



**SELÇUK
ÜNİVERSİTESİ**

**SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK - BİLİM VE
TEKNOLOJİ DERGİSİ**

**SELÇUK UNIVERSITY
JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCE AND
TECHNOLOGY
(SUJEST)**

EISSN 2147-9364

HAKEMLİ DERGİDİR

OWNER/SAHİBİ

Owner on Behalf of Engineering Faculty of Selcuk University **Prof. Dr. Ferruh YILDIZ**
Selçuk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Adına Dekan **Prof. Dr. Ferruh YILDIZ**

Chief Editor/Şef Editör

Prof. Dr. Muzaffer KAHVECİ

Editors/Editörler

Prof. Dr. Mustafa TABAKCI
Assist. Prof. Dr. Ömer Kaan BAYKAN

Advisory Board/Danışma Kurulu

Prof. Dr. Cengiz ALYILMAZ, Ataturk University
Prof. Dr. Ercan AKSOY, Bitlis Eren University
Prof. Dr. Lena HALOUNOVA, Czech Technical University
Prof. Dr. Petros PATIAS, The Aristotle University
Prof. Dr. Sitki KULUR, Istanbul Technical University
Prof. Dr. Dervis KARABOGA, Erciyes University
Prof. Dr. Ibaraki SOICHI, Kyoto University
Prof. Dr. Matchavariani LIA, Tbilisi State University
Prof. Dr. Seref SAGIROGLU, Gazi University
Prof. Dr. Vijay P. SINGH, Texas A and M University

Language Editing/Yabancı Dil Editörü

Prof. Dr. Ali BERKTAY

Composition and Printing/Baskı ve Dizgi

Dr. Lutfiye Karasaka
Res. Assist. Ismail KOC

Correspondance Address/Yazışma Adresi

Selçuk Üniversitesi Muhendislik Fakültesi Dekanlığı
42075-Kampüs, Selçuklu, Konya-TURKEY

Tel : 0 332 241 0 634
Fax : 0 332 241 0 635
E-mail : sujest@selcuk.edu.tr
Web : <http://sujest.selcuk.edu.tr>

Editorial Board (Yayın Kurulu)

Ahmet Afsin Kulaksiz, Selcuk University, TURKEY

Alla Anohina-Naumeca, Riga Technical University, LATVIA

Ashok K. Mishra, Clemson University, USA

Baris Binici, Middle East Technical University, TURKEY

Coskun Bayrak, University of Arkansas, USA

Demetrio Fuentes Ferrera, University of Castilla-La Mancha, SPAIN

Fahrettin Ozturk, The Petroleum Institute, UAE

Haci Murat Yilmaz, Aksaray University, TURKEY

Heinz Ruther University of Cape Town, SOUTH AFRICA

Homayoun Moghimi, Payame Noor University, IRAN

Ihsan Ozkan, Selcuk University, TURKEY

John Trinder, The University of New South Wales, AUSTRALIA

Kerim Kocak, Selcuk University, TURKEY

Loredana Judele, Technical University of Iasi, ROMANIA

Mohamed Bouabaz, Université 20 août 1955-Skikda, ALGERIA

Mohd Arif Wani, California State University, USA

Mortaza Yari, University of Tabriz, IRAN

Ömer Aydan, University of the Ryukyus, JAPAN

Sanchoy K. Das, New Jersey Institute of Technology, USA

Selim Dogan, Selcuk University, TURKEY

Spase Shumka, Agricultural University of Tirana, ALBANIA

Tahira Geroeva, Baku State University, AZERBAIJAN

Vladimir Androkhonov, Novosibirsk Soil Research Institute, RUSSIA

Ali Kocak, Yildiz Technical University, TURKEY

Alpaslan Yazar, Selcuk University, TURKEY

Ataur Rahman, University of Western Sydney, AUSTRALIA

Cihan Varol Sam Houston State University, USA

Dan Stumbea, Alexandru Ioan Cuza University of Iasi, ROMANIA

Eva Burgetova, Czech Technical University, CZECH REPUBLIC

Georgieva Lilia, Heriot-Watt University, UNITED KINGDOM

Halil Kursad Ersoy, Selcuk University, TURKEY

Hi-Ryong Byun, Pukyong National University, SOUTH KOREA

Huseyin Deveci, Selcuk University, TURKEY

Iraida Samofalova, Perm University, RUSSIA

Juan Maria Menendez Aguado, University of de Oviedo, SPAIN

Laramie Vance Potts, New Jersey Institute of Technology, USA

Mila Koeva, University of Twente, NETHERLANDS

Mohamed Metwaly Abu Anbar, Tanta University, EGYPT

Moonis Ali Khan, King Saud University, KSA

Murat Karakus, University of Adelaide, AUSTRALIA

Saadettin Erhan Kesen, Selcuk University, TURKEY

Selcuk Kursat Isleyen, Gazi University, TURKEY

Shukri Maxhuni, Prizen University, KOSOVA REPUBLIC

Syed Tufail Hussain Sherazi, University of Sindh, PAKISTAN

Thomas Niedoba, AGH University of Science and Technology, POLAND

Zoran Sapuric, University American College Skopje, MACEDONIA

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK, BİLİM VE TEKNOLOJİ DERGİSİ
Selcuk University Journal of Engineering, Science and Technology
(SUJEST)

ISSN 2147 – 9364 (Elektronik)

Cilt	5	Aralık	2017	Sayı	4
Volume	5	December	2017	Number	4

İÇİNDEKİLER (CONTENTS)

Araştırma Makalesi (Research Article)

COMPARING VARIOUS MACHINE LEARNING METHODS FOR PREDICTION OF PATIENT REVISIT INTENTION: A CASE STUDY

Comparing Various Machine Learning Methods for Prediction of Patient Revisit Intention: A Case Study

.....Osman DEMİRDÖĞEN, Hamit ERDAL, Ahmet İlker AKBABA (English) 386-401

KENTSEL DÖNÜŞÜM'DE RİSKLİ ALAN ÖNCELİKLERİNİN BELİRLENMESİ İÇİN BULANIK MANTIK TABANLI SİSTEM TASARIMI

A Fuzzy Logic Based System Design for Determination of Risk Areas in Urban Regeneration

.....Halil İbrahim SOLAK, Ayşegül ALAYBEYOĞLU 402-413

A MONOGENIC LOCAL GABOR BINARY PATTERN FOR FACIAL EXPRESSION RECOGNITION

A Monogenic Local Gabor Binary Pattern for Facial Expression Recognition

.....Alaa ELEYAN, Abubakar M. ASHIR (English) 414-422

ERİMİŞ TUZ İÇİNDE ELEKTROKİMYASAL İNDİRGENME YÖNTEMİYLE SİLİSYUM ÜRETİMİ

Production of Silicon by the Electrochemical Reduction Technique in Molten Salt

.....Metehan ERDOĞAN, Emre ERGÜL, İshak KARAKAYA 423-431

EXTENDED KALMAN FILTER DESIGN FOR RAILWAY TRACTION MOTOR

Extended Kalman Filter Design for Railway Traction Motor

.....Caglar UYULAN, Metin GOKASAN (English) 432-444

FREKANS ANALİZİNDE ALTERNATİF BİR PARAMETRE TAHMİN METODU

An Alternative Parameter Estimation Method in Frequency Analysis

.....Ömer Levend AŞIKOĞLU 445-459

KÜPRİK OKSİT/SİLİSYUM HETEROEKLEMLİ NANODİYOTLARIN FOTOVOLTAİK ÖZELLİKLERİ

Photovoltaic Characteristics of Cupric Oxide/Silicon Heterojunction Nanodiodes

.....Funda AKSOY AKGÜL 460-471

SANTRİFÜJ BİR KALP DESTEK POMPASI PROTOTİPİNİN SAYISAL VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Numerical and Experimental Investigation of A Centrifugal Heart Assist Pump Prototype

.....Ömer İNCEBAY, Rafet YAPICI 472-484

BİYOKÖMÜR: ÜRETİMİ ve KULLANIM ALANLARI

Biochar: Production and Applications

.....Gökçen AKGÜL 485-499

COLLAPSE OF BASE SOIL AND ITS CONSEQUENCES DURING A CEMENT PLANT CONSTRUCTION

Collapse of Base Soil and Its Consequences During a Cement Plant Construction

.....Volkan KALPAKCI (English) 500-510

İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI: TARİHÇESİ, TANIMI, DÜNYADA VE TÜRKİYE'DEKİ YASAL DURUMU

Unmanned Aerial Vehicles: History, Definition, Legal Status in Turkey and in the World

.....Muzaffer KAHVECİ, Nazlı CAN 511-535

SOLAR ENERGY SUPPORTED HYDROGEN PRODUCTION: A THEORETICAL CASE STUDY

Solar Energy Supported Hydrogen Production: A Theoretical Case Study

.....Ali ATES, Sacit Zendeşdel SHEKARDASHT, Eyüb CANLI (English) 536-554



COMPARING VARIOUS MACHINE LEARNING METHODS FOR PREDICTION OF PATIENT REVISIT INTENTION: A CASE STUDY

¹Osman DEMİRDÖĞEN, ²Hamit ERDAL, ³Ahmet İlker AKBABA

¹Department of Business Administration, Faculty of Economics and Administrative Sciences, Ataturk University, Erzurum, Turkey.

²Institute of Social Sciences, Ataturk University, Erzurum, Turkey.

³Department of Business Administration, Faculty of Economics and Administrative Sciences, Erzurum Technical University, Erzurum, Turkey.

¹odemirdogen@hotmail.com, ²hamit_erdal@hotmail.com, ³aakbaba@erzurum.edu.tr

(Geliş/Received: 20.12.2016; Kabul/Accepted in Revised Form: 19.04.2017)

ABSTRACT: Numerous methods have been suggested for analysis of customer intention, from surveys to statistical models. The most recent couple of years, various machine learning methods have effectively been utilized to customer-centric decision-making problems. The trend of patient revisit intention analysis has an improved reliance on computerized decision making models. Computerized decision-making may never take the place of the hospital managers, but it can provide decision support via a simple questionnaire. In this paper, it is carried on a comparative evaluation of the performance of ten widely used machine learning methods, (i.e., logistic regression, multilayer perceptron, support vector machines, IBk, KStar, locally weighted learning, decisionstump, C4.5., randomtree and reduced error pruning tree) for the aim of suggesting appropriate machine learning techniques in the context of patient revisit intention prediction problem. Experimental results reveal that the C4.5 tree demonstrates to be the most suitable predictive model since it has the highest overall average accuracy (95.24%) and a very low percentage error on both Type I (3.40%) and Type II (23.53%) errors, closely followed by the locally weighted learning (94.44%, 3.43%, 31.58%) and decisionstump (94.05%, 3.85%, 30.00%), whereas the logistic regression and the IBk algorithms appear to be the worst in terms of average accuracy (87.30% and 88.49%, respectively) and Type II error (70.37% and 68.18%, respectively). Besides the randomtree (6.36%) and the IBk (6.09%) algorithms appear to be the worst in terms of type I error. As a result, this study has demonstrated the promising attempt of incorporating sentiment classification into patient revisit intention.

Key Words: Revisit intention, hospital management, machine learning, prediction, logistic regression, multilayer perceptron, support vector machines, IBk, KStar, locally weighted learning, decisionstump, C4.5., randomtree, reduced error pruning tree.

Yeniden Hastane Tercih Etme Davranışının Tahmini İçin Çeşitli Makine Öğrenmesi Yöntemlerinin Karşılaştırılması: Bir Uygulama

ÖZ: Müşteri davranışının analizi amacıyla anketlerden, istatistiksel modellere kadar pek çok yöntem önerilmiştir. Son birkaç yılda çeşitli makine öğrenmesi yöntemleri, müşteriye odaklı karar verme problemlerine etkili bir biçimde uygulanmıştır. Yeniden hastane tercih etme davranışının analizi, bilgisayar destekli karar verme modellerine daha fazla bağımlılık gösterme eğilimi içerisindedir. Bilgisayar destekli karar verme, hiçbir zaman hastane yöneticilerinin yerini alamaz ancak basit bir anket yoluyla karar desteği sağlayabilir. Bu çalışmada, yeniden hastane tercih etme davranışının tahmini problemi için uygun makine öğrenmesi yöntemlerinin belirlenmesi amacıyla yaygın olarak kullanılan on

adet makine öğrenmesi yönteminin (lojistik regresyon, yapay sinir ağları, destek vektör makineleri, IBk algoritması, KStar algoritması, lokal ağırlıklandırılmış öğrenme algoritması, decisionstump karar ağacı, C4.5. karar ağacı, rastgele ağaç algoritması ve indirgenmiş hata budama karar ağacı) performansları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre C4.5. karar ağacı, en yüksek ortalama doğruluk oranı (95.24%) ile çok düşük Tip-I ve Tip-II hata oranları elde edilmesi nedeniyle en uygun tahminleme modeli olarak belirlenmiştir. C4.5. karar ağacının hemen ardından, sırasıyla, lokal ağırlıklandırılmış öğrenme algoritması (94.44%, 3.43%, 31.58%) ve decisionstump karar ağacı (94.05%, 3.85%, 30.00%) en uygun tahminleme modelleri olarak belirlenirken, lojistik regresyon ve IBk algoritması hem ortalama doğruluk oranına (sırasıyla, 87.30% ve 88.49%) göre, hemde Tip-II hata oranına (sırasıyla, 70.37% ve 68.18%) göre en kötü tahminleme modelleri olarak belirlenmiştir. Bunun yanında rastgele ağaç ve IBk algoritmaları Tip-I hata oranına göre (sırasıyla, 6.36% ve 6.09%) en kötü tahminleme modelleri olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, bu çalışmada yeniden hastane tercih etme davranışının sınıflandırması için umut vadeden sonuçlar ortaya koyulmuştur.

Anaktar Kelimeler: *Yeniden tercih etme davranışı, hastane yönetimi, makine öğrenmesi, tahminleme, lojistik regresyon, yapay sinir ağları, destek vektör makineleri, IBk algoritması, KStar algoritması, lokal ağırlıklandırılmış öğrenme algoritması, decisionstump karar ağacı, C4.5. karar ağacı, rastgele ağaç algoritması ve indirgenmiş hata budama karar ağacı.*

INTRODUCTION

Data mining (DM) is vital for customer relationship management (CRM) to analyse huge data streams and gain insight into customer intentions, needs and preferences. Also these knowledge assists the design of customer-centric service processes alongside personalized marketing and service activities. Thus, succesively, help to acquire new customers, keep the current customer in hand, and to have loyalty of them in today's competitive globalized markets.

Costumer repurchase (revisit) intention is inevitable for healthcare constitutions. Hospital management is responsible for the services offered to patients is determining the patient's preferences to the hospital again about the services provided to the satisfaction or not (Güzel, 2014). In this regard, the hospital management plays a vital role in customer service is visiting again.

DM may make possible healthcare constitutions to forecast tendencies in the patient conditions and their intentions, which is achieved by data analysis and identifying interconnection from apparently unassociated info. Unprocessed data from healthcare constitutions are huge. These data provides countless possibilities for hidden pattern investigation for healthcare organizations (Milovic and Milovic, 2012). These patterns and data mining algorithms may provide support for forecastings, diagnoses and treatment planning. Mentioned algorithms also can being integrated into information systems of healthcare constitutions as a decision support tool, avoiding human errors (Bushinak et al., 2011).

By help of DM methods, it is practicable to forecast tendencies and customer intentions and, in this way, maintain the constitution's business success. (Milovic and Milovic, 2012).

Healthcare constitution are capable to utilize DM tools different ways such as managers and doctors who utilize models for measuring clinical/quality/economic indicators, efficiency of the staff to optimize use of resources, customer satisfaction/loyalty, etc (Stühlinger et al., 2000).

Machine learning (ML) methods have been applied in many research areas in healthcare sector and medical science including, predicting mortality (Cooper et al., 1997; Verplancke et al., 2008), medical diagnosis (Kononenko, 2001; Li et al., 2015), cancer prediction and prognosis (Jerez et al., 2010), applications in the intensive care units (Hanson III and Marshall, 2001), heart disease prediction (Parthiban and Subramanian, 2007; Anbarasi et al., 2010; Soni et al., 2011), drug design (Duch et al., 2007), diabetic nephropathy prediction (Cho et al., 2008), molecular classification of multiple tumor types (Yeang et al., 2001), liver disease diagnosis (Lin, 2009), disease risks prediction (Khalilia et al.,

2011), DNA classification (Fiannaca et al., 2015), automatic evidence quality prediction (Sarker et al., 2015), detection of healthcare-associated infections (De Bruin et al., 2016), medication adherence prediction (Kalantarian et al., 2016).

In literature, to the best of our knowledge, there are limited descriptive and statistical studies within patients revisit intentions (i.e., Boshoff and Gray, 2004; Al-Refaie, 2011; Sarvari, 2012; Kang et al., 2013; Aliman and Mohamad, 2013; Park and Seo, 2014), but none of them applications of ML prediction methods. Besides, none of the studies being utilized ML methods applications to a hospital managerial problem.

In this study, 15 variables were executed to determine revisit intention, using a binary classification and five-point likert scale, in a hospital in the province of central Erzurum.

Binary classification may be seen as a universal approach to support decision making in customer-centric applications. That is, revisit intentions can be categorized that the patients those who will revisit and those who will not.

It is vital to understand patient motivation and satisfaction after taking service. We test this with a questionnaire and ML-based empirical study.

In this paper, it is carried on a comparative evaluation of the performance of ten widely used ML algorithms (logistic regression, multilayer perceptron, support vector machines, IBk, KStar, locally weighted learning, decision stump, C4.5, random tree and reduced error pruning tree) on patient revisit intention prediction problem. This study has demonstrated the promising attempt of incorporating sentiment classification into patient revisit intentions.

The rest of the paper is organized as follows. In Section 2, ML methods, used in study, are introduced. In Section 3, data set is given and experimental design is illustrated. In section 4 prediction models are compared and results are evaluated. Finally, Section 5 presents the main conclusion and future directions of the study.

MACHINE LEARNING METHODS

Conventional prediction models, such as logistic regression and discriminant analysis have been used to predict consumer repurchase intention. However, there has been a great potential in applying more efficient ML techniques to analyse consumer behaviour and repurchase intention. (ML) algorithms predict an unknown dependency between the inputs and output from a dataset (Tüfekci, 2014).

Table 1 demonstrates the ML techniques utilized in this study. We handled these techniques in three categories; Functions, Lazy-learning Algorithms, and Tree-based Learning Algorithms, stated by The Waikato Environment for Knowledge Analysis (WEKA) platform.

Table 1. ML methods utilized in this study

Categories	Method	Abbreviation
Functions	Logistic Regression	Logit
	Multilayer Perceptron	MLP
	Support Vector Machines	SVMs
Lazy-learning algorithms	IBk	IBk
	KStar	K*
	Locally Weighted Learning	LWL
Tree-based learning algorithms	DecisionStump	DStump
	C4.5	C4.5
	RandomTree	RTree
	Reduced Error Pruning Tree	REPTree

Logistic Regression (Logit)

Logit is a regression model for binomially distributed dependent variables. It is practical for modeling the probability of an event occurring as a function of other factors. As its link function, logistic regression is a generalized linear model which uses the logit. In literature other wide used names for logistic regression for various other application areas are logistic model, logit model, and maximum-entropy classifier (Hosmer and Stanley, 2000).

Binary logit is a type of regression, which is used when the dependent variable has a dichotomy and the independent variables are of any form. Multinomial logistic regression is useful to cope with the case of dependent variable with more classes than two. When multiple classes of the dependent variable might be ranked, then ordinal logistic regression is preferred to multinomial logit. Only the exact variables (not continuous) can be used as dependent variables in logit. Logit applies maximum likelihood prediction after transforming the dependent into a logit variable. Therefore, logit predicts the probability of occurrence of a certain event (Chandra et al., 2009).

Multilayer Perceptron (MLP)

Multilayer perceptrons, one of the neural network approaches, have superiors generalisation potential to seize complex interrelation between inputs and outputs. MLP is often trained with error back-propagation algorithm based on the error correction learning rule (Aydogmus and Turkan, 2016).

A common MLP can be mathematically describe in Eqs. (1)–(5) (Erdal et al., 2013; Erdal, 2015; Namli et al., 2016);

The output signal for the l th neuron in the n th layer is computed by

$$y_l^n(t) = \phi \left[\sum_{j=1}^p w_{lj}^n(t) y_j^{n-1}(t) + \Psi_l^n \right] \quad (1)$$

where $\phi(\cdot)$ is the activation function, w_{lj}^n is the connection weight, t is the time index and $\Psi_l^n = w_{l0}^n(t)$ is the weighted. For an n -layer network, the synaptic weight $w_{ji}^n(t)$ is computed by

$$w_{ji}^n(t+1) = w_{ji}^n(t) + \Delta w_{ji}^n(t) \quad (2)$$

subject to $l \leq n \leq N$ and it could be revised as computed by

$$\Delta w_{ji}^n(t) = \eta \lambda_j^n(t) y_i^{n-1}(t) \quad (3)$$

subject to $0 < \eta < 1$

where η is the learning rate, and $\lambda_j^n(t) \equiv -\partial E_t / \partial u_j^n$ is the local error gradient. To evolve the back-propagation algorithm, a momentum term α is put in

$$\Delta w_{ji}^n(t) = \eta \lambda_j^n(t) y_i^{n-1}(t) + \alpha \Delta w_{ji}^n(t-1) \quad (4)$$

subject to $0 < \alpha < 1$

For the output layer, the local error gradient is computed by

$$\lambda_j^N(t) = [d_j(t) - y_j^N(t)] \phi[u_j^N(t)] \equiv e_j(t) \phi[u_j^N(t)] \quad (5)$$

where $d_j(t)$ is the goal output signal, and $\phi(\cdot)$ is the activation function.

Support Vector Machines (SVMs)

SVMs are originally developed by Vapnik (1995) to handle with the classification problems and have been increasingly used in different forecasting problems (Aydogmus et al., 2015). The SVMs can be defined as followed (Erdal et al., 2013; Aydogmus et al., 2015; Ozturk et al., 2015):

$$f(x) = w \bullet \varphi(x) + b \quad (6)$$

where $w \in \mathfrak{R}^n$, $b \in \mathfrak{R}$, \bullet denotes the dot product in \mathfrak{R}^n , and φ is a non-linear transformation from \mathfrak{R}^m to the high-dimensional space \mathfrak{R}^n (i.e., $n > m$). $\{\phi_i(x)\}_{i=1}^I$ are the features of inputs, $\{w_i\}_{i=1}^I$ and b are coefficients. The coefficients are estimated by minimizing the regularized risk function (7):

$$R(C) = C \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I L_\varepsilon(d_i, y_i) + \frac{1}{2} \left\| \vec{w} \right\|^2 \quad (7)$$

where If $|d - y| \geq \varepsilon$ then $L_\varepsilon(d, y) = |d - y| - \varepsilon$, otherwise $L_\varepsilon(d, y) = 0$ and ε is a prescribed parameter (Erdal and Ekinci, 2013; Ozturk et al., 2016).

IBk

The IBk is an instance-based learning, works as a k-nearest-neighbor classifier, is one of the most widely used instance-based or lazy method for both classification and regression problems. In this paper, it is used for a regression problem. The main assumption behind this algorithm is that the closest instances to the query point have similar target values to the query (Jiawei and Kamber, 2001).

KStar (K*)

KStar is also an instance-based classifier developed for regression with a generalized distance function based on transformations (Türkan et al., 2016). The KStar algorithm uses entropic measure, based on probability of transforming instance into another by randomly selecting between all possible transformations (Painuli et al., 2014).

Locally Weighted Learning (LWL)

The LWL uses an instance-based algorithm, assigns instance weights. This algorithm can perform both classification and regression. The principle idea behind the LWL is that any non-linearity can be approximated by a linear model, if the output surface is smooth (Türkan et al., 2016). Therefore, instead of looking for a complex global model, it is easy to approximate non-linear functions by using simple local models (Arif et al., 2001).

DecisionStump (DStump)

DStump is a decision tree which uses just a single attribute for splitting. It constructs one-level binary decision trees for datasets with a categorical or numeric class, handling with missing values by treating them as a separate value and extending a third branch from the stump (Witten et al., 2011).

C4.5

C4.5 is one of the popular decision tree classifier, which based on information theoretic concepts. It examines the normalised information gain (entropy difference) that results from choosing an attribute for splitting the data. The attribute with the highest normalised information gain is the one used to make the decision (Brown and Mues, 2012). The algorithm is a successor of ID3, which determines at each step the most predictive attribute, and splits a node based on this attribute. Every node represents a decision point over the value of some attribute (Al Snousy et al., 2011). The algorithm then recurs on the smaller subsets.

RandomTree (RTree)

RTree is a regression-based decision tree algorithm. Trees built by RTree consider K randomly selected attributes at each node. RTree performs no pruning and also has an option to allow prediction of class probabilities based on a hold-out set (backfitting) (Erdal and Karahanoğlu, 2016).

Reduced Error Pruning Tree (REPTree)

REPTree algorithm generates a tree utilizing the node statistics and prunes it utilizing reduced-error pruning (Portnoy and Koenker, 1997). One can set the minimum number of instances per each leaf, maximum tree depth, minimum proportion of training set variance for a split (numeric classes only), and number of folds for pruning (Erdal and Karahanoğlu, 2016).

EXPERIMENTAL DESIGN

Data Acquisition

Customer questionnaire was conducted to collect the required data. The questionnaire was prepared using items and questions prepared solely for the purpose of this study. It was pre-tested on several customers and iterative changes were made on vague items and expressions. The questionnaire was composed of three sections, covering demographic profile, characteristics of service, and patients intentions.

The questionnaire was applied to adult patients who received services from 17 clinics in Palandöken Hospital in Erzurum/Turkey. Among them, 53.6% was male and 46.4% was female.

When the underlying questionnaire was conducted, the total number of the patients in the hospital was 698. The relevant sample size of the questionnaire was calculated with respect to the following formula (Özer, 2004);

$$n = \frac{NPQZ^2}{(N - 1)d^2 + PQZ^2} \quad (8)$$

where n denotes the sample size; N denotes the population size (here in the number of patients at that year); P = the probability of the occurrence for a given event (the ratio of respondents was revisited the hospital); Q equals to $1 - P$; Z denotes the test statistic under the $(1 - \alpha)\%$ significance level; and finally d denotes the tolerance. In this respect, the minimum representative sample size of the survey can be calculated as;

$$n = \frac{608003(0.2025)(0.7975)(1,96)^2}{(6008003 - 1)0.05^2 + (0.2025)(0.7975)(1,96)^2} = 248$$

During the data collection procedure, 252 questionnaires were transformed and coded to a convenient computer-ready form, which exceeds the number of objective minimum sample size and there were no missing value.

