), the effects of load-lifting movement on the joint forces were examined on the human-skeleton model developed with two constraints. The use of the strap on these effects reduces the user's comfort and states that it places an additional load on the joints when not in use. However, it was stated that the load distributed should be balanced using the wide belt(Cho, Kim, Yi, Jung, & Lee, 2012).

In the recent exoskeleton design simulations, there is a force called ground reaction force (GRF). The ground reaction force is a force applied to the ground by an object in contact with the ground. The ground reaction force is divided into two; vertical and horizontal force. The vertical ground reaction force can be used to examine the effects of loading effects and walking mechanics of the reinforced exoskeleton assisted gait at a different weight, walking speed, and support levels.

5.1. Human Gait and Biomechanical Effects

Human gait is a result of complex muscle movements. Human gait can be defined as the locomotion achieved through human limbs that change the subject's position from the previous position. The human gait is considered as a set of movements consisting of certain phases with the same cycle. When the walking cycle is considered, it consists mainly of two phases, single and double support phase. The single-phase is where one foot is in contact with the ground, and the other is in the swinging position and the air. The double support phase is when one foot is standing on the ground, and the other standing foot leaves the ground. In human gait, only one foot is in contact with the ground. Thus, it differs from running in this way.

If the human walk begins with the right leg, the first leg moved from the human's vertical position is the right leg, moving forward then put on the ground. The first stationary walking step includes the left leg's placement

at the set position, which provides a single left leg and foot support until the right leg movement is completed. The second gait step is similar to the first gait step, but this step has one leg support, the left leg, until the right leg is lifted and placed back on the ground. Repeating continuous walking steps causes a continuous movement in the sagittal plane. As shown in Figure 10, the gait cycle consists of 8 states; 5 motion in the stance phase and 3 in the swing phases (Alamdari & Krovi, 2017).

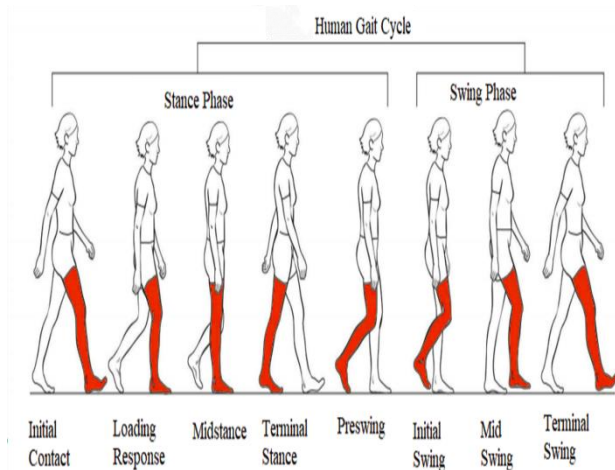


Figure 10. Human Gait Cycle.

A gait cycle is described as a percentage rather than the elapsed time. In this case, one step was expressed as a hundred degrees, the Heel Strike (HS) was 0%, and the location of the same foot to the ground was determined as 100%. During the normal gait cycle, the hip, knee, and ankle joints are subject to a series of movements. Hip motion can be considered as a combination of two basic movements. First is the horizontal balance of the hip that occurs in the stance phase and has a primary role in keeping the body in balance, while the second is hip Flexion during the swing phase. During the stance phase, the knee is the primary determinant of limb stability, and knee flexibility in the release phase is the main factor in the freedom of the extremity. At average walking speed, each double support period is about 22% of the walking cycle and is generally accepted as 20%. In mid-standing, the total body weight is transferred to the stretching knee. The ankle motion range is not substantial but is critical to progression and shock absorption during stance. The body is supported on a single limb throughout 80% of the gait cycle.

While walking, the body's mass center rises to its highest point in the middle stance when one foot passes vertically and then falls to its lowest point by the separation of the legs. Essentially, kinetic and potential

energy are continuously exchanged in this process. A reverse dynamic analysis should be performed to determine the required torque/force in each joint during gait. For this purpose, kinetic data and external forces obtained from the visual sensors should be recorded during the experiment. The GRF is the main force acting on the body during human movements. Since the mass body moves in three directions, a three-dimensional force vector, consisting of vertical and two horizontal sectional constituents, moves on the contact area. These horizontal forces are usually divided into anterior-posterior and medial-lateral directions. These forces are small compared to the vertical GRF. The vertical GRF will be zero at the time of contact with the ground during HS and will gradually rise almost in a fraction of a second against the body weight. In the footplate, the body mass moves downwards and extends down on the leg. It is necessary to apply a vertical force more significant than the bodyweight on foot to slow down the movement and support the body weight. It shows 120% of the bodyweight applied to the foot at this moment for the subject. In the middle stance, the movement of the body's center of mass is upward. This movement creates an upward acceleration that allows a force less than bodyweight to support the body. At this moment, it shows 63% of the body weight in the middle. In the heel, the body mass accelerates forward and upward for the other leg's stance phase. This means the extra weight is applied to the bodyweight to support the body. Finally, the last swing is when contact with the ground is lost, and the force returns to zero. During the stance phase, the foot forces move in the forward and backward position as the body stops and then moves more quickly in the forward direction. Consequently, it can assume that the resultant force passes through the center of gravity of the entire body in motion (Alamdari & Krovi, 2017).

6. DISCUSSION

A mechanical or robotic exoskeleton is designed for three purposes. First, the mechanical design distributes the load in a balanced way to apply the least possible load force on the joints and muscles. Second, mechanical designs strengthen the muscles with neuronal pathway activity stimulation by rotating the joints at certain angles in patients with insufficient muscle strength and spinal cord injury. Finally, it is aimed to control the walking movement of patients initiated by biological signals such as Electromyogram (EMG) or Electroencephalogram (EEG), therefore rehabilitating the patient and improving the quality of life and socialization.

LEE designs focus on two areas: mechanics and software. In mechanical designs, comfort, reduced equipment weight, resistance, extended service life, and contact surface come to the fore. In software design studies, fast and effective control algorithms, systems that process and evaluate information from sensors are studied predominantly.

Modeling plays an essential role in LEE designing, as this process is considered expensive and complicated. For testing the developed control algorithms, modeling programs such as SimMechanics and Maplesim are used. However, musculoskeletal modeling programs such as OpenSim and AnyBody are used to perform human-exoskeletal interactions and kinematic analyses. By analyzing the walking kinematics, the body segments and length should be carefully designed using joint force and moment. Another result obtained in the kinematic analysis is the increase in muscle force applied to the ground as the muscle strength increases. This ground reaction force can be calculated by programs using inverse kinematic calculations in a similar way to reality. Although the inverse kinematic method enables us to calculate the GRF, it is still impossible to calculate the segmental analysis's ground loading effects.

In musculoskeletal models such as AnyBody and OpenSim, Videos and EMG signals were analyzed to determine the effects and optimal gait activities. Thus, the effects of LEE designs and gait activities on the muscles and nervous system were investigated. In AnyBody and OpenSim designs, muscles that are not or weakly functioning can be exercised while the force and torque on the joints and muscles and their effects on the joint angles can be calculated in patients suffering from SCI and stroke. In this way, LEE designs can be realized to reduce the minimum weight on the troubled muscles and joints during human gait.

LEE designs aim to develop torque control algorithms and to test them on models. By examining and comparing the integrating forces between the exoskeleton and user, the control mechanism's reduction effects on user loads, such as on joint torques, reaction forces, and muscle activations, can be examined.

7. CONCLUSIONS

To date, studies on the design of LEEs have focused on ergonomics and comfort or on the control of joint motors with appropriate control algorithms. Since this procedure is generally expensive and has certain risks

for patients, three-dimensional geometric models of the lower extremities have been created and dressed on musculoskeletal models to minimize these procedures' risks. Above mentioned studies focus on the torque-forces and motion range of the muscles and joints following the gait pattern. Although the number of musculoskeletal models on some disease characteristics is very few, some restricted or disabled muscles and the effect of muscle deficiency or deficiencies on gait and muscles have been investigated. Besides, actual walking and muscle strength measurements and range of motion were obtained through cameras and sensors, and software and algorithms have significantly improved these measurements' quality. Future works will conceivably include a process of coordination with artificial intelligence, sensors, and programming. In further studies, exoskeletal model designs involving human exoskeletal interaction can be continued by modeling six muscles in the lower extremity and other muscles. With artificial intelligence algorithms, where ground reaction force is sufficient, less force and torque will be applied to muscle groups.