The dependent variable of this study was the patient revisit intension, that was binary in nature where Y = will revisit, N = will not.

Variables was measured using the 5-point Likert-scale ranging from 'Not at all satisfied (NAS)' to 'Highly satisfied (HS)'.

According to descriptive statistics of dependent variable, most of the respondents (91,67%) are generally respondents have a high revisit intention to the corresponding hospital. Table 2. demonstrates the descriptive statistics of patients in the corresponding hospital.

Table 2. Descriptive statistics of variables

Variable	Description	Frequency (%)
Revisit intention	Will revisit	231 (%91,67)
	Will not	21 (%8,33)
(1) Gender	Female	117 (%46,4)
	Male	135 (%53,6)
(2) Marital status	Single	88 (%34,9)
	Married	164(%65,1)
(3) Age	Age < 25	41 (%16,3)
	25 ≤ Age < 35	100 (%39,6)
	35 ≤ Age < 45	45 (%17,9)
	45 ≤ Age < 55	42 (%16,7)
	Age ≥ 55	24 (%9,5)
(4) Occupation	Officer	27 (%10,7)
	Unemployed	10(%4,0)
	Worker	45(%17,9)
	Self-employed	128(%50,7)
	Student	34(%13,5)
	Retired	8(%3,2)
(5) Education	None	23(%9,1)
	Primary	22(%8,7)
	Lower secondary	30(%11,9)
	Upper secondary	131(%52,0)
	Higher education	46(%18,3)
(6) Location of residence	City center	177(%70,2)
	Village	75(%29,8)
(7) Settlement	Inner of Erzurum	203(%80,6)
	Out of Erzurum	49(%19,4)
(8) Type of contact	Appointment	31(%12,3)
	Direct	177(%70,2)
	Transfer from another hospital	44(%17,5)
(9) Type of insurance	Bag-kur	27(%10,7)
	Pension fund	19(%7,5)
	SSK	94(%37,3)
	Green card	40(%15,9)
	No insurance	58(%23,0)
	Other insurance	14(%5,6)
(10) General hygiene	Not at all satisfied (NAS)	6(%2,4)

	Not satisfied (NS)	7(%2,8)
	Partially satisfied(PS)	33(%13,1)
	Satisfied(S)	133(%52,7)
	Highly satisfied(HS)	73(%29,0)
(11) Doctor's courtesy	NAS	9(%3,6)
	NS	15(%6,0)
	PS	17(%6,7)
	S	128(%50,8)
	HS	83(%32,9)
(12) Doctor's response	NAS	8(%3,2)
	NS	15(%6,0)
	PS	50(%19,8)
	S	109(%43,3)
	HS	70(%27,8)
(13) Trust to doctor	NAS	7(%2,8)
	NS	18(%7,1)
	PS	38(%15,1)
	S	108(%42,9)
	HS	81(%32,1)
(14) Trust to caregiver	NAS	11(%4,4)
	NS	18(%7,1)
	PS	45(%17,9)
	S	116(%46,0)
	HS	62(%24,6)
(15) Overall Patient satisfaction	NAS	6(%2,4)
	NS	16(%6,3)
	PS	57(%22,6)
	S	94(%37,3)
	HS	79(%31,4)

Evaluation criteria

In this paper, it is preferred to utilize a combination of Type-I error, Type-II error and average accuracy, rather than a single measure, to evaluate the patient revisit intention prediction methods. That is an error to predict actually not revisited patients who have been predicted as actually revisited. This kind of error can be describe as Type-I error. Similarly, predicting actually revisited patients who have been predicted as actually not revisited is also an error. This kind of error can be describe as Type-II error. From a theoretical point of view, it is better to utilize prediction models with lower type-I errors (actually not revisited patients who have been predicted as actually revisited), but in practice it is also of great importance for the hospitals to achieve an appropriate balance between both error types so as not to assess potentially customers as not revisited ones (Ekinici and Erdal, 2011; Erdal and Ekinici, 2015). The definition of these measures can be explained with respect to a confusion matrix as demonstrated in Table 3.

Table 3. Confusion matrix for patient revisit intention prediction

		Actual condition	
		Revisited (positive)	Not-revisited (negative)
Empirical results	Revisited (positive)	True positive (TP)	False positive (FP)
	Not-revisited (negative)	False negative (FN)	True negative (TN)

Type-I error, Type-II error and Average accuracy can be mathematically describe in Eqs. (9)–(11) (Marqués et al., 2012; Yaprakli and Erdal, 2016);

$$\text{Type I error} = \frac{FN}{(TP+FN)} \quad (9)$$

$$\text{Type II error} = \frac{FP}{(TN+FP)} \quad (10)$$

$$\text{Average accuracy} = \frac{(TP+TN)}{(TP+FP+FN+TN)} \quad (11)$$

As stated by Caouette et al. (2008), the misclassification costs associated with type-I errors are typically much higher than those associated with type-II errors. And the accuracy ignores the different cost of both type-I and type-II errors.

Experimental procedure

The common implementation to evaluate repurchase intention models is to utilize a sufficient sample since huge sets of past applicants are mostly available. In some conditions, the data are inadequate to create an accurate prediction and so, other implementations have to be utilized so that to obtain better prediction performance. In this framework, the most widely used implementation is cross-validation (Marqués et al., 2012).

The evaluation is conducted with the k-fold cross validation. k-fold cross-validation is used to optimize bias with regard to the random sampling of the training and testing data when comparing the prediction accuracy of various models. Kohavi (1995) stated that 10 folds were optimal. In this study we used 10-fold cross-validation.

As mentioned above, the ML algorithms, used in this paper, divided into three categories; Functions, Lazy-learning Algorithms, and Tree-based Learning Algorithms. Functions classify the test data based on a specific function. The Logit, MLP and SVM are the most widely used function algorithms. Lazy-learning algorithms, unlike other classification or regression techniques, save the training data and build the model after receiving the test data. The IBK, K* and LWL are the most common lazy classifiers, used in this study. Tree-based learning algorithms classify the test data by building a decision tree. In tree-based learning algorithms, internal nodes are tests on an attribute value or multiple attributes values, branches are outcomes of the tests, and leaf nodes are class labels (Moshtari et al., 2013). DStump, C4.5, RTree, REPTree are four instances of tree-based learning algorithms. Hereinafter the experimental procedure is presented in Figure 1.

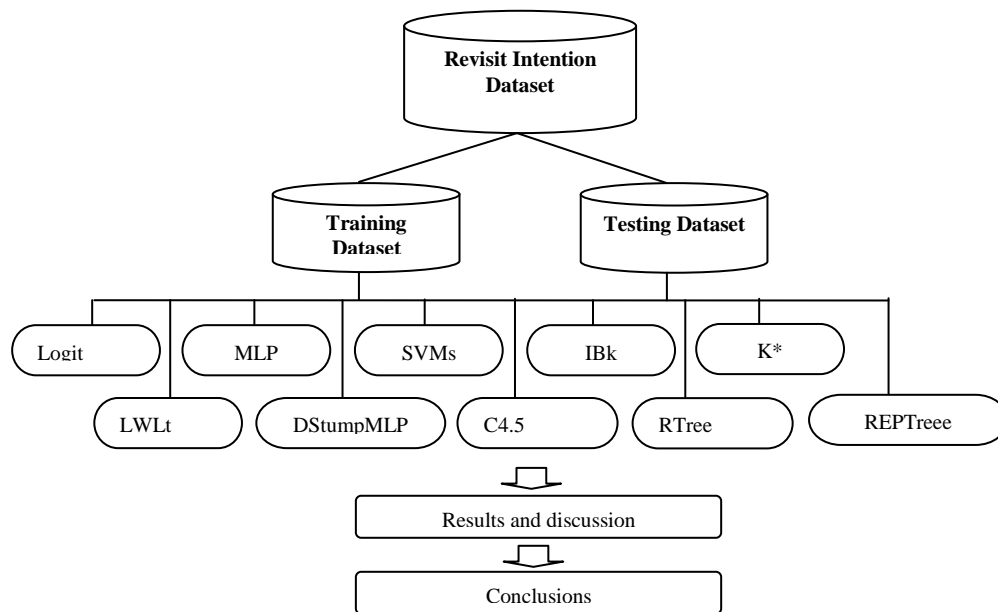


Figure 1. Experimental procedure

Now the results of the individual ML methods are discussed.

RESULTS AND DISCUSSIONS

In this paper, data mining toolkit WEKA version 3.7.11 was utilized for case study.

All the ML algorithms are used with their default parameter settings, as defined in Weka 3.7.11, to reduce the danger of over fitting due to excessive parameter tuning.

Our goal in this study is to investigate which ML technique is the most appropriate for patient revisit intention prediction problem.

To evaluate ten ML techniques, we averaged the performance indicators. Table 4. summarizes the performance indicators of the predictive models on the gathered datasets.

In terms of average accuracy, all ten algorithms can reach more than 87% of classification correctly.

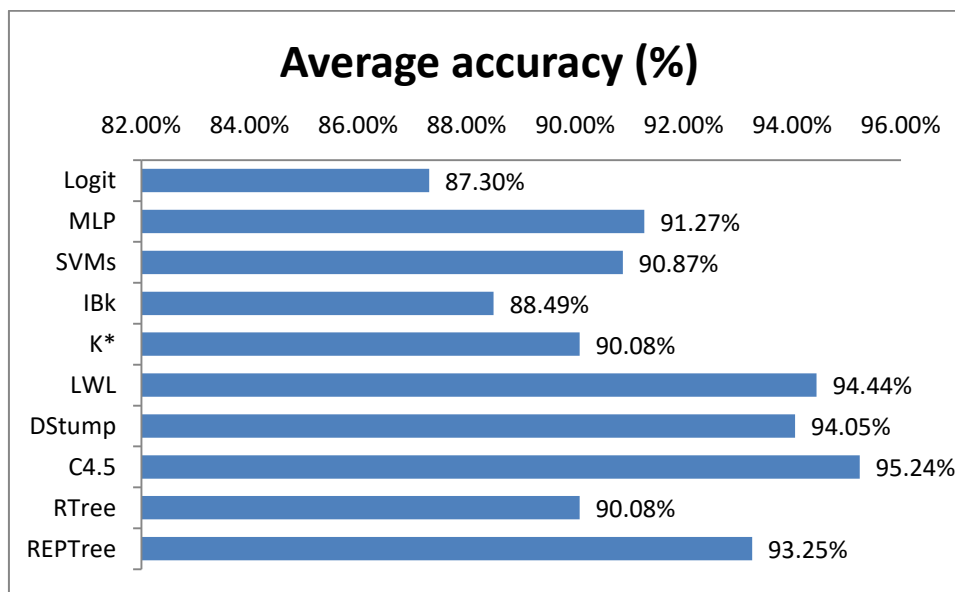
For all three performance indicators, presented in Table 4 and Figures 2-4., C4.5 performs best (95.24%, 3.40%, 23.53%) since it has the highest overall Average Accuracy and a very low percentage error on both Type I and Type II errors, closely followed by the LWL (94.44%, 3.43%, 31.58%) and DStump (94.05%, 3.85%, 30.00%), whereas the Logit and the IBk algorithms appear to be the worst in terms of Average Accuracy (87.30% and 88.49%, respectively) and Type II error (70.37% and 68.18%, respectively). Besides, the RTree (6.36%) and the IBk (6.09%) algorithms appear to be the worst in terms of Type I error.

Note from the table and figures, obtained performance indicators are presented, the tree-based learning algorithms yield significant prediction performance. C4.5 is using entropy-based segmentation algorithm and it is used widely for designing decision trees. C4.5 can generate decision trees by numeric values. Beside it also offers a solution to build decision trees when there are missing values. C4.5 algorithm makes possible to classify the datasets that has quantitative attributes, also both continuous and discrete attributes. In order to handle continuous attributes, C4.5 creates a threshold and then splits the list into those whose attribute value is above the threshold and those that are less than or equal to it (Özsoy et al., 2015). Since it is experienced numerously that C 4.5 had a pretty good performance on such a dataset that has many quantitative variables and missing values like our dataset.

Table 4. Performance statistics of proposed predictive models

Categories	Method	TP	FP	Average accuracy (%)	Type I error (%)	Type II error (%)
		FN	TN			
Functions	Logit	212	19	87.30%	5.78%	70.37%
		13	8			
	MLP	220	11	91.27%	4.76%	52.38%
Lazy-learning algorithms	SVM	222	9	90.87%	5.93%	56.25%
		14	7			
	IBk	216	15	88.49%	6.09%	68.18%
Tree-based learning algorithms	K*	219	12	90.08%	5.60%	60.00%
		13	8			
	LWL	225	6	94.44%	3.43%	31.58%
		8	13			
	DStump	225	6	94.05%	3.85%	33.33%
	9	12				
Tree-based learning algorithms	C4.5	227	4	95.24%	3.40%	23.53%
		8	13			
	RTree	221	10	90.08%	6.36%	62.50%
	15	6				
Tree-based learning algorithms	REPTree	228	3	93.25%	5.79%	30.00%
		14	7			

Figures 2-4. demonstrates the performance indicators, i.e., Type-I error, Type-II error and Average Accuracy.

**Figure 2.** Results (average) of average accuracy.

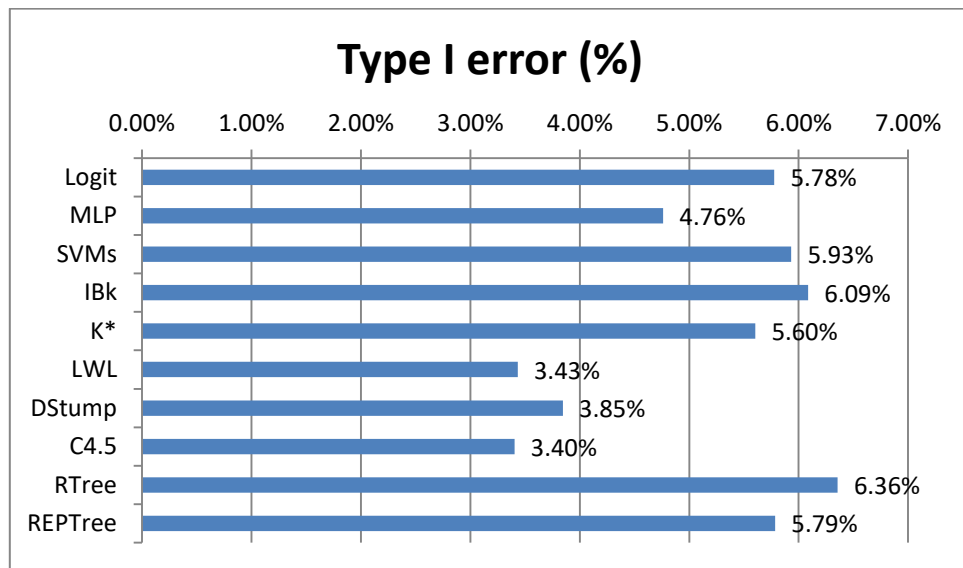


Figure 3. Results (average) of type-I error.

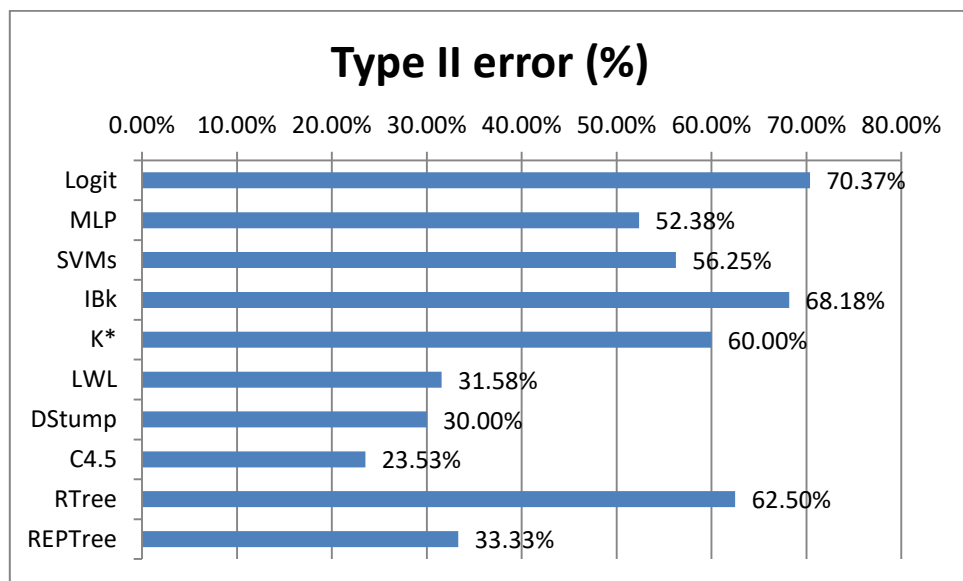


Figure 4. Results (average) of type-II error.

CONCLUSION AND FUTURE DIRECTIONS

The trend of patient revisit intention analysis is an improved reliance on computerized decision making models. Computerized decision-making may never take the place of the hospital managers, but it can provide decision support via a simple questionnaire.

Specifically, this study has demonstrated the promising attempt of incorporating sentiment classification into patient revisit intention.

Findings of this paper are likely to lead to a new trend of managerial processing in healthcare sector. This could influence the design of managerial systems in healthcare organizations in different functional areas. As well, empirical results of this study can provide insights to study how ML techniques can provide decision support about patients intentions.

This paper has focused on a comparative analysis of various widely used prediction algorithms on patient revisit intention prediction. With this aim, ten ML techniques have been utilized to a hospital managerial problem.

Experimental results reveal that the C4.5 tree demonstrates to be the most suitable predictive model since it has the highest overall average accuracy and a very low percentage error on both Type I and Type II errors, closely followed by the locally weighted learning and decisionstump, whereas the logistic regression and the IBk algorithms appear to be the worst in terms of average accuracy and type II error. Besides the randomtree and the IBk algorithms appear to be the worst in terms of type I error.

For further research, the present analysis could be to extend to other individual ML algorithms and ensemble approaches and extend to the other sectors and studies on customer relations. A natural extension of this research is to expand the number of hospitals and provinces. Although this study has analyzed the data for central Erzurum, the applicability of the presented classification methods in other hospitals remain unknown and is thus worthwhile for future investigation. Another direction for future research is that since customers change their perception frequently it would be interesting to do a longitudinal study to compare the findings between different time periods.

In this paper, data mining toolkit WEKA version 3.7.11 was utilized for case study.

All the ML algorithms are used with their default parameter settings, as defined in Weka 3.7.11, to reduce the danger of over fitting due to excessive parameter tuning.

REFERENCES

- Al-Refaie, A., 2011, "A Structural Model to Investigate Factors Affect Patient Satisfaction and Revisit Intention in Jordanian Hospitals", *International Journal of Artificial Life Research*, Vol. 2(4), pp. 43-56.
- Al Snousy, M. B., El-Deeb, H. M., Badran, K., Al Khilil, I. A., 2011, "Suite of Decision Tree-based Classification Algorithms on Cancer Gene Expression Data", *Egyptian Informatics Journal*, Vol. 12(2), pp. 73-82.
- Aliman, N. K., Mohamad, W. N. (2013). "Perceptions of Service Quality and Behavioral Intentions: A Mediation Effect of Patient Satisfaction in the Private Health Care in Malaysia", *International Journal of Marketing Studies*, Vol. 5(4), pp. 15-29.
- Anbarasi, M., Anupriya, E., Iyengar, N. C. S. N., 2010, "Enhanced Prediction of Heart Disease with Feature Subset Selection using Genetic Algorithm", *International Journal of Engineering Science and Technology*, Vol. 2(10), pp. 5370-5376.
- Arif, M., Ishihara, T., Inooka, H., 2001, "Incorporation of Experience in Iterative Learning Controllers using Locally Weighted Learning", *Automatica*, Vol. 37(6), pp. 881-888.
- Aydogmus, H.Y., Ekinci, A., Erdal, H.İ., Erdal, H., 2015, "Optimizing the Monthly Crude Oil Price Forecasting Accuracy via Bagging Ensemble Models", *Journal of Economics and International Finance*, Vol. 7(5), pp. 127-136.
- Aydogmus, H.Y., Erdal, H.İ., Karakurt, O., Namli, E., Turkan, Y.S., Erdal, H., 2015, "A Comparative Assessment of Bagging Ensemble Models for Modeling Concrete Slump Flow", *Computers and Concrete*, Vol. 16(5), pp. 741-757.
- Aydogmus, H.Y., Turkan, Y.S., 2016, "Passenger Demand Prediction for Fast Ferries Based on Neural Network and Support Vector Machine", *Uluslararası Alanya İşletme Fakültesi Dergisi*, Vol. 8(1), pp. 209-216.
- Boshoff, C., Gray, B., 2004, "The Relationships Between Service Quality, Customer Satisfaction and Buying Intentions in The Private Hospital Industry", *South African Journal of Business Management*, Vol. 35(4), pp. 27-37.
- Brown, I., Mues, C., 2012, "An Experimental Comparison of Classification Algorithms for Imbalanced Credit Scoring Data Sets", *Expert Systems with Applications*, Vol. 39(3), pp. 3446-3453.
- Bushinak, H., AbdelGaber, S., AlSharif, F. K., 2011, "Recognizing The Electronic Medical Record Data from Unstructured Medical Data Using Visual Text Mining Techniques", *International Journal of Computer Science and Information Security*, Vol. 9(6), pp. 25-35.

- Caouette, J., Altman, E., Narayanan, P., Nimmo, R., 2008, *Managing Credit Risk: The Great Challenge for Global Financial Markets*, Hoboken, NJ: Wiley.
- Chandra, D.K., Ravi, V., Bose, I., 2009, "Failure Prediction of Dotcom Companies using Hybrid Intelligent Techniques", *Expert Systems with Applications*, Vol. 36(3), pp. 4830-4837.
- Cho, B. H., Yu, H., Kim, K. W., Kim, T. H., Kim, I. Y., Kim, S. I., 2008, "Application of Irregular and Unbalanced Data to Predict Diabetic Nephropathy using Visualization and Feature Selection Methods", *Artificial Intelligence in Medicine*, Vol. 42(1), pp. 37-53.
- Cooper, G. F., Aliferis, C. F., Ambrosino, R., Aronis, J., Buchanan, B. G., Caruana, R., Janosky, J. E., 1997, "An evaluation of Machine-learning Methods for Predicting Pneumonia Mortality", *Artificial Intelligence in Medicine*, Vol. 9(2), pp. 107-138.
- De Bruin, J. S., Adlassnig, K. P., Blacky, A., Koller, W., 2016, "Detecting Borderline Infection in An Automated Monitoring System for Healthcare-associated Infection using Fuzzy Logic", *Artificial Intelligence in Medicine*, Vol. 69, pp. 33-41.
- Duch, W., Swaminathan, K., Meller, J., 2007, "Artificial Intelligence Approaches for Rational Drug Design and Discovery", *Current Pharmaceutical Design*, Vol. 13(14), pp. 1497-1508.
- Ekinci, A., Erdal, H. İ., 2011, "Türkiye'de Banka Başarısızlıklarının Tahmini Üzerine Bir Uygulama", *İktisat İletme ve Finans*, Vol. 26(298), pp. 21-44.
- Erdal, H., 2015, "Makine Öğrenmesi Yöntemlerinin İnşaat Sektörüne Katkısı: Basınç Dayanımı Tahminlemesi", *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Vol. 21(3), pp. 109-114.
- Erdal, H., Karahanoğlu, İ., 2016, "Bagging Ensemble Models for Bank Profitability: An Empirical Research on Turkish Development and Investment Banks", *Applied Soft Computing*, Vol. 49, pp. 861-867.
- Erdal, H. I., Baray, A., Esnaf, Ş., 2013, "Estimation of The Manufacturing Industry Sub-sectors' Capacity Utilization Rates using Support Vector Machines", *Artificial Intelligence Research*, Vol. 3(1), pp. 1-11.
- Erdal, H. I., Ekinci, A., 2013, "A Comparison of Various Artificial Intelligence Methods in The Prediction of Bank Failures", *Computational Economics*, Vol. 42(2), pp. 199-215.
- Erdal H. I., Ekinci, A., 2015, "Bank Failure Prediction Using Hybrid Classifier Ensembles of Random Sub-Spaces and Bagging", *The Second Yandex School of Data Analysis, Machine Learning: Prospects and Applications*, 5-8 October 2015, Berlin, Germany.
- Erdal, H. I., Karakurt, O., Namli, E., 2013, "High Performance Concrete Compressive Strength Forecasting using Ensemble Models Based on Discrete Wavelet Transform", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 26(4), pp. 1246-1254.
- Erdal, H.I., Namli, E., Aydogmus, H.Y., Turkan, Y.S., 2013, "Comparing Ensembles of Decision Trees and Neural Networks for One-day-ahead Streamflow Prediction", *Scientific Research Journal*, Vol. I (IV), pp. 43-55.
- Fiannaca, A., La Rosa, M., Rizzo, R., Urso, A., 2015, "A k-mer-based Barcode DNA Classification Methodology Based on Spectral Representation and A Neural Gas Network", *Artificial Intelligence in Medicine*, Vol. 64(3), pp. 173-184.
- Güzel, D., 2014, "A Research of Various Work Variables on Pharmacists Operating in Service Industry: the Province of Erzurum Sample". *13th International Academic Conference*, Antibes, French Riviera, 15-18 September 2014,.
- Hanson III, C. W., Marshall, B. E., 2001, "Artificial Intelligence Applications in The Intensive Care Unit", *Critical Care Medicine*, Vol. 29(2), pp. 427-435.
- Hosmer, D. W., Stanley, L., 2000, *Applied Logistic Regression*, (2nd ed.), New York: Chichester, Wiley.
- Jerez, J. M., Molina, I., García-Laencina, P. J., Alba, E., Ribelles, N., Martín, M., Franco, L., 2010, "Missing Data Imputation using Statistical and Machine Learning Methods in A Real Breast Cancer Problem", *Artificial Intelligence in Medicine*, Vol. 50(2), pp. 105-115.
- Jiawei, H., Kamber, M., 2001, *Data Mining: Concepts and Techniques*, San Francisco, CA, itd: Morgan Kaufmann.

- Kalantarian, H., Motamed, B., Alshurafa, N., Sarrafzadeh, M., 2016, "A Wearable Sensor System for Medication Adherence Prediction", *Artificial Intelligence in Medicine*, Vol. 69, pp.43-52.
- Kang, M. H., Yoon, S. Y., Kwon, M. J., Shim, H. S., 2013, "Emotional Labor of Nurses as Perceived by Patients, Satisfaction with Nursing Service, and Intention to Revisit the Hospital", *International Journal of Digital Content Technology and its Applications*, Vol. 7(12), pp. 289-293.
- Khalilia, M., Chakraborty, S., Popescu, M., 2011, "Predicting Disease Risks from Highly Imbalanced Data using Random Forest", *BMC Medical Informatics and Decision Making*, Vol. 11(1), pp.51-60.
- Kohavi, R., 1995, "A Study of Cross-validation and Bootstrap for Accuracy Estimation and Model Selection", *14th Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence*, San Francisco, pp. 1137-1143. Morgan Kaufmann.
- Kononenko, I., 2001, "Machine Learning for Medical Diagnosis: History, State of The Art and Perspective", *Artificial Intelligence in Medicine*, Vol. 23(1), pp. 89-109.
- Lin, R. H., 2009, "An Intelligent Model for Liver Disease Diagnosis", *Artificial Intelligence in Medicine*, Vol. 47(1), pp. 53-62.
- Li, Z., Wen, G., Xie, N., 2015, "An Approach to Fuzzy Soft Sets in Decision Making Based on Grey Relational Analysis and Dempster-Shafer Theory of Evidence: An Application in Medical Diagnosis", *Artificial Intelligence in Medicine*, Vol. 64(3), pp. 161-171.
- Marqués, A.I., García, V., Sánchez, J.S., 2012, "Two-level Classifier Ensembles for Credit Risk Assessment", *Expert Systems with Applications*, Vol. 39(1), pp. 10916-10922.
- Milovic, B., Milovic, M., 2012, "Prediction and Decision Making in Health Care using Data Mining", *International Journal of Public Health Science*, Vol. 1(2), pp.69-78.
- Moshtari, S., Sami, A., Azimi, M., 2013, "Using Complexity Metrics to Improve Software Security", *Computer Fraud & Security*, Vol. 2013(5), pp. 8-17.
- Namli, E., Erdal, H.İ., Erdal, H., 2016, "Dalgacık Dönüşümü ile Beton Basınç Dayanım Tahmininin İyileştirilmesi", *Politeknik Dergisi*, Vol. 19(4), pp. 471-480.
- Özer, H., 2004, *Nitel Değişkenli Ekonometrik Modeller: Teori ve Bir Uygulama*, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara.
- Özsoy, S., Gümüş, G., Khalilov, S. (2015), "C4. 5 Versus Other Decision Trees: A Review", *Computer Engineering and Applications Journal*, Vol. 4(3), pp. 173-182.
- Öztürk, H., Namli, E., Erdal, H. I., 2015, "Reducing Overreliance on Sovereign Credit Ratings: Which Model Serves Better? ", *Computational Economics*, Vol. 48(1), pp. 59-81.
- Öztürk, H., Namli, E., Erdal, H. I., 2016, "Modelling Sovereign Credit Ratings: The Accuracy of Models in A Heterogeneous Sample", *Economic Modelling*, Vol. 54, pp. 469-478.
- Painuli, S., Elangovan, M., Sugumaran V., 2014, "Tool Condition Monitoring using K-star Algorithm", *Expert Systems with Applications*, Vol. 41, pp. 2638-2643.
- Park, H. S., Seo, Y. J., 2014, "Determinants of Inpatients Satisfaction and Intent to Revisit Oriental Medical Hospitals", *Journal of Korean Medicine*, Vol. 35(4), PP. 65-73.
- Parthiban, L., Subramanian, R., 2007, "Intelligent Heart Disease Prediction System using CANFIS and Genetic Algorithm", *International Journal of Biological, Biomedical and Medical Sciences*, Vol. 1(5), pp. 278-281.
- Portnoy, S., Koenker, R., 1997, "The Gaussian Hare and The Laplacian Tortoise: Computability of Squared-error Versus Absolute-error Estimators", *Statistical Sciences*, Vol. 12(4), pp. 279-300.
- Sarker, A., Mollá, D., Paris, C., 2015, "Automatic Evidence Quality Prediction to Support Evidence-based Decision Making", *Artificial Intelligence in Medicine*, Vol. 64(2), pp. 89-103.
- Sarvari, N. G., 2012, *Destination Brand Equity, Satisfaction And Revisit Intention: An Application In TRNC As a Tourism Destination*, Doctoral Dissertation, Eastern Mediterranean University, Cyprus.
- Soni, J., Ansari, U., Sharma, D., Soni, S., 2011, "Predictive Data Mining for Medical Diagnosis: An Overview of Heart Disease Prediction", *International Journal of Computer Applications*, Vol. 17(8), pp. 43-48.

- Stühlinger, W., Hogl, O., Stoyan, H., Müller, M., 2000, "Intelligent Data Mining for Medical Quality Management", *Proceedings Fifth Workshop Intelligent Data Analysis in Medicine and Pharmacology (IDAMAP-2000)*.
- Tüfekci, P., 2014, "Prediction of Full Load Electrical Power Output of A Base Load Operated Combined Cycle Power Plant using Machine Learning Methods", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 60, pp. 126-140.
- Türkan, Y. S., Aydoğmuş, H. Y., Erdal, H., 2016, The Prediction of The Wind Speed at Different Heights by Machine Learning Methods, *An International Journal of Optimization and Control: Theories & Applications*, Vol. 6(2), pp. 179-187.
- Verplancke, T., Van Looy, S., Benoit, D., Vansteelandt, S., Depuydt, P., De Turck, F., Decruyenaere, J., 2008, "Support Vector Machine Versus Logistic Regression Modeling for Prediction of Hospital Mortality in Critically Ill Patients with Haematological Malignancies", *BMC Medical Informatics and Decision Making*, Vol. 8(1), pp. 56-64.
- Witten, I.H., Frank, E., Hall, M.A., 2011, *Data Mining Practical Machine Learning Tools and Techniques*, Third Edition, San Francisco, Morgan Kaufmann.
- Yapraklı, T.Ş., Erdal, H., 2016, "Firma Başarısızlığı Tahminlemesi: Makine Öğrenmesine Dayalı Bir Uygulama", *International Journal of Informatics Technologies*, Vol. 9(1), pp. 21-31.
- Yeang, C. H., Ramaswamy, S., Tamayo, P., Mukherjee, S., Rifkin, R. M., Angelo, M., Golub, T., 2001, "Molecular Classification of Multiple Tumor Types", *Bioinformatics*, Vol. 17(suppl 1), pp. 316-322.



KENTSEL DÖNÜŞÜM'DE RİSKLİ ALAN ÖNCELİKLERİNİN BELİRLENMESİ İÇİN BULANIK MANTIK TABANLI SİSTEM TASARIMI

¹Halil İbrahim SOLAK, ²Ayşegül ALAYBEYOĞLU

¹Katip Çelebi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kentsel Dönüşüm A.B.D., 35100 İzmir

²Katip Çelebi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 35100 İzmir

¹solak@halilibrahim.net, ²aysegul.alaybeyoglu@ikc.edu.tr

(Geliş/Received: 05.01.2017; Kabul/Accepted in Revised Form: 10.03.2017)

ÖZ: Kentlerin daha güvenli ve yaşanabilir hale getirilmesi işlemi yani kentsel dönüşüm uygulaması afetlerden sonra değil afetler ortaya çıkmadan önce sağlıklı ve analitik bir şekilde uygulanmalıdır. Bunun için ilk koşul ise olası bir afet durumuna karşı risk içeren alanları ve bu alanların önceliklerini doğru bir şekilde belirlemektir. Bu çalışmada riskli alan belirleme işlemine bulanık mantık ile yaklaşılmış ve farklı kurumların farklı önceliklere göre belirlemede olduğu riskli alanlar için standart oluşturabilecek bir model önerisi getirilmiştir. Bulanık mantık tabanlı geliştirilen modelde yapı ortalama performans puanı, yerleşime uygunluk durumu ve nüfus yoğunluğu bilgileri sisteme girdi verileri olarak ele alınmıştır. Bu girdi verileri değer aralıklarına göre derecelendirilerek bulanık bir küme oluşturulmuş ve kural tabanı çalıştırılarak risk önceliği çıktısı elde edilmiştir. C# programlama dili kullanılarak kullanıcının bulanık mantık tabanlı model tasarlamasında kolaylık sağlayacak bir arayüz geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bulanık mantık, Kentsel dönüşüm, Riskli alan

A Fuzzy Logic Based System Design For Determination Of Risk Areas In Urban Regeneration

ABSTRACT: Making the cities safer and more livable process, in other words, urban regeneration application should be applied healthfully and analytically not after the disasters before they occur. For this, the first condition is to determine correctly areas containing risk and the priorities of these areas against a possible disaster. In this study, the process of determining risk areas has been approached with fuzzy logic technique and a model that could set the standard for the risky areas as determined according to the different priorities of different institutions has been proposed. In the proposed fuzzy logic based system, structure average performance, suitability for accommodation and population density are used as input parameters. These data are categorized in accordance with range values to obtain fuzzified data. By running rule base on fuzzified data, risk priority output value is obtained. In order to make user to design fuzzy logic based model easily, an interface is developed by using C# programming language.

Key Words: Fuzzy logic, Urban regeneration, Risk area

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kentler zaman içerisinde gerek sanayileşme gerekse doğal afetler gibi çeşitli nedenlerle değişim ve dönüşüm ihtiyacı duymaktadır. Kentsel mekanlarda değişim ve dönüşüm, yaşama ve mekana yönelik kalite artışı amacıyla yapılabildiği gibi mekanın fiziksel, çevresel ve toplumsal yapısında meydana gelen deformasyonların giderilmesi amacıyla da yapılabilmektedir (Genç, 2008; Uğur ve diğ., 2016).

Ülkemizde 21. Yüzyılda meydana gelen depremler ve gelecekte meydana gelmesi beklenen depremler incelendiğinde ise kentsel dönüşümde öncelikli amacın güvenlik olması gerektiği görülmektedir.

1999 Marmara depreminde meydana gelen can ve mal kayıpları nedeniyle kentsel dönüşüm kavramı daha çok önem kazanmış ve bölgede yer alan kentleşme ve yerleşme sorunlarının görünür hale gelmesi ile birlikte daha çok tartışılmaya başlanmıştır (Genç, 2008). 2011 Van depreminden sonra ise devlet kentsel dönüşüm kapsamında eski binaların yenilenmesi ve izinsiz/riskli binaların yıkılması konusunda önemli kararlar almıştır (Wakefield ve diğ., 2016). Ülkemizin büyük çoğunluğunun 1. ve 2. derece deprem kuşağı içerisinde yer alması nedeniyle de Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (ÇŞB) tarafından kentsel dönüşüm uygulamalarında yapı ve alan bazında risk içeren bölgelere öncelik verilmiştir (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2012).

Türkiye'de kentleşme oranı her geçen gün artmaktadır. Bu oran 1950'lerin başlarına kadar %25 civarında iken, 1980 yılında %40 ve 2000 yılında %65 seviyesine ulaşmıştır. Türkiye, 1980-2000 yılları arasında dünyada kentleşme oranı en yüksek ülkeler arasında üçüncü sırada yer almıştır. 2015 itibarıyla de Türkiye'de kentleşme oranı %92,1'e ulaşmıştır (Türkiye İstatistik Kurumu Web Sitesi). Kentlerin nüfuslarında her geçen gün meydana gelen bu artış konut sıkıntısı yaratmaktadır. Bu nedenle de toplum küçük hanelerde büyük sayılarda yaşamakta ya da kaçak yapılaşmaya yönelmektedir (Türkiye İstatistik Kurumu Web Sitesi; Köktürk ve diğ., 2007, a). Bu durum ise olası bir afet ya da yapıdan kaynaklı çökme ve yıkılmalar sonucunda oluşacak can kaybını artmasına zemin hazırlamaktadır. Her geçen gün artan kent nüfusu ile birlikte mevcut konut stoğu ve kalitesi kentsel dönüşümün güvenlik boyutu ile doğrudan ilgilidir.

Türkiye'nin yer alan toplam konut stokunun %8'i 2001 yılı sonrasında inşa edilmiştir. Bu binalarda ise ülke nüfusunun %22'si yaşamaktadır. En büyük 10 kentin toplam nüfusu dikkate alındığında ise ülke nüfusunun yaklaşık yarısı bu kentlerde yaşamakta, ancak konut stokunun yalnızca %11'i 2001'den sonra ve gerekli deprem güvenlik kurallarına uygun olarak inşa edilmiştir. 2035 yılına kadar ülke çapında kentsel dönüşüm kapsamında yaklaşık 6.7 milyon konut biriminin yıkılıp yeniden yapılacağı tahmin edilmektedir (Wakefield ve diğ., 2016).

Türkiye'de kentsel dönüşüm uygulamaları 6306 sayılı "Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanun" kapsamında riskli yapı ve riskli alan olarak, 5393 sayılı "Belediye Kanunu"nun 73. Maddesi kapsamında kentsel dönüşüm ve gelişim alanı olarak gerçekleştirilmektedir. Bu kanunlar kapsamında riskli alanların tespitinde Belediyeler, İl Özel İdareleri, Büyükşehir Belediyeleri, ÇŞB tarafından yetkilendirilen İlçe Belediyeleri, Çevre ve Şehircilik İl Müdürlükleri yetkilidir. Ancak ilgili kanunlar incelendiğinde riskli alan tespitinde referans alınacak kriterlerin risklilik seviyesine olan etkisinin belirtilmediği görülmektedir (Kanun No: 6306, 2012; Kanun No: 5393, 2005). Birden fazla kurumun riskli alan tespiti yapma yetkisine sahip olduğu değerlendirildiğinde kentsel dönüşümün amaca uygun olarak gerçekleştirilmesi ve olası afetlere karşı maksimum düzeyde önlem alınabilmesi için bir Karar Destek Sistemi'ne ihtiyaç olduğu görülmektedir.

Meram, Edirne ve Beyoğlu Belediyeleri gibi çeşitli kurumların Kentsel Dönüşüm Müdürlüklerince yayınlanmış olduğu görev ve çalışma yönetmeliğinde (Meram, Edirne, Beyoğlu, Bayrampaşa Belediyesi, 2016) "Belediye sınırları içinde fiziksel, sosyal ve ekonomik olarak kente entegre olamayan bölgeleri belirleyerek, öncelikli olarak yıkıntı ve çöküntü alanlar olmak üzere kritik yoğunluklu, düzensiz gelişmiş ve afet riski taşıyan alanlardan başlayarak kentsel dönüşüm (riskli alan) ve kentsel yenileme alanlarını tespit eder, öncelik sırasını belirler, planlar ve uygulama programlarını hazırlar" belirtilmektedir. Bu yönetmelikte de görüldüğü gibi riskli alanların belirlenmesinde önceliklerin belirlenmesinin önemine vurgu yapılırken, bu önceliklerin nasıl yapılacağına dair bir netlik bulunmamaktadır.

Çevre ve şehircilik bakanlığının Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanunun Uygulama Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Hazırlanmış olduğu yönetmelikte ise (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2013), "belirli alanlarda önceliklerin ve riskli olabilecek binaların bölgesel dağılımının belirlenmesi amacıyla; bina özelliklerini ve deprem tehlikesini göz önüne alan değerlendirme yöntemleri kullanılmıştır. Bu amaçla, Birinci aşama değerlendirme yöntemlerinde

binanın dışarıdan ve kısmen içeriden belirlenen ve deprem davranışını etkileyen parametreler kullanılır. İkinci aşama değerlendirme yöntemlerinde binanın dışarıdan belirlenen parametrelerine ek olarak, malzeme dayanımları, eleman boyutları gibi özellikleri göz önüne alınır. Örneğin Betonarme Binalar için Birinci Aşama Değerlendirme Yönteminde gerekli olan parametreler: Taşıyıcı sistem türü, Kat adedi, Mevcut durum ve görünen kalite, Yumuşak kat/zayıf kat, Düşeyde düzensizlik, Ağır çıkmalar, Planda düzensizlik, Kısa kolon etkisi, Yapı nizamı, Tepe/yamaç etkisi, Deprem tehlikesi ve zemin sınıfı olarak tanımlanırken; Yığma Binalar için Birinci Aşama Değerlendirme Yönteminde bu parametreler: Yığma bina türü, Serbest kat adedi, Yapı nizamı ve bitişik bina ile ilişkisi, Mevcut durum ve görünen kalite, Planda olumsuzluklar, Düşeyde olumsuzluklar, Düzlem dışı davranış olumsuzlukları, Çatı türü, Deprem tehlikesi ve zemin sınıfı olarak tanımlanmıştır” belirtilmektedir.

Çalışma kapsamında kentsel dönüşüm uygulamalarına ilişkin çalışmalar, 6306 ve 5393 sayılı kanunlara yönelik araştırmalar, ÇSB tarafından hazırlanan yasa ve yönetmelikler, sunumlar ve açık olarak paylaşılan yazışmalar, Bulanık Mantık yöntemine yönelik bilimsel çalışmalar detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Köktürk ve Köktürk (Köktürk ve diğ., 2007, b) deprem ve kentsel dönüşüm ilişkilerini ele aldığı çalışmada, İstanbul Deprem Master Planı ve Amerika Birleşik Devletleri Jeolojik Araştırmalar Dairesi tarafından 2000 yılından başlayarak sonraki 30 yıl içerisinde İstanbul’da yaklaşık %15 hata oranı içinde ve gerçekleşme olasılığı %62 olan büyük bir deprem riski uyarısı bulunduğu işaret ederek depremde yaşanabilecek olası can ve mal kayıplarının büyüklüğü, yapıların ve yerleşme sisteminin depreme karşı güvenli duruma getirilmesi, olası deprem zararlarının minimuma indirilmesi konularına yönelik stratejilerin geliştirilmesi zorunluluğunu ifade etmiştir.

Öcal ve İnce (Öcal ve İnce, 2012) Türkiye’de mevcut yapı stoğunu kentsel dönüşüm kapsamında değerlendirdiği çalışmada ülke nüfusunun %90’dan fazlasının 1. derece deprem bölgesinde yaşamakta olduğunu ve olası bir deprem durumunda mevcut yapı stoğunun büyük bir çoğunluğunun hasar görme riskinin yüksek olduğunu ifade etmiştir. Bununla birlikte depreme karşı mevcut yapı stoğunun değerlendirilmesi amacıyla yapılan çalışmaların başında gelen güçlendirme çalışmalarının çoğu durumda ekonomik nedenler yüzünden yaygın olarak uygulanmadığını ancak olası deprem ihtimaline karşı güçlendirilebilir yapıların güçlendirilmesi ve bunun dışında kalan yapıların kentsel dönüşüm projesi kapsamında değerlendirilmesi gerektiğini ifade etmiştir (Uğur ve diğ., 2016).

Ersoy (Ersoy, 2015) 2015 yılının ilk çeyreğinde küresel ölçekte doğa afetlerini araştırdığı çalışmada son yıllarda dünya çapında meydana gelen Meteorolojik afetlerin Jeolojik afetlerin şiddetine rağmen daha ölümcül olduğunu ve küresel iklim değişikliğine bağlı gerçekleşen Meteorolojik afetlerin artık mega fırtınalar, aşırı kış koşulları, seller ve de son zamanlarda ülkemizde de fazla sayıda görülen hortumlardan oluştuğunu ifade etmiştir.

Dükkancı (Dükkancı, 2013) kentsel dönüşümün Türkiye’deki gelişimini, yasal ve yönetsel boyutunu incelediği çalışmada 6306 sayılı kanunun yürürlüğe girmesi ile birlikte tekrar gündeme gelen kentsel dönüşüm kavramının ve uygulama sürecinin bu yasa kapsamında afet odaklı ele alındığını ancak kanunda yer alan bazı ifade ve kavramların kentsel dönüşüm sürecinin bir çıkar aracına dönüşmesine sebep olduğunu ifade etmiştir.

Aydın (Aydın, 2013) 6306 sayılı kanun kapsamında İstanbul Esenler kentsel dönüşüm örneğini ele aldığı çalışmada mevcut bazı yapıların ilerleyen zamanlarda doğal afetlere dahi gerek kalmadan yıkılıp can ve mal kaybına yol açma riski taşıdığını ve günümüzde planlama ve yapılaşmada deprem faktörünün de dikkate alınarak kentsel dönüşüm çalışmalarının bir gereklilik olduğunu ifade etmiştir.

Kentsel dönüşüm kapsamında gerek fen gerekse sosyal bilimler alanlarında yapılan araştırmalar dikkate alındığında Jeolojik, Meteorolojik ve diğer afetlerin meydana gelmesi durumunda yaşanabilecek can ve mal kaybına karşın ülkemizdeki kentsel dönüşüm çalışmalarının güvenlik boyutunun büyük bir önem arz ettiği görülmektedir. Bununla birlikte kentsel dönüşümde rant eleştirileri ve uygulamalarının önüne geçilmesi ve olası hukuki itirazlar durumunda dayanak gösterilebilmesi açısından bir standart oluşturulmasının zaruri olduğu görülmektedir. Buradan hareketle kentsel dönüşüm çalışmalarının

verimli olması öncelikle doğru ve sayısal verilere dayalı ortak bir yöntem ile riskli alan tespitine sonrasında ise dönüşüm çalışmasının sağlıklı bir şekilde uygulanmasına dayanmaktadır.

Doğal afetler vb. diğer olaylar sonucunda meydana gelebilecek can ve mal kaybına karşı maksimum önlem alabilmek için kentsel dönüşüm uygulamaları afetlerden önce yapılmalıdır. Bunun için ilk koşul ise olası bir afet durumuna karşı risk teşkil eden alanları ve bu alanların önceliklerini doğru bir şekilde belirlemektir. Bu çalışmada riskli alan belirleme işlemine "Güvenlik" teması dikkate alınarak yapay zeka yöntemlerinden biri olan Bulanık Mantık yöntemi ile yaklaşmış ve farklı kurumların farklı önceliklere göre belirlemekte olduğu riskli alanlar için bir standart oluşturma önerisi getirilmiştir.

LİTERATÜR ÖZETİ (RELATED WORKS)

Literatür çalışması kapsamında bulanık mantığın hangi alanlarda kullanıldığı ve ülkemizde veya uluslararası alanda kentsel dönüşümde bulanık mantığın kullanılmasına dair yapılan çalışmalardan özetle bahsedilmiştir.

Klasik mantığın keskin ve net sonuçlar vermesi (siyah-beyaz, 0-1, az-çok gibi), günlük yaşamda karşılaşılabilen problemlerin modellenmesinde kısıtlar getirmektedir. Nitekim günlük yaşamda siyah ve beyaz dışında ara tonların, 0 ve 1 aralığında derecelendirmelerin, çok az-az-orta-çok gibi sınıflandırmaların olabileceği pek çok durumla karşılaşmaktadır. Bütün bunlardan hareketle, problemlerin klasik mantıkta olduğu gibi keskin ve kesin değerler ile modellenmesi yerine, ara değerler ile derecelendirmenin daha doğru sonuçlar vereceği görülmüş ve günlük yaşam problemlerinin Bulanık Mantık yaklaşımı ile modellenebilmektedir.

Bulanık mantık genel olarak mühendislik, tıp, sosyoloji, işletme, uzman sistem, sinyal işleme, ulaştırma, sinyalizasyon gibi bir çok farklı alanda kullanılabilir (Bulanık Mantık Ders Notu, 2012). Bulanık mantık üzerine yapılan ilk çalışma 1974 yılında Mamdani tarafından buhar makineleri üzerine olmuştur. Sonrasında çalışmaların devamı gelmiş olup 1976 yıllarında sırasıyla Ilık Su İşlemi, Isı ve Basınçla yapıştırılmış maden parçaları üreten fabrika, robot üretimi, 1977 yıllarında Trafik Kavşağı, Isı Değiştiricisi, 1980 yılında Çimento Sanayi, 1983 ve 1984 yıllarında Otomobil ve Uçak üretimlerinde, 1988 yıllarında Asansör Kontrolü ile Güç Sistemleri ve Nükleer Kontrol alanlarında bulanık mantık yaklaşımı kullanılmıştır (Sinecen, 2002).

Subaru ve Nissan firmalarının gerçekleştirdikleri otomobil vites sisteminde, araba kullanım stiline ve motor yükünün sezilerek uygun dişli oranının seçimi, Nissan tarafından gerçekleştirilen ABS fren sistemleri, Fujitsu, Toshiba, Hitachi ve Mitsubishi'nin gerçekleştirdikleri büyük asansör denetim sistemleri, Matsushita firmasının dizayn ettiği çamaşır makinesinde çamaşırın kirliliğine, ağırlığına ve kumaşın cinsine göre yıkama programı seçen sistemler bulanık mantığın kullanıldığı örneklerdendir. NASA'da bir grup araştırmacı, Bulanık Mantıktan yararlanarak, uzay mekiğinin yakıt tüketimini üç kat azaltmayı ve sistem güvenilirliğinin artmasını sağlamışlardır (Sinecen, 2002).

Bulanık Mantık denetimine olan ilgi ve çalışmalar artıca uygulama alanları da buna paralel olarak artış göstermiştir. Özellikle beyaz eşya, otomotiv, elektronik aletler üzerine çok sayıda çalışmada bulunulmuştur (Kaynak ve diğ., 1993). Bulanık mantığın birçok farklı alanda kullanılabilir olması, araştırmacıların bu alanlarda çok sayıda çeşitli kitaplar yayınlamasına motive edici olmuştur (Baykal ve Beyan 2004; Özdağoğlu, 2016; İbrahim, 2006; Türkşen, 2015).

Deprem sonrası yapılardaki hasar tespiti için Bulanık Mantık Yöntemi'nin uygulanabilirliği Kömür ve Altan (Kömür ve Altan, 2005) tarafından araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre karmaşık sistemlerde bulanık mantığın klasik mantığa göre insan düşüncesi ve yargısına daha uygun sonuçlar verdiği gözlenmiştir (Kömür ve Altan., 2005). Bu durum yine karmaşık bir sistem olan riskli alanların tespitinde bulanık mantık yönteminin uygulanabilirliğini aklı getirmiştir.

Riskli alanların belirlenmesi için birden fazla kriter bulunmaktadır. Bu kriterler ortaya karmaşık bir sistem çıkarmaktadır. Tüm bu kriterler değerlendirilirken maksimum doğruluk ve verimlilik için uzman görüşleri kullanılmalıdır. Ancak karmaşık sistemler için farklı kurumlardan farklı uzmanlar tarafından yapılan derecelendirmelerin homojen bir sonuç üretmeyeceği, dolayısıyla kentsel dönüşümün amacına

ulaşması konusunda sorunlar ortaya çıkabileceği öngörülmektedir. Bu nedenle de bulanık mantık yönteminin riskli alanların belirlenmesinde ihtiyaç olduğu düşünülmektedir.