DECLARATIONS

Conflict of Interest: The authors declare that they have no conflict of interest.

Ethical Approve: This chapter does not contain any studies with human participants or animals performed by any of the authors. The data used in the study were obtained from the UCI Machine Learning Repository database.

Funding: Erciyes University Scientific Research Projects Coordinator supports this work with FDK-2018-8375 project code.

Contributions: The authors contribute equally to the article.

REFERENCES

- Agarwal, P., Narayanan, M. S., Lee, L.-F., Mendel, F., & Krovi, V. N. (2010). *Simulation-based design of exoskeletons using musculoskeletal analysis*. Paper presented at the International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference.
- Agrawal, A., Dube, A. N., Kansara, D., Shah, S., & Sheth, S. (2016). Exoskeleton: the friend of mankind in context of rehabilitation and enhancement. *Indian Journal of Science and Technology*, 9(S1).

- Alamdari, A., & Krovi, V. N. (2017). A review of computational musculoskeletal analysis of human lower extremities *Human Modelling for Bio-Inspired Robotics* (pp. 37-73): Elsevier.
- Ansari, A., Atkeson, C. G., Choset, H., & Travers, M. (2015). A survey of current exoskeletons and their control architectures and algorithms (Draft 4.0): Pittsburgh, USA: Carnegie Mellon University.
- Arslan, Y. Z., Karabulut, D., Ortes, F., & Popovic, M. B. (2019). Exoskeletons, Exomusculatures, Exosuits: Dynamic Modeling and Simulation. *Biomechatronics*, 305.
- Ashkani, O., Maleki, A., & Jamshidi, N. (2017). Design, simulation and modelling of auxiliary exoskeleton to improve human gait cycle. *Australasian physical & engineering sciences in medicine*, 40(1), 137-144.
- Banala, S. K., Kim, S. H., Agrawal, S. K., & Scholz, J. P. (2008). *Robot assisted gait training with active leg exoskeleton (ALEX)*. Paper presented at the 2008 2nd IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics.
- Baskar, H., & Nadaradjane, S. M. R. (2016). Minimization of metabolic cost of muscles based on human exoskeleton modeling: a simulation. *Int. J. Biomed. Eng. Sci*, 3(4), 9.
- Bionics, E. (2016). Ekso GT Robotic Exoskeleton cleared by FDA for use with stroke and spinal cord injury patients.
- Bogue, R. (2015). Robotic exoskeletons: a review of recent progress. *Industrial Robot: An International Journal*.
- Brenner, L. (2016). Exploring the psychosocial impact of Ekso Bionics Technology. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 97(10), e113.