SİSTEM ALTYAPISI (SYSTEM INFRASTRUCTURE)

Bulanık Mantık (Fuzzy Logic)

Klasik mantıkta önermeler doğru ya da yanlış olarak kabul edilir. Matematiksel olarak ifade edildiğinde ise doğru olduğu durumda 1, yanlış olduğu durumda ise 0 değerini alır. Doğru ya da yanlış dışındaki üçüncü bir olasılığın olmadığı varsayılır. Bulanık mantıkta ise önermeler doğru, yanlış, az doğru, çok yanlış, çok doğru gibi ifade edilebilir. Matematiksel olarak 0 ile 1 aralığında sonsuz sayıda değer alabilir. Bu, Zadeh'in bulanık kümeler üzerindeki ilk çalışmasının bir sonucudur. (Zadeh, 1965; Bulanık Mantık Ders Notu, 2016) Zadeh bulanık mantığın genel özelliklerini şu şekilde ifade etmiştir (Zadeh, 1965; Elmas, 2003; Tiryaki ve Kazan, 2007);

- Bulanık mantık kesin değerlere dayanan düşünme yerine yaklaşık düşünme kullanır.
- Bulanık mantık yaklaşık düşünme yapısına sahiptir.
- Bulanık mantıkta bilgi az, çok, çok az şeklinde dilsel ifadeler ile tanımlanabilir.
- Bulanık mantıkta her şey 0 – 1 aralığında belirli bir derecele temsil edilir.
- Bulanık çıkarım işlemi, dilsel ifadelerin birbirleriyle olan ilişkileri doğrultusunda tanımlanan kurallar ile gerçekleştirilir.
- Mantıksal olan tüm sistemlere bulanıklık kazandırılabilir.
- Bulanık mantık, matematiksel modelin elde edilmesinin zor olduğu sistem ve durumlar için uygundur.

Bulanık Mantık Sistemi temel olarak aşağıdaki kavramları içermektedir:

- **Giriş/Veri Tabanı:** Üzerinde çalışma yapılacak olan olayın girdi değişkenlerini ve bunlar hakkındaki bilgileri içermektedir. Bu ifadeye veri tabanı veya kısaca giriş olarak adlandırılmaktadır. Genel veri tabanı denilmesinin nedeni ise sayısal veya sözel bilgileri içermesidir.
- **Bulanıklaştırıcı:** Oluşturulan sistemdeki giriş verilerini dilsel nitelikler olan sembolik değerlere dönüştürülme işleminin gerçekleştirildiği bölümdür.
- **Bulanık Kural Tabanı:** Veri tabanındaki girişleri çıkış değişkenlerine bağlayan EĞER- İSE şeklinde oluşturulan kuralların tümünü ifade eder. Bu kurallar oluşturulurken girdi ile çıktı verileri arasında olabilecek tüm olasılıkları düşünülerek oluşturulur. Dolayısıyla her bir kural girdi verisinin bir elemanını çıktı verisine mantıksal olarak bağlar. Oluşturulan bu kuralların tümüne kural tabanını oluşturmaktadır.
- **Bulanık Çıkarım:** Bulanık kural tabanında giriş ve çıkış bulanık kümeleri arasında kurulmuş olan sistemin parça ilişkilerini bir bütün olarak toplaması sonucu sistemin bir çıkış olarak davranmasını temsil eden bir mekanizmadır. Bu mekanizma her bir kuralı bir arada toplayarak sistem için belirlenen girdilerin altında nasıl çıktı vereceğinin belirlenmesine yarar. Yaramaktadır.
- **Durulaştırma:** Bulanık çıkarım mekanizmasının bulanık küme çıkışları üzerinde değişiklik yapması sonucu gerçek değerlere dönüştüldüğü bölümdür.
- **Çıkış:** Girdi ve kural tabanlarının bulanık çıkarımı sonucunda elde edilen çıktı değerlerinin tümünü içerir.

Giriş verilerinin bulanıklaştırılması aşamasında üyelik fonksiyonları kullanılmaktadır. Bu amaçla geliştirilmiş bir çok üyelik fonksiyonu bulunmaktadır. Yaygın olarak üçgen, yamuk ve Gaussian üyelik fonksiyonlarıdır. Üyelik fonksiyonları bulanık mantık tekniğini kullanacak olan kişinin problemine göre değişiklik gösterebilir. Üyelik fonksiyonun kullanıldığı alanlar dikkate alındığında uygun olan fonksiyon belirlenir.

Kural tabanı için kuralların oluşturulması aşamasında bir çok farklı yöntem bulunmaktadır. Bunlardan en bilineni Mamdani yöntemidir ve aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır.

$$\text{Eğer } girdi1 = A \text{ ve } girdi2 = B \text{ ise } çıktı = C$$

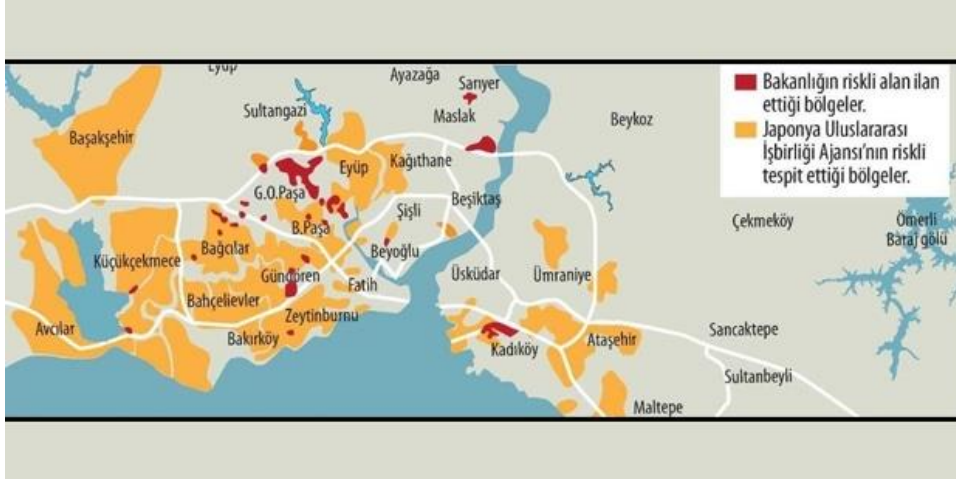
Bulanıklaştırılmış veriler (*girdi1*, *girdi2*) ve tanımlanan kurallar yardımıyla sistem bir çıkış verisi (*çıktı*) üretir. Son olarak bulanık olarak elde edilen çıkış verisi durulaştırılarak gerçek değerlere dönüştürülür (Zadeh, 1965; Elmas, 2003; Tiryaki ve Kazan, 2007). Durulaştırma aşamasında da kullanılan çok farklı yöntemler vardır. En büyük üyelik derecesi, ağırlık merkezi, alan açortayı, en büyük dereceli elemanlardan küçük olanı belirleme, ağırlıklı ortalama yöntemleri bunlardan en çok kullanılanlarıdır.

Riskli Alan (Risk Areas)

6306 sayılı kanunda riskli alan kavramı “Zemin yapısı veya üzerindeki yapılaşma sebebiyle can ve mal kaybına yol açma riski taşıyan, Bakanlık veya İdare tarafından Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı'nın görüşü de alınarak belirlenen ve Bakanlığın teklifi üzerine Bakanlar Kurulunca kararlaştırılan alan” olarak tanımlanmıştır (Kanun No: 6306, 2012). 5393 sayılı kanunun 73. Maddesinde ise kentsel dönüşüm ve gelişim alanı “Belediye, belediye meclisi kararıyla; konut alanları, sanayi alanları, ticaret alanları, teknoloji parkları, kamu hizmeti alanları, rekreasyon alanları ve her türlü sosyal donatı alanları oluşturmak, eskiyen kent kısımlarını yeniden inşa ve restore etmek, kentin tarihi ve kültürel dokusunu korumak veya deprem riskine karşı tedbirler almak amacıyla kentsel dönüşüm ve gelişim projeleri uygulayabilir. Bir alanın kentsel dönüşüm ve gelişim alanı olarak ilan edilebilmesi için yukarıda sayılan hususlardan birinin veya bir kaçının gerçekleşmesi ve bu alanın belediye veya mücavir alan sınırları içerisinde bulunması şarttır” olarak ifade edilmiştir (Kanun No: 5393, 2005).

Görüldüğü üzere ilgili kanunlarda riskli alan ilan edilme gerekçeleri olarak zemin yapısı, üzerindeki yapılaşma, üzerinde yapı olan veya olmayan imarlı veya imarsız alanlar olması, yapı yükseklik ve yoğunluğunun belirlenmesi, alanın büyüklüğü kriterleri belirlenmiştir. Ancak süreci hızlandırmak adına bu kavramlar geniş ve belirsiz tutulmuştur (Bektaş, 2014).

Türkiye’de bugüne kadar 40’tan fazla kentte 140’dan fazla riskli alan ilan edilmiştir (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2016; Japon Uluslararası İşbirliği Ajansı, 2002). İstanbulda bugüne kadar ilan edilen riskli alanların bazılarının ilan edilme gerekçeleri ile ilgili Japonya Uluslararası İşbirliği Ajansı (JICA) tarafından hazırlanan Afet Önleme Azaltma Temel Planı Çalışma Anlaşması Raporu’na (Japon Uluslararası İşbirliği Ajansı, 2002) dayanan bir takım eleştiriler mevcuttur. (Hürriyet, 2016) ve (Radikal, 2016)’te JICA’nın açıkladığı riskli alanlar haritası ile bakanlığın riskli ilan ettiği alanların yüzde 72.9 örtüşmediği, riskli alan ilan edilen ilçelerin şehrin merkezinde, konut değeri yüksek bölgeler olmadığı konuları eleştirilmektedir.



Şekil 1. İstanbul için JICA ve Bakanlığın riskli tespit edilen alanları (Sinecen, 2002; Zadeh, 1965).

Figure 1. Risk areas determined by Ministry and JICA for Istanbul

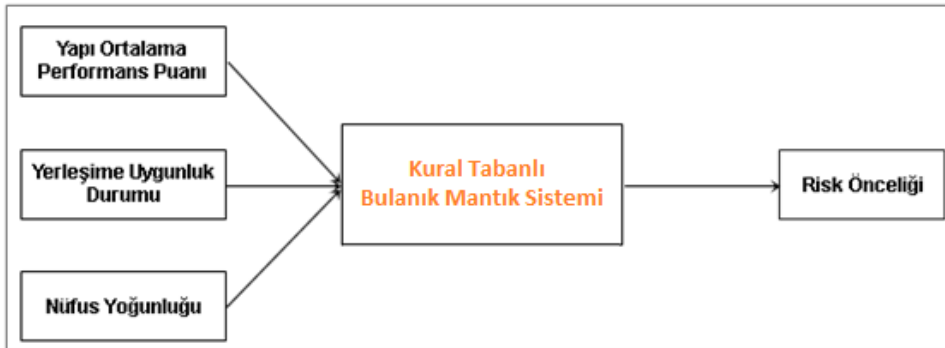
Tüm bu gerekçeler değerlendirildiğinde kentsel dönüşümün daha sağlıklı bir şekilde amacına ulaşabilmesi, olası afet durumlarında yaşanabilecek can ve mal kayıplarının minimum seviyeye çekilmesi, farklı kurumlar tarafından homojen değerlendirmelerin yapılabilmesi ve riskli alanların güvenlik önceliği dikkate alınarak analitik bir şekilde belirlenebilmesi için yapay zeka yöntemlerinden biri olan bulanık mantık yöntemi ile geliştirilebilecek bir modelin uygulanabilirliği bu çalışmada önerilmektedir.

ÖNERİLEN MODEL (THE PROPOSED MODEL)

Bu bölümde önerilen modelin genel yapısı, kullanılan üyelik fonksiyonları, kural tablosu ve elde edilen çıktı açıklanmıştır.

Modelin Genel Yapısı (General Structure of the Proposed Model)

Olası afet durumunda yaşanabilecek can ve mal kayıplarından dolayı bu model “güvenlik” teması ön planda tutularak hazırlanmıştır. Kentsel dönüşümün sosyal ve ekonomik boyutunu etkileyecek yeşil alan, sosyal tesis vb. girdiler modele dahil edilmemiştir. Yapılan detaylı araştırmalar sonucunda da 3 adet girdi ve 1 adet çıktı verisi belirlenmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. Modelin girdi ve çıktı verileri.

Figure 2. Inputs and output of the model

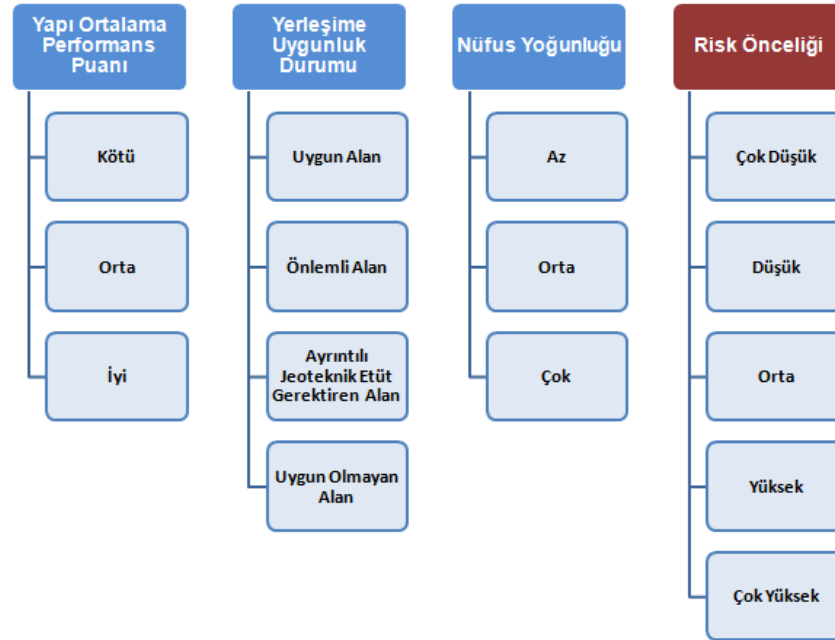
Önerilen modelde anketlerden elde edilen puanlara ve uzmanlardan alınan verilere dayalı olarak sisteme girdi verisi olarak “Yapı Ortalama Performans Puanı”, “Yerleşime Uygunluk Durumu” ve “Nüfus Yoğunluğu” bilgileri verilmektedir. Bu sayısal veriler Kural Tabanlı Bulanık Mantık Sisteminde

Üyelik Fonksiyonları kullanılarak öncelikle bulanık veriler haline dönüştürülür. Sonrasında, önceden tanımlanmış olduğumuz kural tablosunda bulanıklaştırılmış veriler çalıştırılır ve bulanık sonuç elde edilir. Durulaştırma yöntemi ile de elde edilen bulanık sonuç sayısal değere dönüştürülerek risk önceliği elde edilir.

Üyelik Fonksiyonları (Membership Functions)

Modele tanımlanan, kişilerin ve yapıların güvenliğini doğrudan etkileyen faktörlerden girdi verisi olarak Yapı Ortalama Performans Puanı (YOPP), Yerleşime Uygunluk Durumu (YUD), Nüfus Yoğunluğu (NY) ve çıktı verisi olarak ise Risk Önceliği (RÖ) belirlenmiştir.

Burada YOPP verisi için 3 derece (İyi, Orta, Kötü), YUD verisi için 4 derece (Uygun Alan (UA), Önlemlili Alan (ÖA), Ayrıntılı Jeoteknik Etüt Gerektiren Alan (AJE), Uygun Olmayan Alan (UOA)) ve NY verisi için ise 3 derece (Az, Orta, Çok) tanımlanmıştır. Çıktı verisi olan RÖ için ise 5 derece (Çok Düşük, Düşük, Orta, Yüksek, Çok Yüksek) tanımlanmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. Girdi ve çıktı verilerine ait dereceler.

Figure 3. Degrees for inputs and output

YOPP verisi için Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından belirlenen "Riskli Yapıların Tespit Edilmesine İlişkin Esaslar" referans alınmıştır (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2016). Bu esaslara göre yapının performans puanı belirlenirken kat adedi, deprem bölgesi, kısa kolonlar, binanın görsel kalitesi gibi 10'dan fazla kriter baz alınmaktadır. Elde edilen bu verilere göre hazırlanan teknik raporlara dayanarak yapılan hesaplamalar sonucunda yapı için 0 ile 100 arasında bir performans puanı belirlenmektedir (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2016). Her bir bölge için yapılacak yapı performans puan hesaplamalarının ortalaması birinci girdi verisi olarak kullanılacaktır.

YUD verisi için T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü'nün 10337 sayılı genelgesinde yer alan "İnceleme Alanının Yerleşime Uygunluk Analizi" değerlendirmesi referans alınmıştır (Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, 2008). Burada ham veri haritaları (jeoloji, eğim, yeraltı suyu haritaları vb.), ara ürün haritaları (yerel zemin sınıfları vb.) ve final tehlike haritalarının (sıvılaşma, zemin büyütmesi vb) tamamı değerlendirilerek, mühendislik yorumları da katılarak yerleşime uygunluk değerlendirmesi yapılır. Bu değerlendirmenin sonucunda ise bölgenin yerleşime uygunluk durumu Uygun Alan, Önlemlili Alan, Ayrıntılı Jeoteknik Etüt Gerektiren Alanlar ya da Uygun Olmayan Alanlar

olarak ifade edilir (Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, 2008). Her bir bölge için elde edilecek Yerleşime Uygunluk Durumu ikinci girdi verisi olarak kullanılacaktır.

NY verisi için ise her bir bölgede yaşayan nüfusun bölgelerin toplam nüfusuna oranı modele üçüncü girdi verisi olarak tanımlanacaktır. Burada elde edilecek NY oranı 0 ile 1 arasında olacaktır. NY oranlarının 0-1 aralığında belirli değerler arasına yoğunlaşması durumunda çıktı verisini manipüle etmemesi için 0-1 sınırlarını aşmayacak şekilde ölçeklenmesi öngörülmektedir.

Önerilen sistem tasarımında, problemin modellenmesinin en uygun üçgensel üyelik fonksiyonu ile yapılabileceği öngörüldüğü için bu modelin kullanılması planlanmaktadır.

Kural Tablosu (Rule Table)

Modeli oluşturan verilerin üyelik fonksiyonları ve değerleri belirlendikten sonra sisteme etki eden parametreler arasında gerekli ilişkiler kurularak toplam 36 kural belirlenmiştir. Kural tanımlamalarında Mamdani kural tanımlama yöntemi esas alınmıştır. Örnek olarak bu kurallardan bazıları aşağıda verilmiştir;

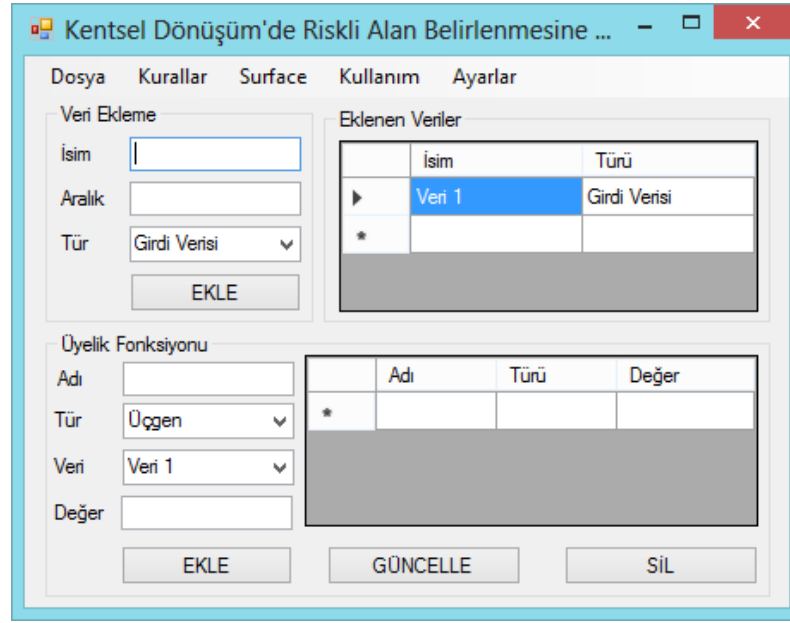
1. **Eğer YOPP Yüksek ve YUD UOA ve NY Çok ise RÖ Çok Yüksek**
2. **Eğer YOPP Düşük ve YUD UA ve NY Az ise RÖ Çok Düşük**
3. **Eğer YOPP Orta ve YUD ÖA ve NY Az ise RÖ Orta.**

Çıktı (Output)

Model için çıktı verisi RÖ ve 5 derece (Çok Düşük, Düşük, Orta, Yüksek, Çok Yüksek) tanımlanmıştır. Çıktı verisi olarak öncelikle bulanık çıktı şeklinde tanımlanan 5 dereceden birisi elde edilecektir. Bulanık mantığın son aşaması olan durulaştırma aşamasında bulanık çıktı sayısal değere dönüştürülerek durulaştırma işlemi gerçekleştirilecektir. Sistemin çalışması sonucunda her bölge için bir risk seviyesi belirlenecektir. Bu sonuca göre ise bölgeler arasında Risk Önceliği sıralaması yapılabilecektir.

Arayüz (Interface)

Bu çalışmada önerilen modelde kentsel dönüşümün güvenlik boyutu esas alınmış, girdi ve çıktı verileri buna göre belirlenmiştir. Ancak bulanık mantık ile kentsel dönüşümün sosyal boyutunu da ele alacak daha kompleks bir model de geliştirmek mümkündür. Önerilen model ve bundan hareketle türetilebilecek diğer kompleks modeller için hazır paket programları tercih etmek yerine en uygun programlama dilinde özel bir yazılım geliştirilmelidir. Bu sayede geliştirilen yazılım gelecekte ortaya çıkabilecek ihtiyaçlara göre esnetilebilir ve geliştirilebilir durumda olacaktır. Bu çalışmada önerilen model kapsamında C# platformunda özel bir yazılım kodlanmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. Önerilen model için geliştirilen yazılımın ekran görüntüsü.

Figure 4. System interface of the proposed model

Geliştirilen yazılım arayüzü Şekil 4'te gösterilmekte olup, kullanıcıya Veri Ekleme ve Üyelik Fonksiyonlarını belirleme seçeneklerini sunmaktadır. Veri ekleme bölümünde, kullanıcı veriyi girdi veya çıktı verisi olarak belirler ve verinin ismini ve üyelik fonksiyonundaki aralık değerlerini belirler. Veri ekleme bölümünde eklenen veriler, Eklenen Veriler başlıklı alanda görülebilmektedir. Üyelik fonksiyonu bölümünde kullanıcı kullanılacak üyelik fonksiyonu türünü seçer ve Veri Ekleme bölümünde eklenen veri ile ilişkilendirme işlemlerini yapar. Kullanıcının yaptığı tüm ekleme, güncelleme ve silme işlemleri arayüz ekranında görülebilmektedir. Geliştirilen arayüz ile kurallar tanımlanabilmekte ve Surface görüntüsü de alınabilmektedir.

SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION and SUGGESTIONS)

Olası afetlere karşı can ve mal güvenliğini sağlamak için yapılan riskli alan belirleme çalışmalarında en önemli noktalardan biri alanların risk seviyelerinin ve önceliklerinin sabit kriterlere göre ve homojen bir şekilde belirlenmesidir. Bu anlamda ilgili kanunlar incelendiğinde alanların risk seviyelerinin ve önceliklerinin belirlenmesinde sabit kriterlerin ve bunların riskliliğe olan etkilerinin değerlendirilmediği görülmektedir. Birden fazla kurumun yetkili olmasından dolayı alanların risk seviyelerinin ve önceliklerinin belirlenmesinde kurumlar için farklı kriterler farklı oranlarda önem taşımaktadır. Bu durumda ulusal bir standart sağlanamamaktadır. Nitekim Japonya Uluslararası İşbirliği Ajansı (JICA) tarafından hazırlanan Afet Önleme Azaltma Temel Planı Çalışma Anlaşması Raporu'na dayanan eleştiriler ve Danıştay tarafından verilen bazı riskli alanların iptal kararları da bu savı doğrulamaktadır (Karar No: 2013/5670; Karar No: 2016/973).

Bulanık mantık ile geliştirilecek bir Karar Destek Sistemi sayesinde sadece ihtiyaç olduğu düşünülen bölgeler için anlık risk belirleme çalışmaları değil aynı zamanda mevcut dönüşüm çalışmalarına eş zamanlı olarak diğer bölgeler için veri toplanarak risk değerlendirmesi ve analizi yapılabilir. Bununla birlikte il, ilçe, bölge ve ülke için bir "Risk Veritabanı" oluşturulabilir.

Bu çalışmada önerilen modelin gerçek veriler ile test edilmesi konusunda çalışmalar sürdürülmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışmanın oluşturulmasında legal koşullar çerçevesinde destek sağlayan İzmir Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü'nde Harita Mühendisi olarak görev yapan Sayın Gönül TOSUN'a teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanun, Kanun No: 6306, 31.05.2012 tarih ve 28309 sayılı Resmi Gazete.
- Araştırma Raporu Kentsel Dönüşüm Türkiye, 2014, Wakefield & Cushman Türkiye, http://www.cushmanwakefield.com/~media/marketbeat/2014/06/Turkey_Urban_Regeneration_2014_TR.pdf, ziyaret tarihi: 10 Nisan 2016.
- Aydın, F., 2013, *Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi "6306 Sayılı Yasa" İstanbul – Esenler Örneği*, Yüksek Lisans Tezi, Bahçeşehir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü, B.09.0.AİŞ.0.00.00.00/Kriz/10337 sayılı, Plana Esas Jeolojik, Jeolojik- Jeoteknik ve Mikrobölgeleme Etüt Genelgesi. ziyaret tarihi: 10 Nisan 2016
- Baykal N., Beyan T., 2004, *Bulanık Mantık Uzman Sistemler ve Denetleyiciler*, Bıçaklar Yayınevi, Türkiye, 509 s.
- Bektaş, Y., 2014, "Bir Planlama Stratejisi Olarak Yasanın Kentsel Mekamı Dönüştürmedeki Etkisi: Ankara Örneği", *Planlama*, Cilt. 24, No. 3, ss. 157-172.
- Belediye Kanunu, Kanun No: 5393,13.07.2005 tarih ve 25874 sayılı Resmi Gazete.
- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Altyapı ve Kentsel Dönüşüm Hizmetleri Genel Müdürlüğü 19.06.2012 tarih, B09.0.AHG.0.14.03.00-604/580 sayılı ve Riskli Alan ve Riskli Yapı Tespiti konulu yazı.
- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Web Sitesi, <http://www.csb.gov.tr>, ziyaret tarihi: 11 Nisan 2016
- Deprem Etkisi Altında Riskli Bina Tespit Yönetmeliği, Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanunun Uygulama Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik, izmimod.org.tr/docs5/28695.doc
- Dükkancı, U., 2013, *Türkiye'deki Kentsel Dönüşüm Sürecinin Gelişimi ve Günümüzdeki Yasal-Yönetmelik Boyutunun İrdelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Elmas, Ç., 2003, *Bulanık Mantık Denetleyiciler*, Seçkin Yayıncılık, Türkiye, ISBN 975-347-613-2.
- Ersoy, Ş., 2015, "2015'in İlk Çeyreğinde Doğa Afetlerine Küresel Bir Bakış Raporu", Yıldız Teknik Üniversitesi Doğa Bilimleri Araştırma Merkezi.
- Ertunç, M. H. http://mekatronik.kocaeli.edu.tr/dokuman/dersnotu/Bulan%C4%B1k_Mant%C4%B1k_Giri%C5%9F_2012-28-09-2012-11-54-43-3665800895.pdf ziyaret tarihi: 12 Nisan 2016
- Genç, F. N., 2008, "Türkiye'de Kentsel Dönüşüm: Mevzuat ve Uygulamaların Genel Görünümü" *Yönetim ve Ekonomi*, Cilt. 15, No. 1, ss. 115-130. http://www.beyoglu.bel.tr/download/kentsel_donusum_mud_yontmlik.pdf ziyaret tarihi: 10 Nisan 2016
- http://www.edirne.bel.tr/images/cal%C4%B1sma_yonetmelik/KENTSEL%20TASARIM%20MÜDÜRLÜĞÜ.pdf ziyaret tarihi: 10 Nisan 2016
- <http://www.ibb.gov.tr/tr-TR/SubSites/DepremSite/PublishingImages/JICA-TUR.pdf>, ziyaret tarihi: 10 Nisan 2016.
- İbrahim A. M., 2006, *Gömülü Sistemlerle Bulanık Mantık*, Bileşim, Türkiye.
- Kaynak, O., Armağan, G., 1993, "Bulanık Denetim ve Endüstriyel Uygulamaları", *Tübitak Marmara Araştırma Merkezi*, 29 Ocak 1993.

- Kentsel Dönüşüm Haberi 1, <http://www.hurriyet.com.tr/donusumde-adres-sasti-28355148>, ziyaret tarihi: 12 Nisan 2016.
- Kentsel Dönüşüm Haberi 2., <http://www.radikal.com.tr/cevre/cevre-bakanligi-istanbulun-risk-haritasinda-tahrifat-mi-yapti-1305687>, ziyaret tarihi: 12 Nisan 2016.
- Köktürk, E., Köktürk, E., 2007, "Deprem ve Kentsel Dönüşüm İlişkileri", *HKM Jeodezi-Jeoinformasyon, Arazi Yönetimi Dergisi*, TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası Yayın Organı, Cilt. 97, ss. 57-64.
- Köktürk, E., Köktürk, E., 2007, "Türkiye'de Kentsel Dönüşüm ve Almanya Deneyimi", *Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*, TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, Ankara. 2-5 Nisan 2007.
- Kömür, M., Altan, M., 2005, "Deprem Hasarı Gören Binaların Tespitinde Bulanık Mantık Yaklaşımı", *İTÜ Dergisi / D*, Cilt. 4, No. 2, ss. 43-52.
- Küçüköncü, T., Bulanık Mantık, <http://80.251.40.59/science.ankara.edu.tr/ozbek/bulanik-1.htm>, ziyaret tarihi: 10 Nisan 2016 adresinden erişildi.
- Mahkeme Kararı. T.C. Danıştay 14. Daire, Esas No: 2013/1493, Karar No: 2013/5670.
- Mahkeme Kararı. T.C. Danıştay 14. Daire, Esas No: 2014/111496, Karar No: 2016/973.
- Öcal, C., İnce, H. H., 2012, "Türkiye'de Mevcut Yapı Stoğu ve Kentsel Dönüşüm", *SDU International Technologic Science*, Cilt. 4, No.2, ss. 89-95.
- Özdağoğlu A., 2016, *Bulanık İşlemler Durulaştırma ve Sözel Eşikler*, Detay Yayıncılık, Türkiye, 152s.
- Riskli İlan Edilen Alanlar, <http://www.bahtiyarcetinbas.com/riskli-alan-kararlari/148-iller-riskli-alan-haritalari.html> ziyaret tarihi: 10 Nisan 2016.
- Riskli Yapıların Tespit Edilmesine İlişkin Esaslar, <http://www.csb.gov.tr/db/altyapi/editordosya/ek%202.pdf>, ziyaret tarihi: 12 Nisan 2016.
- Sinecen, M., 2002, *Klima Sistem Kontrolünün Bulanık Mantık İle Modellenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- Tiryaki, A. E., Kazan, R., 2007, "Bulaşık Makinesinin Bulanık Mantık ile Modellenmesi", *Mühendis ve Makina*, Cilt. 48, (565), ss. 3-8.
- Türkiye Cumhuriyeti İstanbul İli Sismik Mikro-Bölgeleme Dahil Afet Önleme/Azaltma Temel Planı Çalışması Raporu. Japon Uluslar arası İşbirliği Ajansı, 2002,
- Türkiye İstatistik Kurumu Web sitesi, www.tuik.gov.tr ziyaret tarihi: 13 Nisan 2016.
- Türkşen İ. B., 2015, *Dereceli Bulanık Sistem Modelleri*, Abaküs Yayıncılık, Türkiye.
- Uğur, L. O., Aliefendioğlu, Y., Saka, M., 2016, "Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanun'a Göre Riskli Yapı Tespitinde Kaşılışılın Uygulama Problemlerinin Vaka Tabanlı İncelenmesi: Tekirdağ İli Örneği", *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, Cilt. 4, ss. 354-375.
- www.bayrampasa.bel.tr/download/gcalisma/kentseltasarim.doc ziyaret tarihi: 13 Nisan 2016.
- www.meram.bel.tr/.../kentsel_donusum/KENTSEL_DÖNÜŞÜM_MÜD22012016.pdf ziyaret tarihi: 13 Nisan 2016.
- Zadeh, A. L., 1965, "Fuzzy Sets", *Information & Control*, Cilt. 8, ss. 185-195.



A MONOGENIC LOCAL GABOR BINARY PATTERN FOR FACIAL EXPRESSION RECOGNITION

¹Alaa ELEYAN, ²Abubakar M. ASHIR

¹*Avrasya University, Electrical & Electronics Engineering Department, Trabzon, TURKEY*

²*Selçuk University, Electrical & Electronics Engineering Department, Konya, TURKEY*

¹aeleyan@avrasya.edu.tr, ²ashir4real@yahoo.com

(Geliş/Received: 10.01.2017; Kabul/Accepted in Revised Form: 19.04.2017)

ABSTRACT: The paper implements a monogenic-Local Binary Pattern (mono-LBP) algorithm on Local Gabor Pattern (LGP). The proposed approach initially features from the samples using LGP at different scales and orientation. The extracted LGP features are further enhanced by decomposing it into three monogenic LBP channels before being recombined to generate the final feature vector. Different Normalization schemes are applied to the final feature vector. Two best performing normalization algorithms with mono-LBP are fused at score level to obtain an improved performance using K-Nearest Neighbor classifier with L_1 -norm as a distance metrics. Moreover, performance comparison is done with other variants of LGP algorithm and also the effects of various normalization techniques are investigated. Experimental results from JAFFE and TFEID facial expression databases show that the new technique has improved performance compared to its counterparts.

Key Words: *Facial expression recognition, Local gabor patterns, Monogenic local binary patterns.*

Yüz İfade Tanınması İçin Bir Monojenik Yerel Gabor İkili Desen

ÖZ: Bu makale, yerel Gabor Desen (LGP) üzerinde monojenik-Yerel İkili Desen (mono-LBP) algoritmasını uygular. Önerilen algoritma Gabor çekirdeğinin farklı ölçeklerinde ve farklı normalizasyon şemaları ile uygulanır. Mono-LBP ile en iyi performans gösteren normalleştirme algoritmalarından elde edilen sonuçlar, geliştirilmiş bir performans elde etmek için skor düzeyinde birleştirilmiştir. Üstelik, performans karşılaştırması diğer LGP algoritmasının türevleri ile yapılmıştır ve ayrıca çeşitli normalleştirme tekniklerinin etkileri araştırılmaktadır. JAFFE yüz ifadesi veritabanında yapılan deneysel sonuçlarına göre, önerilen yaklaşım bir sınıflandırıcı olarak mesafe metriğini kullanarak mevcut algoritmalara kıyasla en iyi ortalama performansa sahip olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: *Yüz ifade tanıma, Yerel gabor desen, Monojenik yerel ikili desen.*

INTRODUCTION

Facial Expression Recognition (FER) has recently been one of leading field drawing a lot of interests and attentions of the researchers in the field of computer vision and pattern recognition. This may not be unconnected to the need for human-machine interaction (HMI), surveillance systems, robotics applications and many others (Chao *et al.*, 2015). Quiet a handful number of feature extraction and classifier algorithms have been proposed and implemented in this field (FER). Gabor kernel has been one of the most robust feature extraction algorithm and widely exploited in FER and face recognition due to its ability to approximate receptive fields of simple cells in the primary visual cortex of human eyes, multi-resolution approach and direction selectivity (Chao *et al.*, 2015).

Following successful implementation of Gabor kernels in iris recognition by 2001 (Doughman, 2001) and coupled with the success of local binary pattern (LBP) algorithm, several variants of Gabor algorithms emerged over times. These Gabor variants are sometimes referred to as Local Gabor Patterns (LGP). LGP algorithms exploit various Gabor feature channels such as magnitude, phase, imaginary and real channels. For instance, (Yanxia and Bo, 2010) proposed Local Gabor Binary Patterns (LGBP) which encodes Gabor magnitude with LBP operator at different resolution and orientations to form the feature vector. The proposed LGBP was reported to have improved performance for face recognition. In (Zhang *et al.*, 2010), the authors proposed Local Gabor Phase pattern (LGPP) variants and applied it for face recognition. LGPP essentially encodes both real and imaginary parts of the Gabor features using Douglas method and then the result is further encoded using what is called Local XOR Pattern (LXP). In search for robustness and improved performance, other LGP were proposed such as Histogram of Gabor Phase Pattern (HGPP), Local Gabor Phase Difference Pattern (LGPDP) and a host of others which are quite relevant to specific problems. In general, these LGP algorithms come with additional cost of computation, extensive memory usage and in most cases, feature vector dimensionality reduction becomes necessary.

A rotation invariant monogenic LBP which was proposed for texture classification in (Zhang *et al.*, 2010) is used in this work. Instead of encoding the Gabor magnitude channels with LBP as is the case in (LGBP), we encoded these channels with monogenic LBP which, within the context of this work, is referred to mono-LGBP. Furthermore, the results are computed at different resolution (scales) of the Gabor kernel under different normalization algorithms. At each scale, results of the proposed method with the best two performing normalization technique are fused at the score level to obtain the overall performance of the method.

The paper is divided into five sections. Section I covers the introduction while section II briefly discusses Gabor kernel, LBP and M-LBP and normalization schemes. Section III describes the proposed approach and section IV presents the experimental results. Section V summarizes the findings.

FEATURE EXTRACTION AND NORMALIZATION SCHEMES

A brief literature background on the feature extraction operators and normalization schemes deployed in the course of this work are discussed below.

Gabor Wavelet Transform

Gabor filter is basically a modulation of a Gaussian function with a sinusoidal plane wave. Therefore the result of convolution of Gabor kernel, $\psi_{\theta,v}(z)$ with an image, $I(z)$ is represented as $G_{\theta,v}(z)$ in Eqn. 1.

$$G_{\theta,v}(z) = I(z) * \psi_{\theta,v}(z), \quad (1)$$

Here, $z = (x, y)$ which is the 2D pixel's index along x and y plane and operator $'*'$ is the 2D convolution operator. θ and v are the orientation and the scales of the kernel, respectively. The kernel is defined as:

$$\psi_{\theta,v}(z) = \frac{\|k_{\theta,v}\|}{\sigma^2} e^{\left(-\frac{\|k_{\theta,v}\|^2 \|z\|^2}{2\sigma^2}\right)} \left[e^{-ik_{\theta,v}z} - e^{-\sigma^2/2} \right] \quad (2)$$

where $\|\cdot\|$ is the norm operator and σ is the standard deviation of the distribution. The vector $k_{\theta,v}$ is defined as:

$$k_{\theta,v} = k_v e^{-i\phi_\theta} \quad (3)$$

where $k_v = k_{max}/f^v$ and $\phi_\theta = \pi\theta/8$; k_{max} is the maximum frequency, ϕ_θ is the kernel's orientation and f is the spacing between the kernels in the frequency domain (Eleyan *et al.*, 2008; Liu and Wechsler, 2003; Lyon *et al.*, 1998; Cootes *et al.*, 1995).

Local Binary Pattern

Due to its relative simplicity, LBP has been applied successfully in many applications. The algorithm uses 3×3 windows of neighborhood pixels in the image to determine the new value of a pixel being considered (Ahonen *et al.*, 2006; Ojala *et al.*, 2010, Tran *et al.*, 2014). Consider Figure 1, initially, the algorithms probes the 8-neighborhood pixels around pixel z . Any pixel greater than z is assigned a binary bit value 1 otherwise, assigned bit value 0. An 8-bit code is generated and is converted to decimal and recorded as the new value for z . The operation is applied to all the pixels in the image.

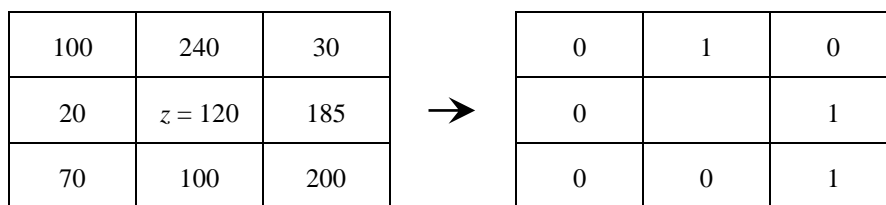


Figure 1. LBP operator

The LBP code for pixel z can be computed by arranging the results of the operation starting from top-left corner clockwise is '01011000' which is equivalent to 152 in decimal.

Local Binary XOR Operator

LXP is very similar to LBP except that it applies XOR to 3×3 pixels neighborhood to decide the new value of a pixel. Due to the fact that it applies XOR operator the pixels values must be converted to zeros and ones before being applied (Zhang *et al.*, 2007). For instance results from an image convolved with Gabor kernel may be formatted to logical by deciding that any value greater than zero is assigned a logical zeros while those with zeros and below are assigned logical ones. Figure 2 shows how LXP is applied to the logically formatted image. For the new value of z is to be determined, all the 8-neighborhood pixels are XOR-ed with z and the resulting 8 bit codes are converted to decimal.

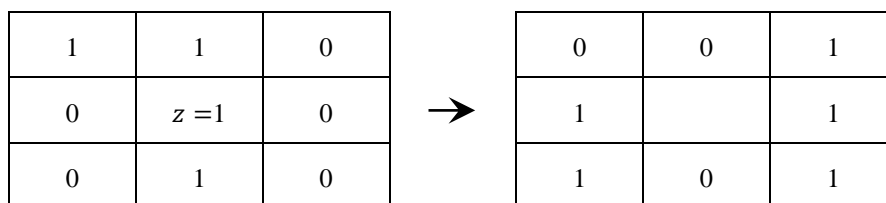


Figure 2. LXP operator

For instance, in the figure above the new LXP code for pixel z starting from top-left corner clockwise is '00111011' which is equivalent to 115 in decimal.

Monogenic Local Binary Pattern

The motivation for this algorithm comes from the monogenic signal theory. It combines the local phase information, the local surface type information, and the traditional LBP to improve the performance of LBP in texture classification (Zhang *et al.*, 2010). Based on this theory, three features are combined together to form monogenic 3-D texton feature vector to determine monogenic LBP. These features are; phase, φ_c , rotation invariant uniform pattern LBP, LBPriu2 and the monogenic curvature tensor S_c based on higher order Riesz transforms. Eqn. 4-6 describe these features. For more details refer to (Zhang *et al.*, 2010).

$$LBP_{P,R}^{riu2} = \begin{cases} \sum_{p=0}^P s(g_p - f_c) & \text{if } U(LBP_{p,r}) \leq 2, \\ P + 1, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

where;

$$U(LBP_{p,r}) = |s(g_{p-1} - g_c) - s(g_0 - g_c)| + \sum_{p=1}^{P-1} |s(g_p - g_c) - s(g_{p-1} - g_c)| \quad (5)$$

Superscript “riu2” means the use of rotation invariant “uniform” patterns that have U value of at most 2; s is the sign function; g_c corresponds to the gray value of the center pixel of the local neighborhood and g_p ($p = 0, \dots, P - 1$) correspond to the gray values of P equally spaced pixels on a circle of radius R .

Phase φ_c , is defined as ;

$$\varphi_c = \varphi / (\pi/M) \quad (6)$$

where $M = 5$.

The last parameter S_c is defined by:

$$S_c = \begin{cases} 0, & \det(T_e) \leq 0 \\ 1, & \text{else} \end{cases} \quad (7)$$

where $\det(T_e)$ is the determinant of the monogenic curvature tensor.

Normalization Operators

Normalization techniques are quite often being used without much regards to the effect they can have on the general statistical distribution of the vectors to be normalized (Ribaric and Fratric, 2006; Nandakumar *et al.*, 2005). For instance, in fusion of the score levels of various classifiers, a normalization scheme can be deployed to bring the scores within the same range. But in a vector sense, the normalization algorithm is more of a vector transform from one vector space to another. Hence the choice for a compatible normalizer becomes important as this may distort the vectors there by improving or decreasing the class separability between two distinct class vectors. Due to this fact, we investigated some of the most common normalization techniques to show how they affect class vectors distribution. Four normalization techniques are examined in this paper.

Z-Score Normalization

It is one of the most common normalization schemes. It uses the arithmetic mean and standard deviation of the vector. Z-score has a record of good performance on a set of data with Gaussian distribution. However, it is not robust due to the fact that it depends on the mean and standard deviation of the data which are both sensitive to outliers (Ribaric and Fratric, 2006). For a data point S_k , Z-score computes the new normalized value S'_k , using Eqn. 8.

$$S'_k = \frac{S_k - \mu}{\sigma} \quad , \quad (8)$$

where μ and σ are the mean and standard deviation of the distribution respectively.

Min-Max Normalization

Is one of the simplest of all the normalization techniques. This operator shifts the data sets within an interval $[0, 1]$. It can easily be seen that this technique is also not robust because presence of outliers in the distribution may affect the contribution of the majority datasets. Eqn. 9 defines min-max operator.

$$S'_k = \frac{S_k - \min}{\max - \min} \quad (9)$$

where \max is the maximum data value of the distribution, and \min is the minimum data value of the distribution.

Median-MAD Normalization

The median and median absolute deviated as abbreviated (Median-MAD), are less sensitive to outliers and points at the extreme ends of the distribution. Therefore, this technique is robust. However, for distributions other than Gaussian, median and MAD are poor estimates of the location and the scales parameters (Ribaric and Fratric, 2006; Sigdel *et al.*, 2014, Nandakumar *et al.*, 2005). Therefore, the scheme does not preserve the original distribution and does not transform the datasets into a common numerical range (Ribaric and Fratric, 2006). The equation below defines the median-MAD operation.

$$S'_k = \frac{S_k - \text{median}}{\text{MAD}} \quad , \quad (10)$$

where median is the median of the distribution and MAD is the median of the absolute deviation from the median defined as $\text{MAD} = \text{median}(|S_k - \text{median}|)$.

Tangent-hyperbolic (Tanh) Normalization

Tanh normalization has been successfully used in many normalization schemes (Nandakumar *et al.*, 2005). The tanh estimator is robust and very efficient. It is defined as;

$$S'_k = \frac{1}{2} \left\{ \tanh \left(0.01 \left(\frac{S_k - \mu_{GH}}{\sigma_{GH}} \right) \right) + 1 \right\} \quad , \quad (11)$$

where μ_{GH} and σ_{GH} are the mean and standard deviation estimates, respectively.

Quite a number of normalization schemes do exist, for example Decimal Scaling normalization which is useful for data in logarithmic scales and Euclidean normalization. The ability of particular normalization algorithm to capture statistical distribution of a dataset will make it worthwhile.

PROPOSED APPROACH

The proposed approach has both encompasses the critical stages of a facial expression algorithms. Initially During feature extraction, the proposed approach extract Gabor features from each sample using different orientation (i.e. $\theta = 8$) and scale (1 to 3) of the Gabor filter. For each Local Gabor features extracted at a specified orientation and scale, monogenic LBP is further applied to the extracted Gabor Features using equations (4, 6 and 7). The three monogenic LBP features ($LBP_{P,R}^{riu2}$, φ_c , and S_c) are combined together to form a single monogenic 3-D texton feature vector. The monogenic 3-D texton feature vector is adopted as the final feature vector known as the mono-LGBP algorithm in the context of this work.

Moreover, as a way of exploiting performance, a normalization scheme is applied at the feature level of the proposed approach. Hence different normalization approaches are applied to the mono-LGBP feature vector before classification. Four different normalization techniques are investigated as explained in chapter 3.

In the classification stage, KNN has being used with l_2 -norm as the distance measure. Each Euclidean representation of mono-LGBP feature with different normalization algorithm is classified separately using KNN. Based on the performance of the normalization representation of the mono-LGBP feature, two of the best normalization schemes are fused at score level of the classifier using a simple *sum rule* to obtain a better performance. Figure depicts the flowchart of the proposed approach.

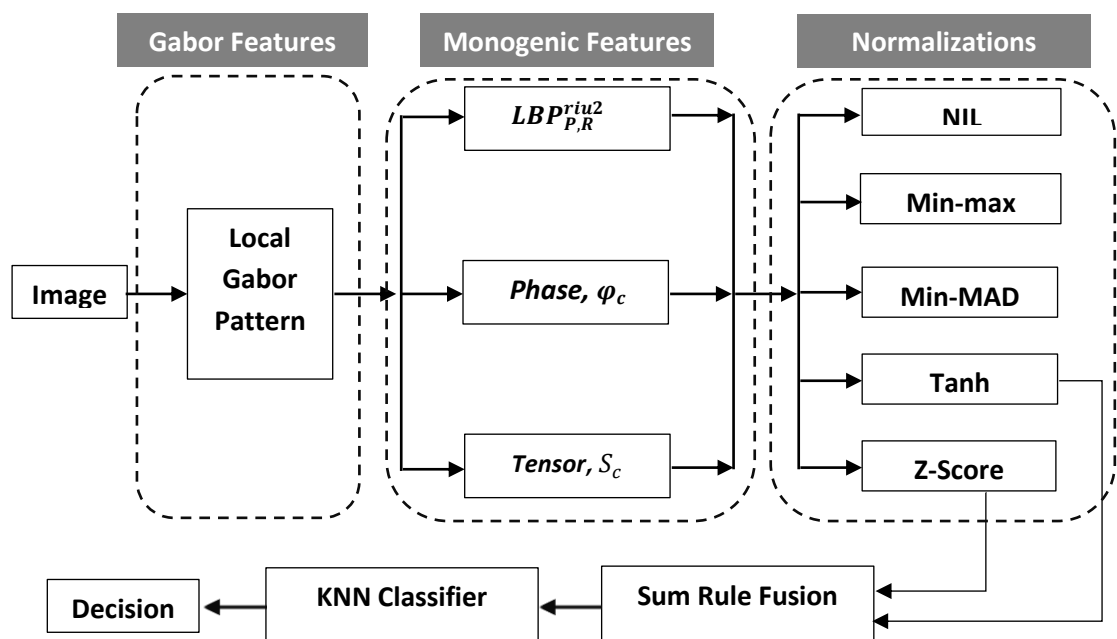


Figure 3. Proposed approach Flowchart

EXPERIMENTAL RESULTS

The proposed algorithm is implemented using two different facial expression databases which include Japanese Female Facial Expression JAFFE (Lyon *et. al* 1998) and Taiwanese Facial Expression Image Database TFEID (Chen and Yen, 2007). JAFFE database contains a total of 213 samples images of seven basic facial expressions (i.e. Neutral, Happy, Sad, Surprise, Anger Disgust and Fear) collected from 10 different subjects. The number of samples per expression in each subject ranges from 2 to 4. While the current public TFEID database consist of facial images from 20 male models each acquired

with a frontal view between 0° to 45° . It constitutes 8 expressions with *contempt* as the eighth expression in addition to the seven basic expressions found in JAFFE.

During training all the sample images were grouped into emotions classes (i.e. 7 for JAFFE and 8 for TFEID) irrespective of subjects to which they belong to (i.e. person-independent). Using Leave-One-Pose-Out (LOPO) procedures, one sample is drawn from each class for training while the remaining samples are used for training. This process is repeated and rotated until each sample is uniquely use as a training set. The overall performance is given as the average performance of the entire number of times the training is repeated.

Table 1 to 6 display the experimental results from the proposed approach in comparison to its counterparts. Results from different normalizations schemes and three other variants of LGP algorithms (Gabor-magnitude features, LGBP and LGPP) were implemented to compare the results with the proposed approach for the two database used. The same experimental procedures were adopted in throughout the experiments. Similarly, results from the fusion of the proposed mono-LGBP were also included to show the leverages of the fusion techniques over the non-fusion approach. Figure 4 shows training samples from JAFFE database of four different subjects with 7 basic facial expressions (e.g. Neutral, Happy, Sad, Surprise, Anger, Disgust and Fear) from left to right, respectively.

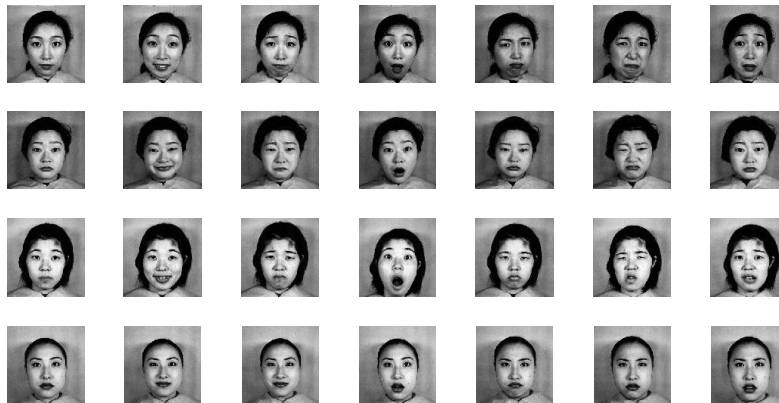


Figure 4. Examples of images from the JAFFE Database

Results Discussion

It is worth noting that the proposed mono-LGBP algorithm performance increases with the increase of Gabor scales (see Tables 1-6). The fused results from Z-score and Tanh normalization algorithms gives a better performance. This is because in mono-LGBP, each of the two normalization schemes has been able to uniquely recognize some poses which are not being recognize by the other. Hence, the fusion of these results will lead to improving performance. The same cannot be said for the other LGP. For example, Gabor-magnitude (Gabor-mag) has the best result with all the Z-score, Tanh and min-max normalizations but unfortunately, they all pointed at the same recognition classes. Therefore fusing their results does not improve the performance. The same for LGPP and LGBP.