- Bulea, T. C., Lerner, Z. F., & Damiano, D. L. (2018). *Repeatability of EMG activity during exoskeleton assisted walking in children with cerebral palsy: implications for real time adaptable control*. Paper presented at the 2018 40th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC).
- Calabrò, R. S., Cacciola, A., Bertè, F., Manuli, A., Leo, A., Bramanti, A., . . . Bramanti, P. (2016). Robotic gait rehabilitation and substitution devices in neurological disorders: where are we now? *Neurological Sciences*, 37(4), 503-514.
- Cestari, M., Sanz-Merodio, D., Arevalo, J. C., & Garcia, E. (2014). ARES, a variable stiffness actuator with embedded force sensor for the ATLAS exoskeleton. *Industrial Robot: An International Journal*, 41(6), 518-526.
- Cha, D., & Kim, K. I. (2018). A lower limb exoskeleton based on recognition of lower limb walking intention. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 43(1), 102-111.
- Chen, B., Ma, H., Qin, L.-Y., Gao, F., Chan, K.-M., Law, S.-W., . . . Liao, W.-H. (2016). Recent developments and challenges of lower extremity exoskeletons. *Journal of Orthopaedic Translation*, 5, 26-37.
- Chen, B., Ma, H., Qin, L.-Y., Guan, X., Chan, K.-M., Law, S.-W., . . . Liao, W.-H. (2015). *Design of a lower extremity exoskeleton for motion assistance in paralyzed individuals*. Paper presented at the 2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO).
- Chen, B., Zhao, X., Ma, H., Qin, L., & Liao, W.-H. (2017). Design and characterization of a magneto-rheological series elastic actuator for a lower extremity exoskeleton. *Smart Materials and Structures*, 26(10), 105008.
- Chen, B., Zhong, C.-H., Ma, H., Guan, X., Qin, L.-Y., Chan, K.-M., . . . Liao, W.-H. (2018). Sit-to-stand and stand-to-sit assistance for paraplegic patients with CUHK-EXO exoskeleton. *Robotica*, 36(4), 535.
- Chen, B., Zhong, C.-H., Zhao, X., Ma, H., Guan, X., Li, X., . . . Law, S.-W. (2017). A wearable exoskeleton suit for motion assistance to paralysed patients. *Journal of orthopaedic translation*, 11, 7-18.
- Chen, G., Salim, V., & Yu, H. (2015). *A novel gait phase-based control strategy for a portable knee-ankle-foot robot*. Paper presented at the 2015 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR).
- Chen, G., & Yu, H. (2014). A portable powered knee-ankle-foot orthosis. *Journal of Medical Devices*, 8(2), 020927.
- Chinmilli, P., Redkar, S., Zhang, W., & Sugar, T. (2017). A review on wearable inertial tracking based human gait analysis and control strategies of lower-limb exoskeletons. *Int. Robot. Autom. J*, 3(7), 00080.

- Cho, K., Kim, Y., Yi, D., Jung, M., & Lee, K. (2012). Analysis and evaluation of a combined human-exoskeleton model under two different constraints condition. *Proceedings of the International Summit on Human Simulation*, 23-25.
- Costa, N., & Caldwell, D. G. (2006). *Control of a biomimetic" soft-actuated" 10dof lower body exoskeleton*. Paper presented at the The First IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics, 2006. BioRob 2006.
- Crea, S., Nann, M., Trigili, E., Cordella, F., Baldoni, A., Badesa, F. J., . . . Aracil, N. G. (2018). Feasibility and safety of shared EEG/EOG and vision-guided autonomous whole-arm exoskeleton control to perform activities of daily living. *Scientific reports*, 8(1), 10823.
- Daines, K. (2019). Crutch Assisted Sit-to-Stand and Stand-to-Sit with a Powered Exoskeleton.
- Diez, J. A., Blanco, A., Catalán, J. M., Bertomeu-Motos, A., Badesa, F. J., & García-Aracil, N. (2017). *Mechanical design of a novel hand exoskeleton driven by linear actuators*. Paper presented at the Iberian Robotics Conference.
- Esquenazi, A., Talaty, M., Packel, A., & Saulino, M. (2012). The ReWalk powered exoskeleton to restore ambulatory function to individuals with thoracic-level motor-complete spinal cord injury. *American journal of physical medicine & rehabilitation*, 91(11), 911-921.
- Federici, S., Meloni, F., Bracalenti, M., & De Filippis, M. L. (2015). The effectiveness of powered, active lower limb exoskeletons in neurorehabilitation: a systematic review. *NeuroRehabilitation*, 37(3), 321-340.
- Ferrari, A., Benedetti, M. G., Pavan, E., Frigo, C., Bettinelli, D., Rabuffetti, M., . . . Leardini, A. (2008). Quantitative comparison of five current protocols in gait analysis. *Gait & posture*, 28(2), 207-216.
- Fournier, B. (2018). *Model and Characterization of a Passive Biomimetic Ankle for Lower Extremity Powered Exoskeleton*. Université d'Ottawa/University of Ottawa.
- Fournier, B. N., Lemaire, E. D., Smith, A. J., & Doumit, M. (2018). Modeling and simulation of a lower extremity powered exoskeleton. *IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering*, 26(8), 1596-1603.
- Fuse, I., Hirano, S., Saitoh, E., Otaka, Y., Shigeo Tanabe, R., Masaki Katoh, R., . . . Tetsuya Tsunoda, M. (2019). Gait reconstruction using the gait assist robot WPAL in patients with cervical spinal cord injury. *injury*, 10, 88-95.
- Gardner, A. D., Potgjeter, J., & Noble, F. K. (2017). *A review of commercially available exoskeletons' capabilities*. Paper presented at the 2017 24th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP).
- González-Vargas, J., Ibáñez, J., Contreras-Vidal, J. L., Van der Kooij, H., & Pons, J. L. (2016). *Wearable Robotics: Challenges and Trends: Proceedings of the 2nd International Symposium on Wearable Robotics, WeRob2016, October 18-21, 2016, Segovia, Spain* (Vol. 16): Springer.
- Grasmücke, D., Cruciger, O., Meindl, R. C., Schildhauer, T. A., & Aach, M. (2017). Experiences in four years of HAL exoskeleton SCI rehabilitation *Converging Clinical and Engineering Research on Neurorehabilitation II* (pp. 1235-1238): Springer.
- Gurvinder, B. S. R. A. S., & Virk, S. (2016). Lower Limb Exoskeletons: A Brief Review.
- Haeberle, H. S., Helm, J. M., Navarro, S. M., Karnuta, J. M., Schaffer, J. L., Callaghan, J. J., . . . Ramkumar, P. N. (2019). Artificial intelligence and machine learning in lower extremity arthroplasty: a review. *The Journal of arthroplasty*.
- Hartigan, C., Kandilakis, C., Dalley, S., Clausen, M., Wilson, E., Morrison, S., . . . Farris, R. (2015). Mobility outcomes following five training sessions with a powered exoskeleton. *Topics in spinal cord injury rehabilitation*, 21(2), 93-99.
- Hussain, S., Jamwal, P. K., & Ghayesh, M. H. (2017). Effect of body weight support variation on muscle activities during robot assisted gait: a dynamic simulation study. *Computer methods in biomechanics and biomedical engineering*, 20(6), 626-635.
- Huysamen, K., Nugent, R., & O'Sullivan, L. (2014). BIOMECHANICAL AND PHYSIOLOGICAL ANALYSIS OF AN EXOSKELETON FOR MANUAL HANDLING. *Irish Ergonomics Society*, 16.
- Jansen, O., Grasmuecke, D., Meindl, R. C., Tegenthoff, M., Schwenkreis, P., Sczesny-Kaiser, M., . . . Aach, M. (2018). Hybrid Assistive Limb exoskeleton HAL in the rehabilitation of chronic spinal cord injury: proof of