Table 1. Experimental Results at one scale ($\theta = 8$, $v = 1$) using JAFFE Database.

Feature Extractors	non	Z-score	min-max	M-MAD	tanh
LGP-Magnitude	88.6	90.0	88.6	90.0	90.0
LGPP	67.1	68.6	67.1	67.1	70.0
LGBP	34.3	40.0	34.3	40.0	50.0
mono-LGBP	64.3	64.3	57.1	57.1	67.1
Fused mono-LGBP	Z-Score+tanh = 77.14				

Table 2. Experimental Results at two scales ($\theta = 8$, $v = 2$) using JAFFE Database.

Feature Extractors	non	Z-score	min-max	M-MAD	tanh
LGP-Magnitude	90	91.4	91.4	90.0	91.4
LGPP	77.1	78.6	77.1	77.1	78.6
LGBP	50.0	50.0	40.0	50.0	77.1
mono-LGBP	80.0	80.0	74.3	71.4	80.0
Fused mono-LGBP	Z-Score+tanh = 84.29				

Table 3. Experimental Results at three scales ($\theta = 8$, $v = 3$) using JAFFE Database.

Feature Extractors	non	Z-score	min-max	M-MAD	tanh
LGP-Magnitude	90	91.4	91.4	90	91.4
LGPP	77.1	82.1	80.1	77.1	85.7
LGBP	71.4	71.4	60.0	71.4	80.1
mono-LGBP	87.1	91.4	82.9	90	91.4
Fused mono-LGBP	Z-Score+tanh = 92.83				

Table 4. Experimental Results at one scale ($\theta = 8$, $v = 1$) using TFEID Database.

Feature Extractors	non	Z-score	min-max	M-MAD	tanh
LGP-Magnitude	87.6	92.1	90.4	93.0	93.3
LGPP	70.1	73.6	69.1	70.1	75.5
LGBP	50.3	59.0	49.3	52.0	65.0
mono-LGBP	64.3	68.3	59.6	60.8	73.4
Fused mono-LGBP	Z-Score+tanh = 82.15				

Table 5. Experimental Results at two scales ($\theta = 8$, $v = 2$) using TFEID Database.

Feature Extractors	non	Z-score	min-max	M-MAD	tanh
LGP-Magnitude	90.6	94.4	92.6	91.0	94.4
LGPP	80.3	84.6	80.9	81.1	83.9
LGBP	60.0	60.9	50.2	60.4	87.1
mono-LGBP	90.0	92.0	82.3	90.4	96.0
Fused mono-LGBP	Z-Score+tanh = 96.29				

Table 6. Experimental Results at three scales ($\theta = 8$, $v = 3$) using TFEID Database.

Feature Extractors	non	Z-score	min-max	M-MAD	tanh
LGP-Magnitude	89.2	90.5	91.4	93.3	92.4
LGPP	77.1	82.1	80.1	77.1	85.7
LGBP	71.4	71.4	60.0	71.4	80.1
mono-LGBP	91.1	96.4	92.9	94.5	97.4
Fused mono-LGBP	Z-Score+tanh = 97.9				

CONCLUSION

A new approach for facial expression recognition was proposed and implemented. The performance of the proposed approach was compared with the existing LGP algorithms using different normalization schemes. The new approach was able to achieve better performance approximately 92.8% with JAFFE

database and 97.9% with TFEID database. The results are comparable to the best-known results of facial expression recognition on JAFFE database and TFEID in the literature using KNN as a classifier. The normalization schemes further indicate that a great deal of performance can be realized with a proper application of normalization algorithm to extracted feature vectors. The results also confirmed the effectiveness of the fusion technique deployed in the proposed approach.

REFERENCES

- Ahonen T., Hadid A., Pietikainen M., 2006, "Face Description with Local Binary Patterns: Application to Face Recognition", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 28(12), pp. 2037-2041.
- Chao, W. L., Ding, J. J., Liu, J. Z., 2015, "Facial Expression Recognition based on Improved Local Binary Pattern and Class-regularized Locality Preserving Projection", *Signal Processing*, Vol. 117, pp. 1-10.
- Chen, L. F., Yen, Y. S., 2007, "Taiwanese Facial Expression Image Database", *Brain Mapping Laboratory, Institute of Brain Science, National Yang-Ming University, Taipei, Taiwan*.
- Cootes, T. F., Taylor, C. J., Cooper, D. H., Graham, J., 1995, "Active Shape Models, Their Training and Application," *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 61(1), pp. 38-59.
- Doughman, J., 2001, "High Confidence Recognition of Persons by Iris Patterns", *IEEE International Carnahan Conference on Security Technology*, London, England, pp. 254-263, 16-19 October 2001.
- Eleyan, A., Demirel, H., Özkaramanli, H., 2008, "Complex Wavelet Transform-Based Face Recognition", *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, Vol. 2008, pp. 1-13.
- Liu, C., Wechsler, H., 2003, "Independent Component Analysis of Gabor Features for Face Recognition", *IEEE Transactions on Neural Networks*, Vol. 14(4), pp. 919-928.
- Lyons, M., Akamatsu, S., Kamachi, M. and Gyoba, J., 1998, "Coding Facial Expressions with Gabor Wavelets", *3rd IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition (AFGR)*, Nara, Japan, pp. 200-205, 14-16 April 1998.
- Nandakumar, K., Jain, A., Ross, A., 2005, "Score Normalization in Multimodal Biometric Systems", *The Journal of Pattern Recognition Society*, Elsevier, Vol. 38, pp. 2270-2285.
- Ojala, T., Pietikainen, M., Maenpaa, T., 2010, "Multi-resolution Gray Scale and Rotation Invariant Texture Analysis with Local Binary Patterns", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 24(7), pp. 971-987.
- Ribaric S., Fratric I., 2006, "Experimental Evaluation of Matching-Score Normalization Techniques on Different Multimodal Biometric Systems", *IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, MELECON*, Malaga, Spain, pp. 498-501, 16-19 May 2006.
- Sigdel, M., Dinc, S., Sigdel, M. S., Pusey, M. L., Aygun, R. S., 2014, "Evaluation of Normalization and PCA on the Performance of Classifiers for Protein Crystallization Images" *IEEE Conference on SOUTHEASTCON*, Lexington, KY, USA, pp. 1-6, 13-16 March 2014.
- Tran C. K., Lee T. F., Chang L., Chao P. J., 2014, "Face Description with Local Binary Patterns and Local Ternary Patterns: Improving Face Recognition Performance Using Similarity Feature-Based Selection and Classification Algorithm", *International Symposium on Computer, Consumer and Control*, Taichung, Taiwan, pp. 520-524. 10-12 June 2014.
- Yanxia, J. Bo, R., 2010, "Face Recognition using Local Gabor Phase Characteristics", *IEEE International Conference on Intelligence and Software Engineering*, Wuhan, China, pp. 1-4, 10-12 December 2010.
- Zhang, B., Shan, S., Chen, X., Gao, W., 2007, "Histogram of Gabor Phase Patterns (HGPP): A Novel Object Representation Approach for Face Recognition", *IEEE Transaction on Image Processing*, Vol. 16(1), pp. 57-68.
- Zhang L., Zhang L., Guo Z., Zhang D., 2010, "Monogenic-LBP: A New Approach for Rotation Invariant Texture Classification", *17th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, Hong Kong, China, pp. 2677 - 2680, 26-29 September 2010.

ERİMİŞ TUZ İÇİNDE ELEKTROKİMYASAL İNDİRGENME YÖNTEMİYLE SİLİSYUM ÜRETİMİ

¹Metehan ERDOĞAN, ²Emre ERGÜL, ³İshak KARAKAYA

¹Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Malzeme Mühendisliği, Ankara, Türkiye

²Aselsan, Ankara, Türkiye

³Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Ankara, Türkiye

¹metehanerdogan@ybu.edu.tr, ²ergulemre@gmail.com.tr, ³kkaya@metu.edu.tr

(Geliş/Received: 06.02.2017; Kabul/Accepted in Revised Form: 19.06.2017)

ÖZ: Gözenekli silisyum dioksit peletlerinin 2,8 V potansiyel farkı uygulanarak CaCl₂ tuzu ve CaCl₂-NaCl tuz çözeltisi içerisinde elektrodeoksidasyon yöntemiyle indirgenmesi incelenmiştir. Çalışma, katotta kullanılan iletken malzemelerin, sıcaklığın ve tane boyutunun indirgenmeye olan etkilerinin araştırılmasını içermektedir. Başlangıçta kullanılan malzemelerin ve elektroliz sonucunda elde edilen ürünlerin yapısı ve morfolojisi X-ışınları kırınımı analizi ve taramalı elektron mikroskopu ile belirlenmiştir. Nikel ve paslanmaz çelik katotta iletken malzemeler olarak kullanılmış ve katotta oluşan silisyumun katot iletken malzemesi olarak kullanılan metallerle reaksiyona girdiği görülmüştür. X-ışınları kırınımı analizi ile silisyumun, katot iletken malzemesi olarak kullanılan nikelle nikel-silis bileşikleri oluşturduğu, paslanmaz çelik içindeki demirle de demir-silis bileşikleri oluşturduğu belirlenmiştir. Oluşan nikel-silis bileşiklerinin, miktar olarak, demir-silis bileşiklerinden daha fazla olduğu görülmüştür. Sonuçlar, akım zaman grafikleri, kompozisyonlar ve mikroyapılar incelenerek yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Elektrodeoksidasyon, Elektrokimyasal İndirgeme, Silisyum, Silisyum Dioksit

Production of Silicon by the Electrochemical Reduction Technique in Molten Salt

ABSTRACT: Electrodeoxidation of porous SiO₂ pellets in molten CaCl₂ salt and CaCl₂-NaCl salt mixture was investigated by applying 2.8 V potential. Aim of the study was to investigate the effects of cathode contacting materials, temperature and particle size. The structure and morphology of starting materials and electrolysis products were determined by X-ray diffraction analysis and scanning electron microscopy. Nickel and stainless steel cathode contacting materials were used to see the extent of reactions between silicon produced at the cathode and the contacting materials. X-ray diffraction patterns showed that silicon produced at the cathode reacted with nickel, and iron in stainless steel to form Ni-Si and Fe-Si compounds respectively. It was also observed that the amount of Ni-Si compounds formed at the nickel cathode was more than the amount of Fe-Si compounds formed at the stainless steel cathode. The results were interpreted from variation of current versus time graphs under different conditions, microstructures and composition of the reduced pellets.

Key Words; Electrochemical Reduction, Electrodeoxidation, Silicon, Silicon Dioxide

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektronik endüstrisinde önemli bir yere sahip olan silisyum, güneş pili yapımında da yaygın olarak kullanılmaktadır. Gerek elektronik endüstrisinde, gerekse güneş pillerinde kullanılan silisyum yarı iletkeninin saflık derecesi çok önemlidir. Metalurjik işlemler sonucunda üretilmiş silisyumun saflığı %

98 civarındadır ve metalurjik kalitede silisyum olarak adlandırılır. Bu kalitedeki silisyum, çeşitli saflaştırma işlemlerinden geçtikten sonra güneş pillerinde kullanılabilir hale gelir. Saflaştırma işlemleri için öncelikle, metalurjik kalitedeki silisyum SiHCl_3 , SiCl_4 , SiH_4 gibi bileşiklere dönüştürülür ve daha sonra bu bileşiklerden yüksek saflıktaki silisyum elde edilir (Zulehner, 1993). Yapılan yüksek maliyetli işlemler nedeniyle güneş pillerinde kullanılan yüksek saflıktaki silisyum pahalıdır. Yüksek saflıktaki silisyumun üretim maliyetini düşürmek için yeni üretim metotları geliştirmek üzere çalışmalar yapılmaktadır. Yapılan çalışmalar genellikle, silisyum bileşiklerinin erimiş tuz elektrolizi yöntemiyle (Olson ve Carleton, 1981; Rao ve diğ., 1981; Carleton ve diğ., 1983; Sharma ve Mukherjee, 1986; Elwell ve Rao, 1988) veya elektrodeoksidasyon yöntemiyle (Nohira ve diğ., 2003; Jin ve diğ., 2004; Yasuda ve diğ., 2005; Pistorius ve Fray, 2006; Xiaou ve diğ., 2006; Yasuda ve diğ., 2007), elektrokimyasal olarak indirgenmesi üzerine yoğunlaşmıştır.

FFC (Fray-Farthing-Chen) metodu (Chen ve diğ., 2000) olarak da bilinen elektrodeoksidasyon yöntemi, silisyum dioksit plakanın silisyuma indirgenmesine yönelik olarak ilk defa Nohira ve arkadaşları tarafından 2003 yılında uygulanmış ve başarı sağlanmıştır (Nohira ve diğ., 2003). Daha sonra, Jin ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada gözenekli silisyum dioksit peletleri başarıyla silisyuma indirgenmiştir (Jin ve diğ., 2004). Bu çalışmaların ışığında silisyum dioksitin elektrodeoksidasyon yöntemiyle silisyuma indirgenmesine yönelik birçok çalışma yapılmıştır (Yasuda ve diğ., 2005; Pistorius ve Fray, 2006; Xiaou ve diğ., 2006; Yasuda ve diğ., 2007). Katotta gerçekleşen silisyum dioksitin indirgenme reaksiyonu şu şekildedir:



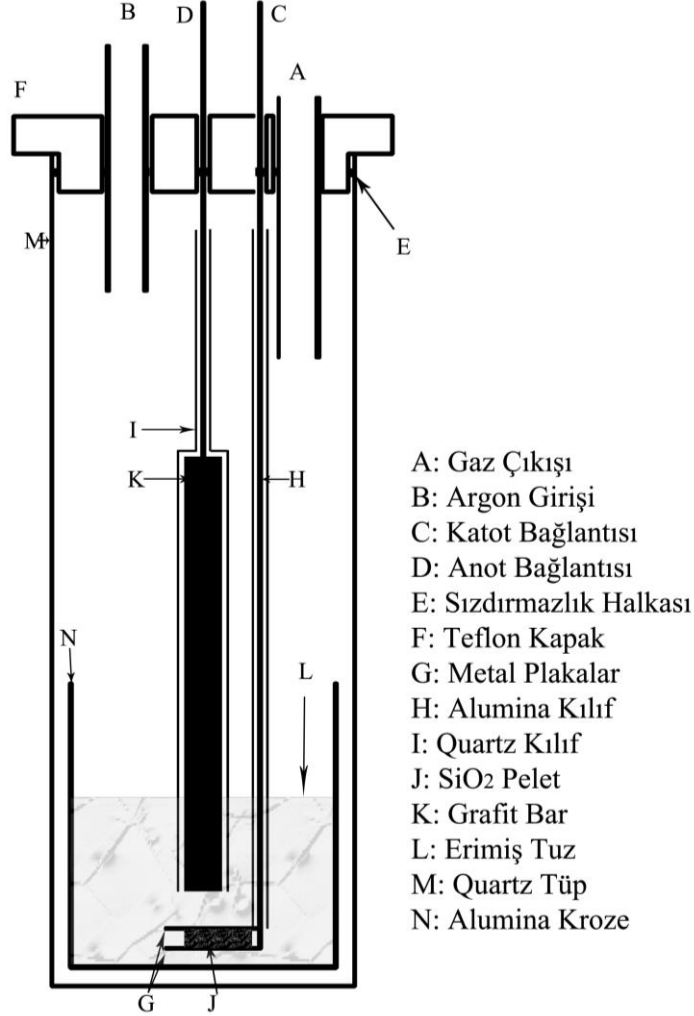
Katotta, iletken-oksid-elektrolit üçlü ortak yüzeyinde, yukarıda verilen reaksiyon sonucunda oluşan oksijen iyonu elektrolit içerisinde taşınarak anoda varır. Yapılan çalışmalarda bu taşınmanın elektrodeoksidasyon işleminin hızını tayin eden adım olduğu belirtilmiştir (Yasuda ve diğ., 2005). Bunun yanında, taşınma hızının yavaş olmasından kaynaklı olarak, yüksek negatif potansiyellerde katolit içerisinde kalsiyum oksit çökmesi gözlenmektedir (Xiao ve diğ., 2006). Anot olarak grafitin kullanıldığı çalışmalarda oksijen iyonlarının anoda varmasıyla birlikte anot/elektrolit yüzeyinde CO/CO_2 gazı çıkışı gerçekleşir. Yapılan çalışmalar, CO_2 içeren CaCl_2 - CaO eriyiğinin içerisinde CaCO_3 bileşiğinin oluştuğunu göstermiştir (Pistorius ve Fray, 2006).

Önceki çalışmalarda silisyum dioksit ile temas halinde olan katot iletken malzemesi olarak nikel (Jin ve diğ., 2004; Pistorius ve Fray, 2006; Xiao ve diğ., 2006) ve molibden tel (Nohira ve diğ., 2003; Yasuda ve diğ., 2005; Yasuda ve diğ., 2007) kullanılmıştır. Bu iletken malzemelerin, oluşan silisyumla etkileşimleri hakkında literatürde yeterli çalışmalar bulunmamaktadır. Özellikle, indirgenme sonucunda ortaya çıkan silisyumla temas halinde bulunan nikelin, Ni_3Si_2 intermetalikleri oluşturması kaçınılmazdır (Baker, 1993; Barin ve diğ., 1977). Bunun yanında, literatürde SiO_2 'in indirgenme süresi ile ilgili ve hatta elde edilen ürünün rengi ile ilgili tezat görüşler bulunmaktadır. Yapılan çalışmaların, bilgimiz dahilinde sadece birinde (Jin ve diğ., 2004) SiO_2 'in silisyuma tamamen indirgendiği belirtilmiş; diğer çalışmalarda ise tamamlanmamış indirgenmelerle ilgili sonuçlara yer verilmiştir. İndirgeme sonucu elde edilen silisyumun rengi bir çalışmada kiremit kırmızısı (Pistorius ve Fray, 2006), başka bir çalışmada metalik gri (Jin ve diğ., 2004), diğer birkaç çalışmada ise fotoğraflardan görüldüğü kadarıyla kahverengimsi (Nohira ve diğ., 2003; Yasuda ve diğ., 2005) olarak belirtilmiştir.

Bu çalışmada, gözenekli silisyum dioksit peletlerin silisyuma elektrokimyasal indirgenmeleri sırasında katot iletken malzemelerinin davranışları, indirgenme süresi ve elde edilen ürünün rengiyle ilgili literatürdeki uyumsuzlukları çözmeye yönelik çalışmalar yapılmıştır. Bunun yanında sıcaklığın ve başlangıç malzemesinin tane boyutunun, silisyum dioksitin CaCl_2 tuzu ve NaCl - CaCl_2 tuz karışımı içerisinde indirgenmesine olan etkileri de çalışılmıştır.

MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIALS AND METHOD)

Deney düzeneğinin şematik çizimi Şekil 1’de verilmiştir. 5 cm çapında bir ucu kapalı kuvars tüp reaktör olarak kullanılmıştır. Elektrolitik hücre 4,5 cm çapında 10 cm uzunluğundaki alümina krozenin içerisine yerleştirilmiştir. Elektrolit olarak kullanılan CaCl_2 (Riedel-de-Haën 12022) tuzu deneylerden önce kurutulmuştur. Kurutma işlemi, tuzun su ile reaksiyonunu önlemek için vakum altında fırının



Şekil 1. Deney düzeneğinin şematik olarak çizimi

Figure 1. Schematic drawing of the experimental setup

sıcaklığı dakikada 8°C 'lik artışla 400°C 'ye çıkartılarak toplamda 48 saat boyunca gerçekleştirilmiştir. $\text{CaCl}_2\text{-NaCl}$ (Riedel-de-Haën 13423) tuz karışımının elektrolit olarak kullanıldığı bazı deneyler dahil, tüm deneyde kullanılan tuz miktarı 100 gram olarak ayarlanmıştır.

İndirgenecek peleti oluşturmak için yaklaşık 1.1 gramlık SiO_2 tozu (Fluka 00653 purum p.a.; ≤ 230 mesh) 1.5 ton yük altında sıkıştırılmış ve daha sonra 1300°C 'de 2 saat boyunca sinterlenmiştir. Oluşturulan peletin sinterleme sonrası ortalama çapı 15 mm ve yüksekliği 5 mm olarak ölçülmüştür. Gözenekli silisyum dioksit pelet iki adet plaka halindeki katodu oluşturan iletken malzeme arasına yerleştirilmiştir. Metal plakalardan altta olanı 3 mm çapındaki 60 cm boyundaki paslanmaz çelik tele kaynatılarak üstten hücre kabının dışına çıkacak şekilde uzatılmıştır. Üstteki metal plaka ise sandviç yapının dağılmasını engellemek için bir tel (Kanthal D, $\text{Ø}:0.15\text{mm}$) ile alttaki plakayı da kapsayacak şekilde sarılarak katot oluşturulmuştur. Anot ise 15 cm uzunluğundaki 13 mm çapındaki grafitin (Alfa Aesar A10134) 3 mm çapındaki 45 cm uzunluğundaki paslanmaz çelik çubuğa vidalanarak yine üstten hücre kabının dışına çıkacak şekilde uzatılmasıyla oluşturulmuştur. Elektrotlar arasında oluşabilecek bir

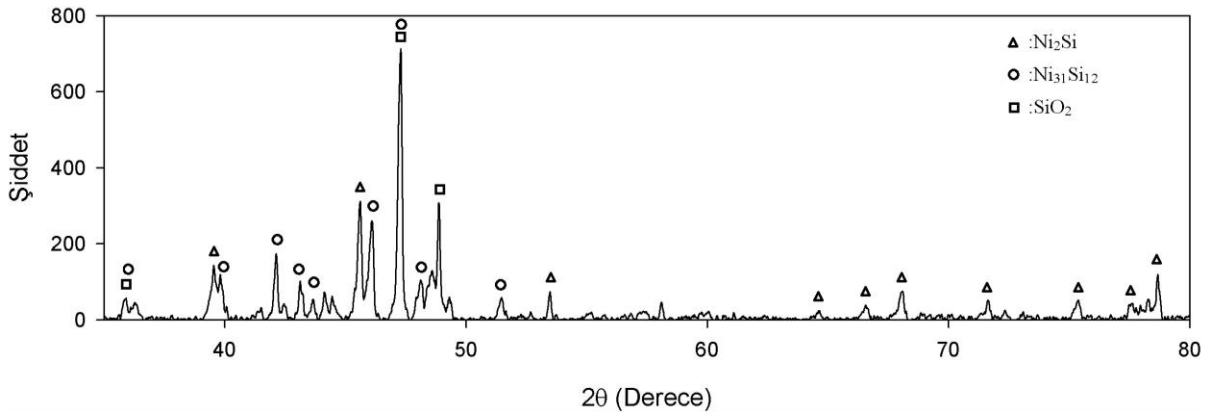
kısa devreyi engellemek ve hücrede oluşan gazlarla anot arasındaki istenmeyen etkileşimleri engellemek için anoda kuvars koruma kılıfı giydirilmiştir.

Elektroliti oluşturan tuz (veya tuz karışımı) alümina kroze içerisine koyulmuş ve kroze kuvars reaktörün içine yerleştirilmiştir. Elektroliz hücresinin içinde bulunduğu kuvars reaktör Lindeberg LHTF3226 marka ve modelli dikey fırının içerisine yerleştirilmiştir. Reaktör kapağının üzerinde deney sırasında gaz dolaşımını sağlamak amacıyla argon girişi ve gaz çıkışı için delikler açılmıştır. Bütün deneyler argon gazı akışı altında gerçekleştirilmiştir. Fırının sıcaklığını kontrol etmek amacıyla Eroterm 818P marka ve modelli kontrolör kullanılmıştır. Her deneyin başlangıcında reaktör içerisindeki nemi atmak için fırının sıcaklığı argon atmosferi altında yavaşça arttırılmış ve 2 saat içerisinde 800 °C'ye çıkartılmıştır. Hücrenin sıcaklığı CaCl₂ tuzu kullanıldığında 850 °C, NaCl-CaCl₂ tuz karışımı kullanıldığında 750 °C veya 800 °C olarak ayarlanmıştır. İstenilen sıcaklığa ulaşıldığında elektrotlar erimiş tuzun bulunduğu krozenin içerisine yavaşça daldırılmıştır. Elektrotların reaktör dışında kalan kısımları doğru akım güç kaynağına (Agilent N6700B, N6773A doğru akım güç modülü) bağlanmıştır. Deneyler 2,8 V sabit voltaj uygulanarak yapılmıştır.

Deneyler doğru akım güç kaynağı kapatılarak sonlandırılmıştır. Takiben, elektrotlar elektrolitin dışında kalacak şekilde yukarı çekilmiş ve sistem soğumaya bırakılmıştır. İndirgeme işleminden sonra elde edilen pelet 10 dakika boyunca ultrasonik su banyosunun içerisinde yıkanmıştır. Daha sonra toz halindeki ürün, içerisinde bulunan kalsiyum karbonattan arındırılması için 0.1 M hidroklorik asit çözeltisi içerisinde karıştırılarak temizlenmiştir. Süzme işlemi yapıldıktan sonra kurutulan ürünün bileşimi ve morfolojisi sırasıyla, X-ışınları kırınım cihazı (Rigaku D/MAX2200/PC) ve taramalı elektron mikroskopuyla (Jeol JSM-6400) belirlenmiştir. Peleti tutan katot iletken malzemeler de indirgenme deneyleri sonrasında incelemeye tabi tutulmuştur.

BULGULAR VE SONUÇLAR (RESULTS AND DISCUSSION)

Jin ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada (2004) gözenekli nikel folyo katot iletken malzemesi olarak kullanılmış ve gözenekli silisyum dioksit peletinin 4 saatlik elektrodeoksidasyon işlemi sonucunda tamamen silisyuma indirgendiği ifade edilmiştir. Bu çalışmanın ışığında, gözenekli silisyum dioksit pelet iki nikel metal plaka arasına yerleştirilmiştir ve elektroliz deneyi 850 °C'de saf kalsiyum klorür tuzu içerisinde 2,8 V sabit potansiyel farkı uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Elektroliz sonunda peletin sıkıştırılmış olduğu nikel plakaların üzerinde kalan ve toplanan madde yıkandıktan sonra X-ışınları kırınımı analizine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar indirgenen silisyumun nikel ile reaksiyona girip nikel-silisyum bileşiklerini oluşturduğunu göstermiştir (Şekil 2). Bu sonucu Ni₂Si ve Ni₃₁Si₁₂ bileşiklerinin yüksek negatif Gibbs oluşum enerji değerleri de desteklemektedir. Ni₂Si bileşiği için bu değer (-134) kJ/mol olarak verilmiş (Barin ve diğ., 1977), Ni₃₁Si₁₂ bileşiği için de Ni₂Si bileşiğinin standart Gibbs oluşum enerjisi ve Ni-Si faz diyagramı (Baker, 1993) kullanılarak (-624) kJ/mol olarak hesaplanmıştır. Bunun yanında Pistorius ve Fray'ın çalışmasında da Ni-Si

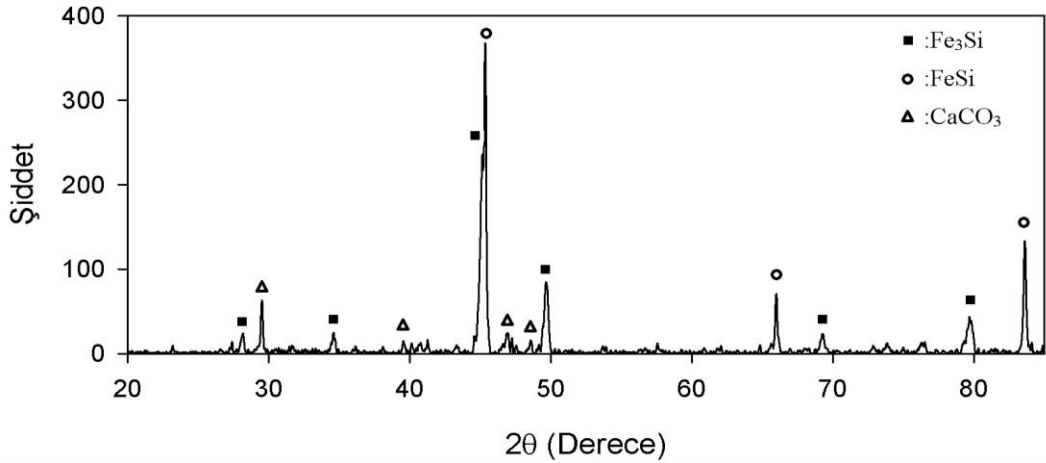


Şekil 2. Nikel plaka üzerinde oluşan maddelerin X-ışınları kırınımı analiz sonuçları

Figure 2. X-ray diffraction result of the sample formed on the nickel plates

bileşiklerinin oluşumundan bahsedilmiştir (Pistorius ve Fray, 2006). Ayrıca Jin ve arkadaşlarının bulgularının tersine 4 saatlik elektroliz sonucunda sadece kısmi bir indirgenme gözlenmiştir.

Katot iletken malzemesi olarak paslanmaz çelik kullanıldığında, silisyumla paslanmaz çelik arasındaki etkileşimleri test etmek için aynı koşullar altında çalışmalar yapılmıştır. Silisyum dioksit pelet iki paslanmaz çelik plaka arasına yerleştirilmiş ve 4 saat boyunca elektroliz edilmiştir. Bu durumda da kısmi indirgenme gözlenmiştir. Elektroliz sonunda paslanmaz çelik plakalar X-ışınları kırınımı analizine tabi tutulmuş ve Fe-Si bileşiklerinin oluştuğu görülmüştür (Şekil 3). X-ışınları kırınımı analizindeki şiddet değerlerine ve katot iletken

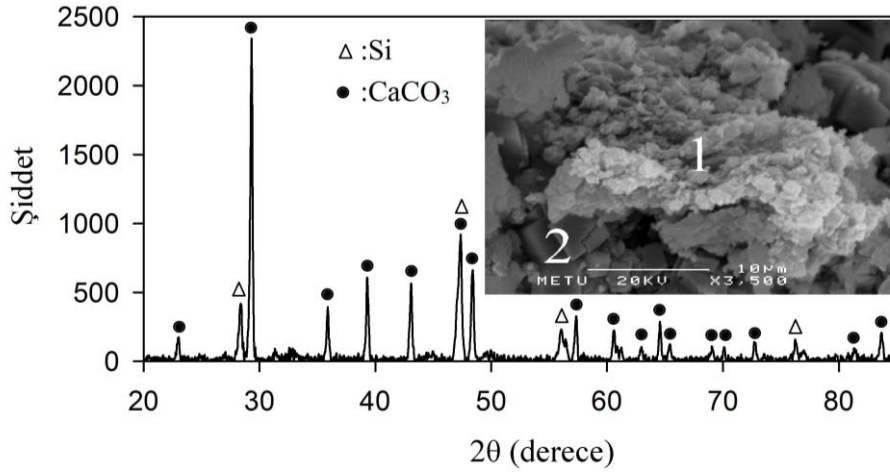


Şekil 3. Paslanmaz çelik plaka üzerinde oluşan maddelerin X-ışınları kırınımı analiz sonuçları

Figure 3. X-ray diffraction result of the sample formed on the stainless steel plate

malzemesinin üzerinden toplanan madde miktarlarına göre yapılan gözlemler sonucunda Fe-Si bileşiklerinin Ni-Si bileşiklerine oranla daha az oluştuğu görülmüştür. Bu sebeple, daha sonraki çalışmalarda paslanmaz çelik, katot iletken malzemesi olarak kullanılmıştır.

Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlara göre, Jin ve arkadaşlarının belirttiğinin (Jin ve diğ. 2003) aksine, aynı geometrik ve boyutsal özelliklere sahip gözenekli silisyum dioksit peletin aynı koşullar altında tam olarak indirgenmesi 4 saat içerisinde tamamlanmamıştır. Hatta 8saatlik elektrodeoksidasyon işlemine tabi tutulan pelet, deney sonunda silisyum ve kalsiyum karbonatın yanında indirgenmemiş silisyum dioksit içermektedir. Bunun yanında, Pistorius ve Fray'ın çalışmasında gözenekli silisyum dioksit peletinin (Ø: 13.1 mm, yükseklik: 7.1 mm) silisyuma indirgenmesi teyit edilmiş fakat grafiklerinden 16 saat indirgenme sonunda, bir miktar indirgenmemiş kalsiyum silikatın (CaSiO₃) varlığından bahsedilmiştir (Pistorius ve Fray, 2006). Kalsiyum silikat oluşumunun muhtemel sebebinin ise erimiş tuzun içerisindeki CaO ile silisyumun reaksiyonu olduğu düşünülmektedir (Pistorius ve Fray, 2006). Aynı çalışmada yer alan akım zaman grafiklerinden çıkarılabilecek sonuca göre indirgenmenin gerçekleşmesi için en az 16 saat gerekmektedir. Bu çalışmada da peletin (çap: 15 mm, yükseklik: 5 mm) tamamen indirgenmesi 16 saat sürmüştür. Ürünün X-ışınları kırınımı analizi ve taramalı elektron mikroskobu fotoğrafı Şekil 4'te verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, 16 saatten kısa deneylerde, indirgenmemiş silisyum dioksit gözlenmemekle beraber kalsiyum silikat varlığına dair herhangi bir sonuca rastlanmamıştır. Bunun sebebi, bu çalışmada kullanılan susuz CaCl₂ tuzu içerisindeki CaO'nun aktivite değerinin düşük olması olabilir. Pistorius ve Fray'ın çalışmasında ise elektrolite kasıtlı olarak eklenen CaO sebebi ile CaO'nun CaCl₂ içerisindeki aktivite değeri daha yüksektir (Pistorius ve Fray, 2006).



Şekil 4. 16 saatlik indirgenme sonucunda elde edilen ürünün X-ışınları kırınımı analiz sonucu ve taramalı elektron mikroskobu fotoğrafı. 1 ile gösterilen bölüm silisyum, 2 ile gösterilen bölüm kalsiyum karbonattır

Figure 4. X-ray diffraction result and SEM micrograph of the sample obtained after 16 hours of reduction. The area labeled as 1 is silicon and 2 is calcium carbonate

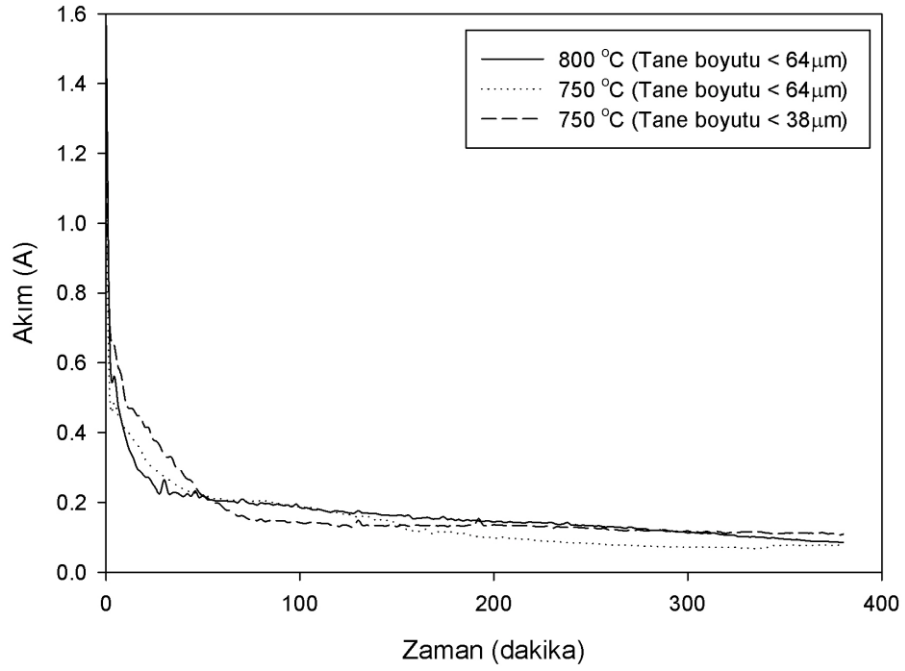
Bu çalışmada elde edilen silisyumun rengi kahverengi ile kiremit kırmızısı arasında bir renktir ve Pistorius ve Fray'in çalışmasında (Pistorius ve Fray, 2006) bahsedilen kiremit kırmızısı renk ile benzerdir. Jin ve arkadaşlarının çalışmasında ise gri renkli silisyum elde edilmiştir (Jin ve diğ., 2004). Diğer çalışmaların fotoğraflarından görülebildiği kadarıyla (Nohira ve diğ., 2003; Yasuda ve diğ., 2005) indirgenme sonucu elde edilen ürünlerin renkleri kahverengimsidir. Pistorius ve Fray'in ortaya attığı hipotezde, kiremit kırmızısı rengin indirgenmemiş kalsiyum silikatın varlığından kaynaklanabileceği ileri sürülmüştür (Pistorius ve Fray, 2006). Fakat bu çalışmadaki ürünün rengi Pistorius ve Fray'in çalışmasındaki ürünün rengiyle benzer olmasına rağmen üründe kalsiyum silikata rastlanmamıştır. Bu açıdan bakıldığında yapılan çalışma onların ileri sürdüğü hipotezi desteklememektedir. Kırmızının ve kahverenginin değişik tonlarının gözlenmesinin nedeni elde edilen silisyum tozlarındaki tane büyüklüğünün farklılığı olabilir. Tane büyüklüğü nanometre düzeyinde olan silisyum tozunun görülen rengi kahverengi olabilmektedir (Henneberg ve diğ., 2002). Bu çalışma sonucunda elde edilen silisyum tozunun renginin kahverengi olması, ürünün tane büyüklüğünün nanometre düzeyinde olduğunu gösteriyor olabilir.

Sıcaklığın indirgenme süresine ve miktarına olan etkilerini incelemek için erime noktası kalsiyum klorürden daha düşük olan bir elektrolit kullanma ihtiyacı doğmuştur. Bu sebeple, NaCl-CaCl₂ tuz karışımı elektrolit olarak kullanılmıştır. Karışım 30 mol yüzdesi sodyum klorür, 70 mol yüzdesi kalsiyum klorür olarak hazırlanmıştır. Böylelikle deney sıcaklıkları 850°C'nin altına çekilebilmiştir. Bu tuz karışımıyla yapılan deneyler 800 °C'de ve 750 °C'de gerçekleştirilmiştir. Şekil 5'teki akım zaman grafiklerine göre sıcaklık artışının indirgenme süresini azaltma yönünde, büyük fark yaratmamakla birlikte, olumlu etkileri gözlenmiştir.

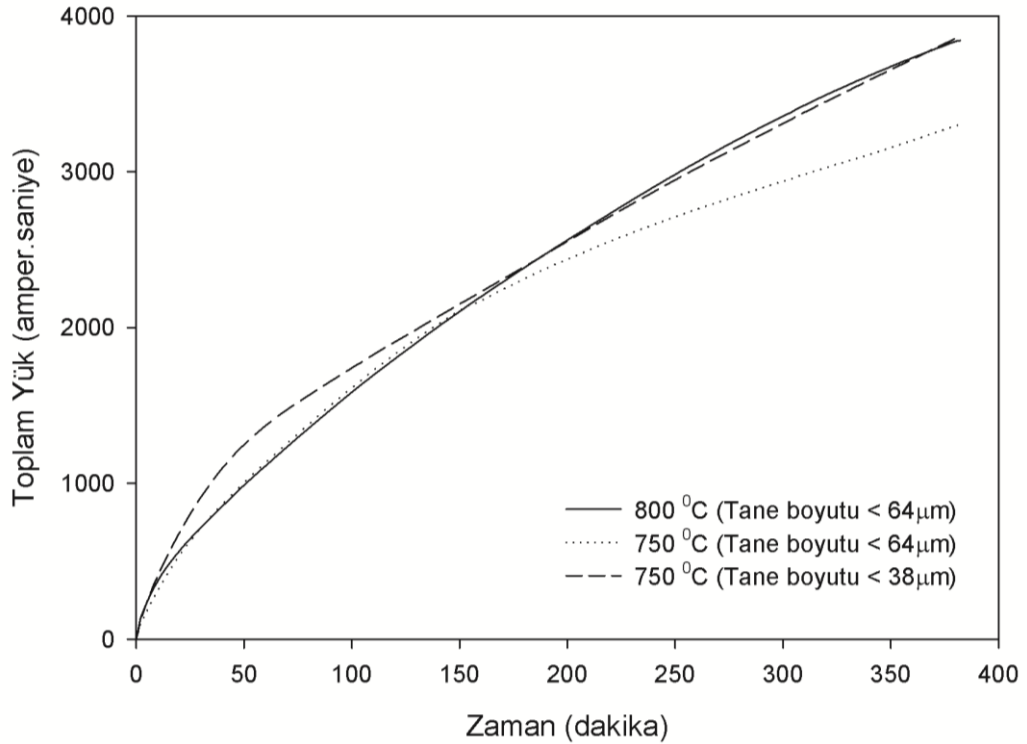
Akım zaman grafiklerinin daha rahat anlaşılabilmesi için, hücreden geçen toplam yük miktarı, Q, zamana karşı Şekil 6'da verilmiştir. Toplam yük, Q;

$$Q = \int_0^t I dt \quad (2)$$

eşitliğinden hesaplanmıştır. Bu eşitlikteki I amper cinsinden akımı ve t de saniye cinsinden zamanı vermektedir. Böylece Q ile doğru orantılı olan, numunelerin toplam indirgenme miktarlarının zamana göre değişimi elde edilmiştir.



Şekil 5. Değişik sıcaklık ve tane boyutları için akım zaman grafikleri
 Figure 5. Current vs. time graphs for different temperatures and particle sizes



Şekil 6. Değişik sıcaklık ve tane boyutları için hücreden geçen toplam yük miktarının zamana göre değişimi

Figure 6. Total charge passed through the cell as a function of time for different temperatures and particle sizes

Başlangıç malzemesi olarak kullanılan silisyum dioksit tozunun tane boyutunun indirgenme süresine olan etkisini görmek için 63 mikron ve altı boyutundaki toz ve eleme sonucu elde edilen 38 mikron ve altı boyutundaki toz kullanılarak aynı şekil ve boyutlarda ayrı iki pelet oluşturulmuştur. Bu peletlerle yapılan deneyler sonucunda, 38 mikron ve altı boyutundaki tozdan oluşturulan peletin

indirgenmesi 63 mikron ve altı boyutundaki tozdan oluşturulan peletin indirgenmesinden biraz daha hızlı gerçekleşmiştir. Sıcaklığın ve tane boyutunun indirgenme süresine veya miktarına olan etkileri Şekil 5'te akımın ve Şekil 6'da toplam yükün zamanla değişimi grafiklerinde gösterilmiştir. Bu çalışmalar doğrultusunda sıcaklık artışının ve tane boyutunun küçülmesinin indirgenme süresinin kısaltılmasına olumlu etkileri olduğu anlaşılmıştır. Ancak etkilerin büyük olmadığı görülmüştür.

SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Yapılan çalışmalardan elde edilen bulgulara göre, katotta elektrodoksidasyon sonucunda üretilen silisyum, katotta iletken malzemeler olarak kullanılan nikel ve paslanmaz çelik plakalarla reaksiyona girmiştir. Paslanmaz çelik katot iletken malzemesi olarak kullanıldığında daha az intermetalik bileşik oluşumu ve daha fazla indirgenme gözlenmiştir.

Jin ve arkadaşlarının çalışmasında belirtildiğinin (Jin ve diğ., 2004) aksine aynı şekil ve boyutlardaki gözenekli silisyum dioksit peletlerin aynı potansiyel farkı uygulanarak 4 saatte tam olarak indirgenmediği gözlenmiştir. Bu çalışmada, X-ışınları kırınımı sonuçlarına göre tam indirgenme 16 saatte gerçekleşmiştir.

Bu çalışmada elde edilen silisyumun rengi Pistorius ve Fray'in çalışmasında (Pistorius ve Fray, 2006) bildirilen kiremit kırmızısı renkle benzer, Jin ve arkadaşlarının çalışmasında (Jin ve diğ., 2004) belirtilen gri renkle uyumsuzdur.

CaCl₂-NaCl tuz karışımı silisyum dioksit indirgenmesinde elektrolit olarak kullanılmış ve sıcaklığın indirgenme üzerindeki etkileri çalışılmıştır. Sıcaklığın artması ve tane boyutunun küçülmesi silisyum dioksitin indirgenme hızında az da olsa bir artış sağlamıştır.

KATKI BELİRTME (ACKNOWLEDGEMENT)

Yazarlar, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK 1001 Projesi, 108M242) finansal desteklerinden ötürü teşekkür eder.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Baker, H., 1993, ed. *ASM Handbook*, Cilt 3, ASM International: Ohio.
- Barin, I., Knacke, O., Kubaschewski, O., 1977, *Thermochemical Properties of Inorganic Substances*, Springer, Berlin.
- Carleton K. L., Olson J. M., Kibbler A., 1983, "Electrochemical Nucleation and Growth of Silicon in Molten Fluorides", *Journal of Electrochemical Society*, Cilt 130, Sayı: 4, ss. 782-786.
- Chen G. Z., Fray D. J., Farthing T. W., 2000, "Direct Electrochemical Reduction of Titanium Dioxide to Titanium in Molten Calcium Chloride", *Nature*, Cilt 407, ss. 361-364.
- Elwell D., Rao G. M., 1988, "Electrolytic Production of Silicon", *Journal of Applied Electrochemistry*, Cilt 18, ss. 15-22.
- Henneberg, E., Acker J., Roever I., Roewer G., Bohmhammel K., 2002, "Synthesis of Nanocrystalline Silicon in the System La-Si-HCl: Thermoanalytical Investigations", *Thermochimica Acta*, Cilt 382, ss. 297-301.
- Jin X., Gao P., Wang D., Hu X., Chen G. Z., 2004, "Electrochemical Preparation of Silicon and its Alloys from Solid Oxides in Molten Calcium Chloride", *Angewandte Chemie*, Cilt 43, ss. 733-736.
- Nohira T., Yasuda K., Ito Y., 2003, "Pinpoint and Bulk Electrochemical Reduction of Insulating Silicon Dioxide to Silicon", *Nature Materials*, Cilt 2, ss. 397-401.
- Olson J. M., Carleton K. L., 1981, "A Semipermeable Anode for Silicon Electrorefining", *Journal of Electrochemical Society*, Cilt 128, Sayı 12, ss. 1152-1156.

- Pistorius P. C., Fray D. J., 2006, "Formation of Silicon by Electrodeoxidation, and Implications for Titanium Metal Production", *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, Cilt 106, ss. 31-41.
- Rao G. M., Elwell D., Feigelson R. S., 1981, "Electrodeposition of Silicon onto Graphite", *Journal of Electrochemical Society*, Cilt 128, Sayı 8, ss. 1708-1711.
- Sharma I. G., Mukherjee T. K., 1986, "A Study on Purification of Metallurgical Grade Silicon by Molten Salt Electrorefining", *Metallurgical Transactions B*, Cilt 17B, ss. 395.
- Xiao W., Jin X., Deng Y., Wang D., Hu X., Chen G. Z., 2006, "Electrochemically Driven Three-phase Interlines into Insulator Compounds: Electroreduction of Solid SiO₂ in Molten CaCl₂", *ChemPhysChem*, Cilt 7, ss. 1750-1758.
- Yasuda K., Nohira T., Amezawa K., Ogata Y. H., Ito Y., 2005, "Electrolytic Reduction of a Powder-molded SiO₂ Pellet in Molten CaCl₂ and Acceleration of Reduction by Si Addition to the Pellet", *Journal of The Electrochemical Society*, Cilt 152, Sayı: 12, ss. D69-D74.
- Yasuda K., Nohira T., Hagiwara R., Ogata Y. H., 2007, "Direct Electrolytic Reduction of Solid SiO₂ in Molten CaCl₂ for the Production of Solar Grade Silicon", *Journal of the Electrochemical Society*, Cilt 154, ss. E95-E101.
- Zulehner W., 1993, *Ullman's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, (ed. B. E. W. Zulehner, S. Hawkins, W. Russey, G. Schulz), VHC, Weinheim.



EXTENDED KALMAN FILTER DESIGN FOR RAILWAY TRACTION MOTOR

¹Caglar UYULAN, ²Metin GOKASAN

¹Istanbul Technical University, Department of Mechatronics Engineering, Graduate School of Science, Engineering and Technology, Istanbul, TURKEY

²Istanbul Technical University, Department of Control Engineering, Faculty of Electrical and Electronic Engineering, Istanbul, TURKEY

¹cuyulan@itu.edu.tr, ²gokasan@itu.edu.tr

(Geliş/Received: 06.02.2017; Kabul/Accepted in Revised Form: 14.04.2017)

ABSTRACT: Monitoring the adhesion force between a railway wheel and a rail surface is very essential in maintaining high acceleration and braking performance of railway vehicles. Due to the difficulties encountered in direct measurement of friction coefficient, creepage and adhesion force; state observers are used as indirect estimation methods. This paper proposes an effective estimation method, which exploits railway traction motor behaviour to give an assistance for realizing wheel slip and adhesion control in order to be used in railway applications. This method plays an active role in optimizing the use of the existing adhesion and reducing wheel wear by decreasing high creep values. With this method, adhesion force can be indirectly estimated by measuring stator currents, and angular speed of the AC traction motor and using dynamic relationships based on the extended Kalman filter (EKF) simulation model. The re-adhesion controller can be designed to regulate the motor torque command according to the maximum available adhesion depending on the estimated results. To test the proposed method, simulations were performed under different friction coefficients.

Key Words: Adhesion mode, Extended Kalman filter, Full state estimation, Railway traction.

Demiryolu Cer Motorları için Genişletilmiş Kalman Filtresi Tasarımı

ÖZ: Bir demiryolu tekerleği ile rayı arasında meydana gelen tutunma kuvvetinin izlenmesi, demiryolu araçlarının yüksek hızlanma ve frenleme performansının korunmasında oldukça önemlidir. Sürtünme katsayısı, kayma ve tutunma kuvvetinin doğrudan ölçülmesinde karşılaşılan zorluklardan dolayı, durum gözetleyicilerine dayalı dolaylı tahmin yöntemleri kullanılır. Bu makale, demiryolu uygulamalarında kullanılmak üzere tekerlek kayma ve yeniden tutunma kontrolünü gerçekleştirmek için demiryolu cer motor davranışını kullanan etkili bir tahmin yöntemi önermektedir. Bu yöntem, mevcut tutunmanın kullanımını iyileştirmede ve yüksek kayma değerlerini düşürerek tekerlek aşınmasının azaltılmasında etkin bir rol oynamaktadır. Bu yöntemle, stator akımları ve asenkron cer motorun açısal hızı ölçülerek, genişletilmiş Kalman filtresi (GKF) simülasyon modeline dayanan dinamik ilişkiler kullanılarak tutunma kuvveti dolaylı olarak tahmin edilebilir. Yeniden tutunma kontrolörü, tahmin sonuçlarına bağlı olan maksimum erişilebilir tutunma özelliklerine göre motor moment komutu düzenlenerek tasarlanabilir. Önerilen yöntemi test etmek için, farklı tekerlek-ray sürtünme katsayıları altında simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Demiryolu Cer sistemi, Genişletilmiş Kalman filtresi, Tam durum kestirimi, Tutunma modeli.