concept; the results in 21 patients. *World neurosurgery*, 110, e73-e78.

Jin, X. (2018). *A Novel Design of a Cable-driven Active Leg Exoskeleton (C-ALEX) and Gait Training with Human Subjects*: Columbia University.

Khamar, M., Edrisi, M., & Zahiri, M. (2019). Human-exoskeleton control simulation, kinetic and kinematic modeling and parameters extraction. *MethodsX*, 6, 1838-1846.

Kim, J.-H., Shim, M., Ahn, D. H., Son, B. J., Kim, S.-Y., Kim, D. Y., . . . Cho, B.-K. (2015). Design of a knee exoskeleton using foot pressure and knee torque sensors. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 12(8), 112.

Kim, W., Kim, H., Lim, D., Moon, H., & Han, C. (2017). Design and kinematic analysis of the hanyang exoskeleton assistive robot (HEXAR) for human synchronized motion *Wearable Robotics: Challenges and Trends* (pp. 275-279): Springer.

Kirsch, N., Alibeji, N., Dicianno, B. E., & Sharma, N. (2016). *Switching control of functional electrical stimulation and motor assist for muscle fatigue compensation*. Paper presented at the 2016 American Control Conference (ACC).

Lajeunesse, V., Routhier, F., Vincent, C., Lettre, J., & Michaud, F. (2018). Perspectives of individuals with incomplete spinal cord injury concerning the usability of lower limb exoskeletons: an exploratory study. *Technology and Disability*, 30(1-2), 63-76.

Li, J., Zuo, S., Xu, C., Zhang, L., Dong, M., Tao, C., & Ji, R. (2019). Influence of a Compatible Design on Physical Human-Robot Interaction Force: a Case Study of a Self-Adapting Lower-Limb Exoskeleton Mechanism. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 1-14.

Li, N., Yan, L., Qian, H., Wu, H., Wu, J., & Men, S. (2015). Review on lower extremity exoskeleton robot. *The Open Automation and Control Systems Journal*, 7(1).

Li, Y., Li, Z., Penzlin, B., Tang, Z., Liu, Y., Guan, X., . . . Leonhardt, S. (2019). *Design of the clutched variable parallel elastic actuator (CVPEA) for lower limb exoskeletons*. Paper presented at the 2019 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC).

Liang, F.-Y., Zhong, C.-H., Zhao, X., Castro, D. L., Chen, B., Gao, F., & Liao, W.-H. (2018). *Online adaptive and lstm-based trajectory generation of lower limb exoskeletons for stroke rehabilitation*. Paper presented at the 2018 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO).

Ling, W., Yu, G., & Li, Z. (2019). Lower Limb Exercise Rehabilitation Assessment Based on Artificial Intelligence and Medical Big Data. *IEEE Access*, 7, 126787-126798.

Louie, D. R., Eng, J. J., & Lam, T. (2015). Gait speed using powered robotic exoskeletons after spinal cord injury: a systematic review and correlational study. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 12(1), 82.

Manns, P. J., Hurd, C., & Yang, J. F. (2019). Perspectives of people with spinal cord injury learning to walk using a powered exoskeleton. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 16(1), 94.

Meng, W., Liu, Q., Zhou, Z., Ai, Q., Sheng, B., & Xie, S. S. (2015). Recent development of mechanisms and control strategies for robot-assisted lower limb rehabilitation. *Mechatronics*, 31, 132-145.

Michaud, B., Cherni, Y., Begon, M., Girardin-Vignola, G., & Roussel, P. (2017). *A serious game for gait rehabilitation with the Lokomat*. Paper presented at the 2017 International Conference on Virtual Rehabilitation (ICVR).

Mironov, V. I., Kastalskiy, I., Lobov, S., & Kazantsev, V. B. (2017). *A Biofeedback Control System of the Exoskeleton Trainer for Lower Limbs Motor Function Recovery*. Paper presented at the NEUROTECHNIX.

Mortensen, J., & Merryweather, A. (2018). *Using OpenSim to Investigate the Effect of Active Muscles and Compliant Flooring on Head Injury Risk*. Paper presented at the Congress of the International Ergonomics Association.

Mubin, O., Alnajjar, F., Jishtu, N., Alsinglawi, B., & Al Mahmud, A. (2019). Exoskeletons With Virtual Reality, Augmented Reality, and Gamification for Stroke Patients' Rehabilitation: Systematic Review. *JMIR rehabilitation and assistive technologies*, 6(2), e12010.

Murray, S., & Goldfarb, M. (2012). *Towards the use of a lower limb exoskeleton for locomotion assistance in individuals with neuromuscular locomotor deficits*. Paper presented at the 2012 Annual International

Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society.

Nam, K. Y., Kim, H. J., Kwon, B. S., Park, J.-W., Lee, H. J., & Yoo, A. (2017). Robot-assisted gait training (Lokomat) improves walking function and activity in people with spinal cord injury: a systematic review. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 14(1), 24.

Neuhaus, P. D., Noorden, J. H., Craig, T. J., Torres, T., Kirschbaum, J., & Pratt, J. E. (2011). *Design and evaluation of Mina: A robotic orthosis for paraplegics*. Paper presented at the 2011 IEEE international conference on rehabilitation robotics.

O'Sullivan, S. B., Schmitz, T. J., & Fulk, G. (2019). *Physical rehabilitation*: FA Davis.

Önen, Ü., Botsalı, F. M., Kalyoncu, M., Şahin, Y., & Tınkır, M. (2017). Design and Motion Control of a Lower Limb Robotic Exoskeleton. *Mechatronic Systems in Engineering: Design, Control and Applications of*, 135.

Ortlieb, A., Bouri, M., & Bleuler, H. (2017). AUTONOMYO: Design Challenges of Lower Limb Assistive Device for Elderly People, Multiple Sclerosis and Neuromuscular Diseases *Wearable Robotics: Challenges and Trends* (pp. 439-443): Springer.

Park, J.-H., Lee, J.-S., Shin, J.-S., & Cho, B.-K. (2015). *Design of a lower limb exoskeleton including roll actuation to assist walking and standing up*. Paper presented at the 2015 IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids).

Poberznik, A. (2018). Therapeutic use of exoskeletons in spinal cord injury gait rehabilitation-a systematic literature review.

Raab, K., Krakow, K., Tripp, F., & Jung, M. (2016). Effects of training with the ReWalk exoskeleton on quality of life in incomplete spinal cord injury: a single case study. *Spinal cord series and cases*, 2, 15025.

RANJITHA, K. (2019). *Hiking Aid for Rewalk*. Paper presented at the 2019 5th International Conference on Advanced Computing & Communication Systems (ICACCS).

Ren, Z., Deng, C., Zhao, K., & Li, Z. (2018). The development of a high-speed lower-limb robotic exoskeleton. *Science China Information Sciences*, 62(5), 50202.

Riener, R. (2016). Technology of the robotic gait orthosis Lokomat *Neurorehabilitation Technology* (pp. 395-407): Springer.

Roer, R., Abehsera, S., & Sagi, A. (2015). Exoskeletons across the Pancrustacea: comparative morphology, physiology, biochemistry and genetics. *Integrative and comparative biology*, 55(5), 771-791.

Rupal, B., Singla, A., & Virk, G. (2016). *Lower limb exoskeletons: a brief review*. Paper presented at the Conference on mechanical engineering and technology (COMET-2016), IIT (BHU), Varanasi, India.

Sanz-Merodio, D., Cestari, M., Arevalo, J. C., & Garcia, E. (2012). *A lower-limb exoskeleton for gait assistance in quadriplegia*. Paper presented at the 2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO).

Sapiee, M., Marhaban, M., Ishak, A., & Miskon, M. (2018). An approach to data utilization of the lokomat rehabilitation robot. *International Journal of Human and Technology Interaction (IJHaTI)*, 2(1), 51-56.

Shah, B., Mascarenhas, E., Menon, S., & Mengle, S. (2019). *Exoskeleton for Support And Strength Enhancement*.

Sirlantzis, K., Larsen, L. B., Kanumuru, L. K., & Oprea, P. (2019). *Robotics Handbook of Electronic Assistive Technology* (pp. 311-345): Elsevier.

Skantze, G., & Johansson, M. (2015). *Modelling situated human-robot interaction using IrisTK*. Paper presented at the Proceedings of the 16th Annual Meeting of the Special Interest Group on Discourse and Dialogue.

Stegall, P., Zanotto, D., & Agrawal, S. K. (2017). Variable damping force tunnel for gait training using ALEX III. *IEEE robotics and automation letters*, 2(3), 1495-1501.

Valente, G., Crimi, G., Vanella, N., Schileo, E., & Taddei, F. (2017). nmsBuilder: Freeware to create subject-specific musculoskeletal models for OpenSim. *Computer methods and programs in biomedicine*, 152, 85-92.

van Hedel, H. J., & Aurich, T. (2016). Clinical application of rehabilitation technologies in children undergoing neurorehabilitation *Neurorehabilitation Technology* (pp. 283-308): Springer.