INTRODUCTION

In railway vehicles, estimating the maximum adhesion force between the wheel and rail, which is a non-linear function of friction coefficient and mass of the rail vehicle, is very important in terms of providing effective acceleration and braking performance. In traction systems, excessive creepage at the wheel-rail must be limited to reduce traction, poor ride comfort, wheel wear and noise. A large creepage usually occurs when the traction force applied during acceleration and deceleration exceeds the maximum admissible adhesion. When investigating the slip&slide phenomenon in railway traction, a procedure based on the second order Luenberger observer that indirectly define the frictional force is proposed and the results obtained are verified on the test rig (Rizzo and Iannuzzi, 2002). The load is evaluated by means of the interaction between the torsional oscillations of the friction forces, mechanical transmission forces, and the motion components to optimize the vector control algorithm, which prevents slip&slide oscillations. An adaptive observer algorithm has been developed to approximate the true wheel-rail friction coefficient by using the measured values of the angular velocity of the wheel, the moment generated by the brake force and the torque generated by the wheel load. Friction coefficient values estimated under suddenly changing wheel-rail contact conditions are used to improve anti-slip brake control performance (Gaspar et al., 2006). However, in this method, it is necessary to know the slip ratio and vehicle speed so that the friction coefficient can be estimated. This method does not seem to have enough accuracy because of the difficulty of measuring slip ratio and vehicle speed. Lateral dynamics of the train have also been analyzed to estimate the low adhesion at the wheel-rail contact by using Kalman filter algorithm (Charles and Goodall, 2006). The shortcoming of this method is that it only detects significant changes in friction coefficient. Subsequent studies have involved searching for the least residuals operated at saturation points under the influence of different friction coefficients, using the series of state observers in the estimation of the vehicle lateral dynamics and friction coefficients (Mei and Hussain, 2010). The creep force between the wheel and roller is estimated using Kalman filter based on stator voltage, current and motor speed measurement focusing on the torsional dynamics of a simplified drive system. The estimated creep force-creepage relationship is compared with those under different friction coefficients, and the friction coefficient is estimated by calculating the root mean square value of residuals (Zhao et al., 2012). A multiple-induction motor system driven by a single inverter, which utilize the estimated adhesion force to adjust the torque command and suppress the slip&slide, has been investigated. The ability of the traction system to be adjusted to work at the peak of the adhesion force curve depends on accurately estimating the friction coefficient and vehicle speed (Kawamura et al., 2003; Matsumoto et al., 2001). The creep forces occurred at the contact patch have been investigated by using the roller test rig and a model to calculate the wheel-rail creep force has been proposed (Iwnicki, 2003). Among the alternative methods, there is an indirectly detection and estimation process of the slip-slide conditions based on measuring the voltage, current, and speed of the AC traction motor with using an EKF (Zhao and Liang, 2013). There is also another method were used to detect slip velocity based on the multi-rate EKF state identification by combining the multi-rate method and the EKF method to identify traction motor load torque. This method provides a faster detection of slip and improves reliability and traction performance (Wang et al., 2016). The EKF algorithm has been developed for direct vector control of induction motors. This algorithm includes the estimation of the currents, rotor fluxes, and motor speed (Barut et al., 2002). In the sixth-order discrete-time model, mechanical equations are taken into consideration by adding the load torque to the state variables (Alonge and D'ippolito, 2010). The important problem associated with the use of EKF's is the proper selection of covariance matrices and measurement noises for the system to operate at the optimal state. However, both matrices are not known, especially the system noise is very hard to define. For this reason, these matrices are often used as parameters for tuning. Adjustment can be accomplished using a trial and error approach or using evolutionary algorithms (Cai, et al., 2003). A Kalman-Bucy filter estimation method based on a half vehicle non-linear contact mechanics model was developed in (Ward et al., 2011) and best estimates were achieved for the front bogie rear wheelset creep forces. The

efficiency of this technique was tested with more representative data produced by multi-bodied physics simulation package Vampire (Ward et al., 2012). Multiple model estimation approach for the identification of the adhesion limit to handle the wheel slip/slide phenomenon was presented by using a bank of Kalman filters, which are designed at selected operation points for adhesion estimation (Hussain et al., 2013)

An unscented Kalman filter was also used to estimate the creep force, creepage and the friction coefficient from traction motor behaviors (Zhao, et al., 2014). This estimator provided accurate friction estimation under different contact conditions, but the estimated friction coefficient was not reliable when the traction load is very small, and was also influenced by the traction load. These problems are originated from the inaccuracy of the measurements and system dynamic model. An adhesion moment estimation in contact point was constructed in order to perform a high precision adaptive control system for locomotive electrical drives (Radionov and Mushenko, 2015). By using this method, it is also possible to estimate the rotor flux vector components.

In this paper, a new approach to estimate the adhesion force between wheel-rail contact surfaces over an EKF using the measured values of the stator currents of the traction AC motor has been examined. The optimum operating point of the system is determined by the estimated adhesion force-creepage curve. To test the observer, a dynamic model consisting of a wheel set, gear box and traction motor is designed. The Polach model is used to express the wheel-rail contact behavior. For sensorless control of induction motors, an EKF is proposed that estimates rotor flux and current components, motor speed and load torque. The traction motor is designed by first order decomposition of the sixth order nonlinear model (Euler method). The mechanical equation is formed by including the load torque in the state variables that the account participates in. Then, based on this model, the EKF design was completed by selecting the covariance matrices of the system and the measurement noise using a trial and error method. The main contribution of this paper is to design and implement the sixth-order EKF, which takes into account the railway traction dynamics and predicts the existing adhesion to establish an effective sensorless re-adhesion control system on rail vehicles.

MATERIAL AND METHOD

Traction system model

The traction system used in this paper is represented in Figure 1.

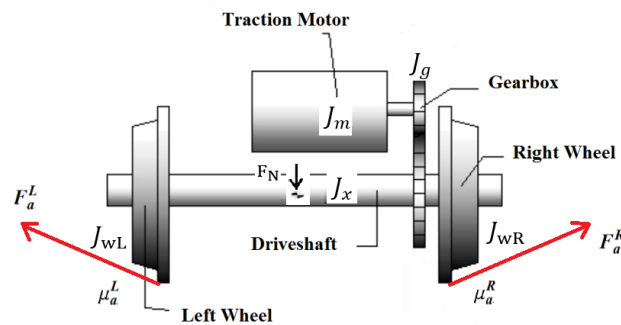


Figure 1. Schematic representation of the traction system.

In this system, a wheel set with two wheels is driven by an AC induction motor coupled with a gearbox. The movement of the railway vehicle takes place thanks to the creep forces between the wheels and the rail. The dynamic equations for the motion of the system are given below.

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{T_m - T_L}{J_{eqv}} \tag{1}$$

$$\omega_w = \frac{\omega_m}{n_i} \quad (2)$$

where ω_m is the motor angular velocity, ω_w is the wheel angular velocity, T_m is the motor torque, n_i is the gear reduction ratio, T_L is the load torque and represented as $T_L = \frac{2r_0 F_a}{n_i}$, here F_a is the longitudinal creep force, which is also called as adhesion force of a single wheel.

J_{eqv} is the equivalent moment of inertia as shown in below

$$J_{eqv} = J_m + \frac{J_g + J_x + J_{wR} + J_{wL}}{n_i^2}$$

where J_g, J_x, J_{wR}, J_{wL} is the moment of inertia of the gearbox, wheelset axle, right wheel, left wheel, respectively.

Extended mathematical model of the traction motor

In this paper, the type of the traction motor is an induction motor, which is controlled by an indirect flux oriented scheme, which is commonly used in railway traction. Induction motors are described by a set of fifth-order differential equations with two input and three state variables suitable for measurement. The model for speed sensorless control includes differential equations based on stator and/or rotor electric circuits, taking into account stator current and/or voltage measurement. The extended induction motor model derived is different from previous EKF-based estimators that estimate the rotor speed. The equation of motion to be used for estimating the rotor speed is also included in the model. Stator current and rotor flux are the state variables and the equations are listed as (Barut, et al., 2007; Shi et al., 2002)

$$\frac{dI_{s\alpha}}{dt} = -\left(\frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{L_m^2 R_r'}{\sigma L_s (L_r')^2}\right) I_{s\alpha} + \frac{L_m R_r'}{\sigma L_s (L_r')^2} \psi_{r\alpha} + \frac{L_m}{\sigma L_s L_r'} n_p \omega_m \psi_{r\beta} + \frac{1}{\sigma L_s} U_{s\alpha} \quad (3)$$

$$\frac{dI_{s\beta}}{dt} = -\left(\frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{L_m^2 R_r'}{\sigma L_s (L_r')^2}\right) I_{s\beta} + \frac{L_m R_r'}{\sigma L_s (L_r')^2} \psi_{r\beta} - \frac{L_m}{\sigma L_s L_r'} n_p \omega_m \psi_{r\alpha} + \frac{1}{\sigma L_s} U_{s\beta} \quad (4)$$

$$\frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} = \frac{R_r' L_m}{L_r'} I_{s\alpha} - \frac{R_r'}{L_r'} \psi_{r\alpha} - n_p \omega_m \psi_{r\beta} \quad (5)$$

$$\frac{d\psi_{r\beta}}{dt} = \frac{R_r' L_m}{L_r'} I_{s\beta} - \frac{R_r'}{L_r'} \psi_{r\beta} + n_p \omega_m \psi_{r\alpha} \quad (6)$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{-3n_p L_m}{2J_{eqv} L_r'} \psi_{r\beta} I_{s\alpha} + \frac{3n_p L_m}{2J_{eqv} L_r'} \psi_{r\alpha} I_{s\beta} - \frac{B_m}{J_{eqv}} \omega_m - \frac{T_L}{J_{eqv}} \quad (7)$$

The extended model of the induction motor based on the rotor flux is represented in matrix form as (Barut et al., 2005)

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{I}_{s\alpha} \\ \dot{I}_{s\beta} \\ \dot{\psi}_{r\alpha} \\ \dot{\psi}_{r\beta} \\ \dot{\omega}_m \\ \dot{T}_L \end{pmatrix} = \begin{matrix} A_e \\ \begin{pmatrix} -\left(\frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{L_m^2 R_r'}{\sigma L_s (L_r')^2}\right) & 0 & \frac{L_m R_r'}{\sigma L_s (L_r')^2} & \frac{L_m}{\sigma L_s L_r'} n_p \omega_m & 0 & 0 \\ 0 & -\left(\frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{L_m^2 R_r'}{\sigma L_s (L_r')^2}\right) & -\frac{L_m R_r'}{\sigma L_s (L_r')^2} & \frac{L_m R_r'}{\sigma L_s (L_r')^2} & 0 & 0 \\ \frac{R_r' L_m}{L_r'} & 0 & -\frac{R_r'}{L_r'} & -n_p \omega_m & 0 & 0 \\ 0 & \frac{R_r' L_m}{L_r'} & n_p \omega_m & -\frac{R_r'}{L_r'} & 0 & 0 \\ \frac{-3n_p L_m}{2J_{eqv} L_r'} \psi_{r\beta} & \frac{3n_p L_m}{2J_{eqv} L_r'} \psi_{r\alpha} & 0 & 0 & -\frac{B_m}{J_{eqv}} & -\frac{1}{J_{eqv}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \end{matrix} \begin{pmatrix} x_e \\ I_{s\alpha} \\ I_{s\beta} \\ \psi_{r\alpha} \\ \psi_{r\beta} \\ \omega_m \\ T_L \end{pmatrix} + \begin{matrix} B_e \\ \begin{pmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \end{matrix} \begin{matrix} u_e \\ \{ \hat{U}_{s\alpha} \} \\ \{ \hat{U}_{s\beta} \} \end{matrix} + w(t)$$

$$\begin{bmatrix} z \\ \widehat{I_{s\alpha}} \\ I_{s\beta} \\ \omega_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_e \\ \overline{100000} \\ 010000 \\ 000010 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{s\alpha} \\ I_{s\beta} \\ \psi_{r\alpha} \\ \psi_{r\beta} \\ \omega_m \\ F_a \end{bmatrix} + v(t) \tag{8-9}$$

where n_p is the number of the pole pairs, σ is the leakage or coupling factor, L_s and R_s are stator inductance and resistance, respectively, L'_r and R'_r is the rotor inductance and resistance, referred to the stator side, respectively. $U_{s\alpha}$ and $U_{s\beta}$ stator stationary axis components of stator voltages, $\psi_{r\alpha}$ and $\psi_{r\beta}$ are rotor stationary axis components of stator flux, L_m is the mutual inductance, B_m is the viscous friction, $w(t)$ and $v(t)$ are process and measurement noise, respectively.

The longitudinal creep force F_a at the wheel-rail contact is modeled based on Polach's method as (Polach, 1999)

$$F_a = \frac{2F_N\mu_f}{\pi} \left(\frac{k_A\epsilon}{1+(k_A\epsilon)^2} + \arctan(k_S\epsilon) \right) \tag{10}$$

For the case of the domination of the "longitudinal creepage" " $\xi_x \approx \xi, \xi_y \approx 0$ "

$$\epsilon = \frac{G\pi ab C_{11}}{4F_N\mu_f} \xi \tag{11}$$

where a, b are the semi-axes of the contact ellipse, C_{11} use the longitudinal Kalker's coefficients, F_N is the normal force acting on the wheel. k_A, k_S are reduction factors regarding to the different conditions between wheel and rail surface. k_A is related to the area of the adhesion, k_S is related to the area of slip, and the condition is defined as

$$k_S \leq k_A \leq 1$$

In this model, the traction coefficient relies on the slip velocity and friction coefficient, which is defined by the following equation.

$$\mu_f = \mu_0((1 - Q)e^{-P\xi^V} + Q) \tag{12}$$

P, Q are reduction factors under different friction coefficient. The values of the P, Q, k_A, k_S, μ_0 are given in Table 1.

Table 1. Parameters of Polach model under various friction conditions (Zhao and Liang, 2013).

Parameter	Dry	Wet	Low	Very Low
k_A	1	1	1	1
k_S	0,4	0,4	0,4	0,4
μ_0	0,55	0,3	0,06	0,03
P	0,4	0,4	0,4	0,4
Q	0,6	0,2	0,2	0,1

Since the lateral dynamics of the system are neglected in this work, the creepage terms contain only the longitudinal component. Creepage is calculated by the following equation (Kalker, 1968).

$$\xi = \frac{\omega_w r_0 - V}{V} \quad (13)$$

where V is the longitudinal velocity of the railway vehicle.

Extended Kalman filter design

An EKF algorithm with the aim of estimating the states of the extended induction motor model given in Equations (8-9), which will be used in the sensorless control of the induction motor, has been developed. The Kalman filter (KF) method used for this purpose is a recursive algorithm in which a statistical state space model is added to the system together with the measured outputs to optimally estimate states in multiple input & multiple output systems. System and measurement noises are considered as white noise and the optimality of the state estimation can be obtained by minimizing of the covariance of the estimation error. Since KF cannot express an optimal filter performance for non-linear problems, this difficulty is solved by the EKF method, which implements a linearization approach on the current state estimation. This method demands the discretization of the extended induction motor model (Alsofyani et al., 2012; Barut et al., 2003).

$$\hat{x}_e^-(k+1) = A_e \hat{x}_e^-(k) + w(k) = f_e(x_e(k), u_e(k)) + w(k) \quad (14)$$

$$z(k) = Hx_e(k) + v(k) \quad (15)$$

where A_e is the state matrix, H is the measurement matrix, $w(k)$, and $v(k)$ are process and measurement noise, respectively, z is the measurement vector.

The state and measurement vectors are defined as

$$x_e = [I_{s\alpha} \quad I_{s\beta} \quad \psi_{r\alpha} \quad \psi_{r\beta} \quad \omega_m \quad T_L]^T$$

$$z = [I_{s\alpha} \quad I_{s\beta} \quad \omega_m]^T$$

EKF estimates the state variables by using model inputs and measurements. EKF method has the same "prediction-correction" algorithm as the Kalman filter, but linearizes the state and observation matrix at every step of estimation and correction by evaluating the Jacobian matrices and their partial derivatives (Singh and Singh, 2013). The procedure of the EKF algorithm is depicted in Figure 2.

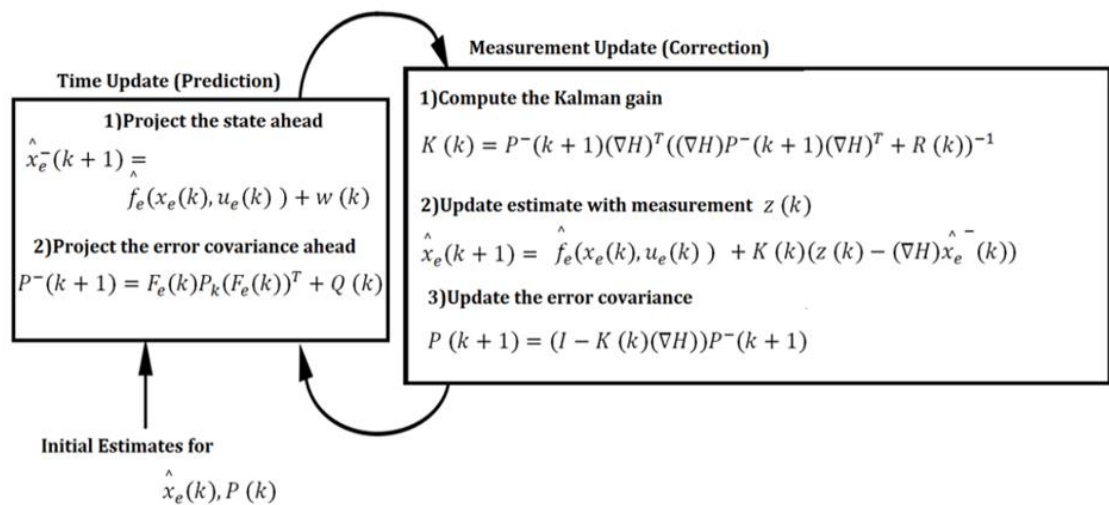


Figure 2. EKF algorithm.

The linearized approximation of the nonlinear model can be implemented by using the current estimation of the states and inputs as

$$F_e(k) = \left. \frac{\partial f_e(x_e(k), u_e(k))}{\partial x_e(k)} \right|_{\hat{x}_e(k), \hat{u}_e(k)} \quad (16)$$

$$F_u(k) = \left. \frac{\partial f_e(x_e(k), u_e(k))}{\partial u_e(k)} \right|_{\hat{x}_e(k), \hat{u}_e(k)} \quad (17)$$

The EKF algorithm can be defined in a recursive form as

$$P^-(k+1) = F_e(k)P_k(k)(F_e(k))^T + F_u(k)D_u(k)(F_u(k))^T + Q(k) \quad (18)$$

$$K(k) = P^-(k+1)H^T(HP^-(k+1)H^T + R(k))^{-1} \quad (19)$$

$$\hat{x}_e(k+1) = \hat{f}_e(x_e(k), \hat{u}_e(k)) + K(k)(z(k) - H\hat{x}_e(k)) \quad (20)$$

$$P(k+1) = (I - K(k)H)P^-(k+1) \quad (21)$$

where I is the symbol of unit matrix.

The values of the covariance matrix of the system noise Q and output noise R, can have a very large impact on the performance of the EKF. Both of these matrices should be determined by focusing the stochastic properties of the corresponding noises. Since the system and measurement noise Q and R have uncertainty, their values can be usually obtained by using the trial-and-error process (Bogosyan et al., 2007).

Q and R can be given for this simulation as:

$$Q = \text{diag}\{2 \times 10^{-4} \quad 2 \times 10^{-4} \quad 2 \times 10^{-6} \quad 2 \times 10^{-6} \quad 10^{-4} \quad 10^{-3}\}$$

$$R = \text{diag}\{0.1 \quad 0.1 \quad 0.1\}$$

State variables $\hat{\psi}_{r\alpha}, \hat{\psi}_{r\beta}$, are hence \hat{T}_m are estimated from the EKF as:

$$\hat{T}_m = \frac{n_p L_m}{L_r'} (I_{s\beta} \hat{\psi}_{r\alpha} - I_{s\alpha} \hat{\psi}_{r\beta}) \quad (22)$$

The electric torque, which has a remarkable error during the transition of the speed command, shares the same pattern as the adhesion force (\hat{F}_a).

RESULT AND DISCUSSION

The presented model is simulated to validate the accuracy. Parameters of the traction system used in the simulation are listed in Table 2.

Table 2. Rated values and parameters of the traction system.

P_N (kW)	f_{sN} (Hz)	N_m (rpm)	U_{sN} (V)	R_s (Ω)	L_r' (H)	r_0 (m)
250	50	2900	750	0,2890	$2,39 \cdot 10^{-3}$	0,34
J_{eqv} (kg. m ²)	B_m ($\frac{N \cdot m}{rad \cdot s}$)	n_p	R_r' (Ω)	L_s (H)	L_m (H)	n_i
0,2463	0,0023	2	0,217	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$1,95 \cdot 10^{-3}$	6,92

The contact ellipse semi-axes, longitudinal Kalker’s coefficient, normal force at the wheel-rail contact, shear modulus are calculated as $a = 1.5 \times 10^{-3} \text{ m}$, $b = 7.5 \times 10^{-3} \text{ m}$, $C_{11} = 4.12$, $F_N = 50 \text{ kN}$, $G = 8.4 \times 10^{10} \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$. The creep curves with respect to the various wheel-rail contact conditions are depicted in Figure 3 and the optimum creepages ξ^* , which corresponds to maximum adhesion forces.

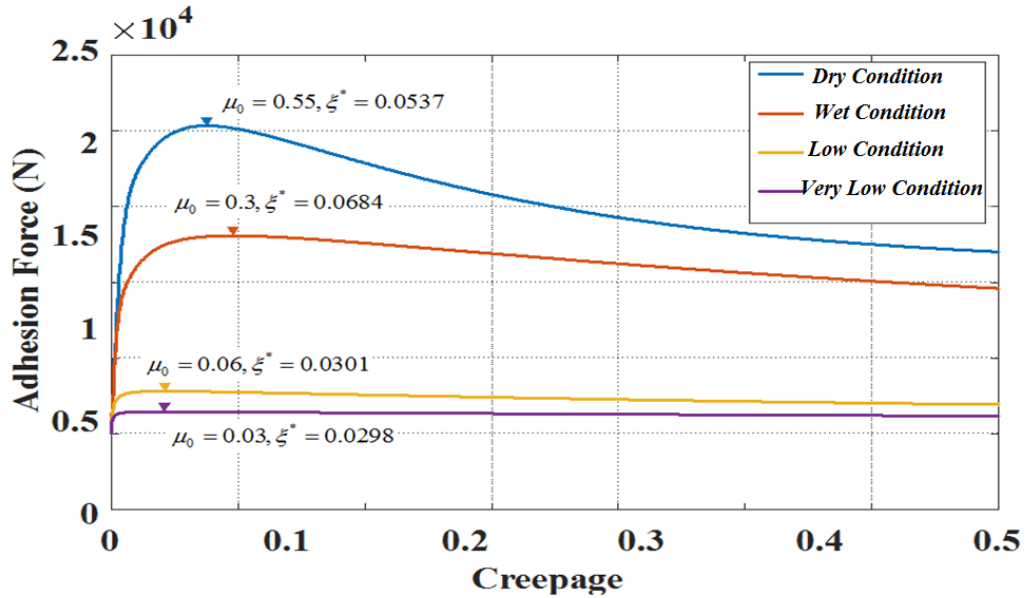


Figure 3. Creepage-adhesion force curves with different contact conditions.

The pattern of the reference motor speed (ω_m^{ref}) is represented in Figure 4.

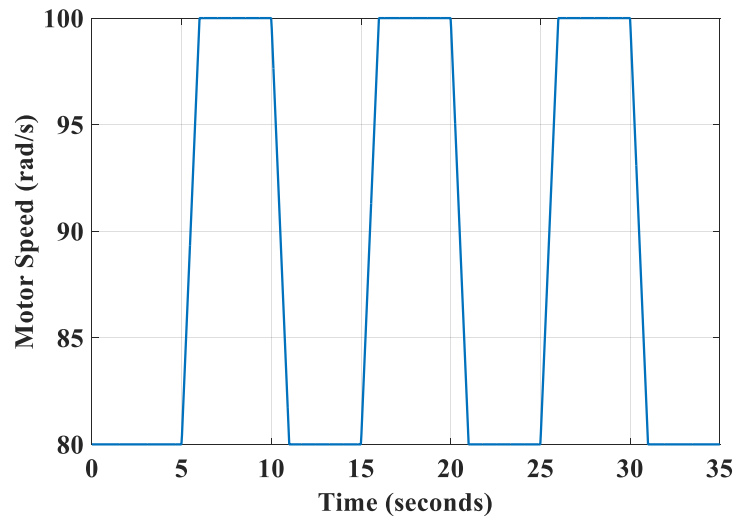


Figure 4. Reference motor speed.

The friction coefficients are designed according to the following equation to simulate dry, wet, low and very low contact conditions between the wheel and the rail.

$$\mu_0 = \begin{cases} 0.55 & t < 10 \\ 0.3 & 10 \leq t < 20 \\ 0.06 & 20 \leq t < 30 \\ 0.03 & 30 \leq t \leq 35 \end{cases}$$

The trajectory of the estimated, actual motor speed ($\omega_m, \hat{\omega}_m$) and speed error (e_{ω_m}) were given in Figure 5, respectively.

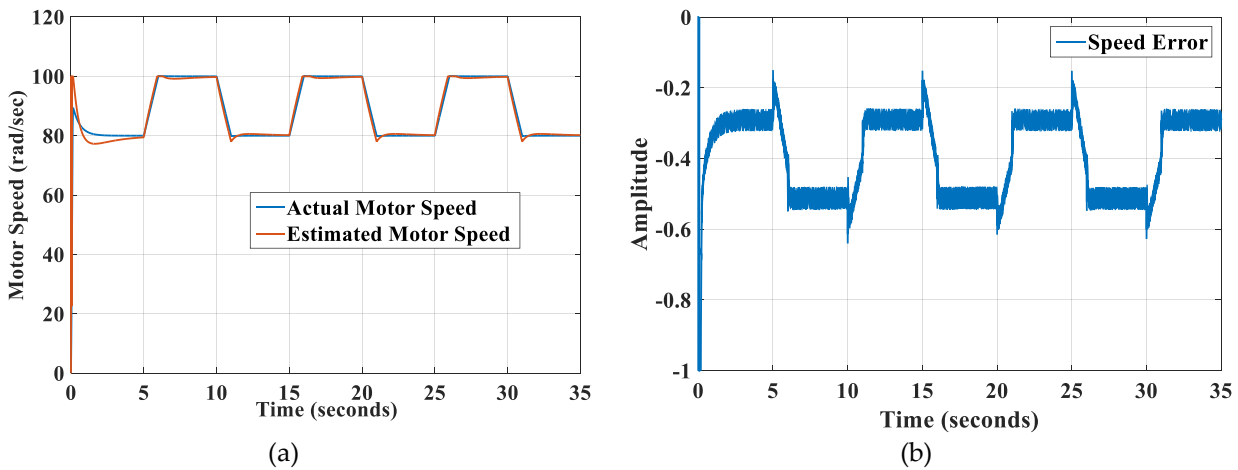


Figure 5. a)Trajectory of the estimated and actual motor speed b)The trajectory of the speed error.

It has been shown that the estimator tracks the speed trajectory with a lower bound of error and converges fast. In Figure 6, the trajectory of the estimated load torque and load torque error (\hat{T}_L, e_{T_L}) is represented, respectively.