- Virk, G. S., Haider, U., Nyoman, I., Masud, N., Mamaev, I., Hopfgarten, P., & Hein, B. (2016). *Design of EXOLEGS exoskeletons*. Paper presented at the ASSISTIVE ROBOTICS: Proceedings of the 18th International Conference on CLAWAR 2015.
- Wallard, L., Dietrich, G., Kerlirzin, Y., & Bredin, J. (2015). Effects of robotic gait rehabilitation on biomechanical parameters in the chronic hemiplegic patients. *Neurophysiologie Clinique/Clinical Neurophysiology*, 45(3), 215-219.
- Wang, S., Wang, L., Meijneke, C., Van Asseldonk, E., Hoellinger, T., Cheron, G., . . . Molinari, M. (2014). Design and control of the MINDWALKER exoskeleton. *IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering*, 23(2), 277-286.
- Wang, S., Wang, L., Meijneke, C., Van Asseldonk, E., Hoellinger, T., Cheron, G., . . . Molinari, M. (2015). Design and control of the MINDWALKER exoskeleton. *IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering*, 23(2), 277-286.
- Weerasingha, A., Withanage, W., Pragnathilaka, A., Ranaweera, R., & Gopura, R. (2018). *Powered ankle exoskeletons: existent designs and control systems*. Paper presented at the in IEEE Int. Conf. on Artific. Life and Robot.
- Wu, Y., Zhu, A., Shen, H., Shen, Z., Zhang, X., & Cao, G. (2019). *Biomechanical simulation analysis of human lower limbs assisted by exoskeleton*. Paper presented at the 2019 16th International Conference on Ubiquitous Robots (UR).
- Xinyi, Z., Haoping, W., Yang, T., Zefeng, W., & Laurent, P. (2015). *Modeling, simulation & control of human lower extremity exoskeleton*. Paper presented at the 2015 34th Chinese Control Conference (CCC).
- Xu, J., Xu, L., Li, Y., Peng, C., Liu, J., Xu, C., . . . Chen, J. (2019). *Design and Implementation of the Lower Extremity Robotic Exoskeleton with Magnetorheological Actuators*. Paper presented at the 2019 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA).
- Yan, T., Cempini, M., Oddo, C. M., & Vitiello, N. (2015). Review of assistive strategies in powered lower-limb orthoses and exoskeletons. *Robotics and Autonomous Systems*, 64, 120-136.
- Yatsuya, K., Hirano, S., Saitoh, E., Tanabe, S., Tanaka, H., Eguchi, M., . . . Kagaya, H. (2018). Comparison of energy efficiency between Wearable Power-Assist Locomotor (WPAL) and two types of knee-ankle-foot orthoses with a medial single hip joint (MSH-KAFO). *The journal of spinal cord medicine*, 41(1), 48-54.
- Yeem, S., Heo, J., Kim, H., & Kwon, Y. (2018). Technical analysis of exoskeleton robot. *World Journal of Engineering and Technology*, 7(1), 68-79.
- Yeung, L.-F., & Tong, R. K.-Y. (2018). Lower Limb Exoskeleton Robot to Facilitate the Gait of Stroke Patients. *Wearable Technology in Medicine and Health Care*, 91.
- Yue, C., Lin, X., Zhang, X., Qiu, J., & Cheng, H. (2018). Design and performance evaluation of a wearable sensing system for lower-limb exoskeleton. *Applied bionics and biomechanics*, 2018.
- Zhang, G., Liu, G., Ma, S., Wang, T., Zhao, J., & Zhu, Y. (2017). Biomechanical design of escalating lower limb exoskeleton with novel linkage joints. *Technology and Health Care*, 25(S1), 267-273.
- Zhou, L., Li, Y., & Bai, S. (2017). A human-centered design optimization approach for robotic exoskeletons through biomechanical simulation. *Robotics and Autonomous Systems*, 91, 337-347.
- Zoss, A., Kazerooni, H., & Chu, A. (2005). *On the mechanical design of the Berkeley Lower Extremity Exoskeleton (BLEEX)*. Paper presented at the 2005 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems.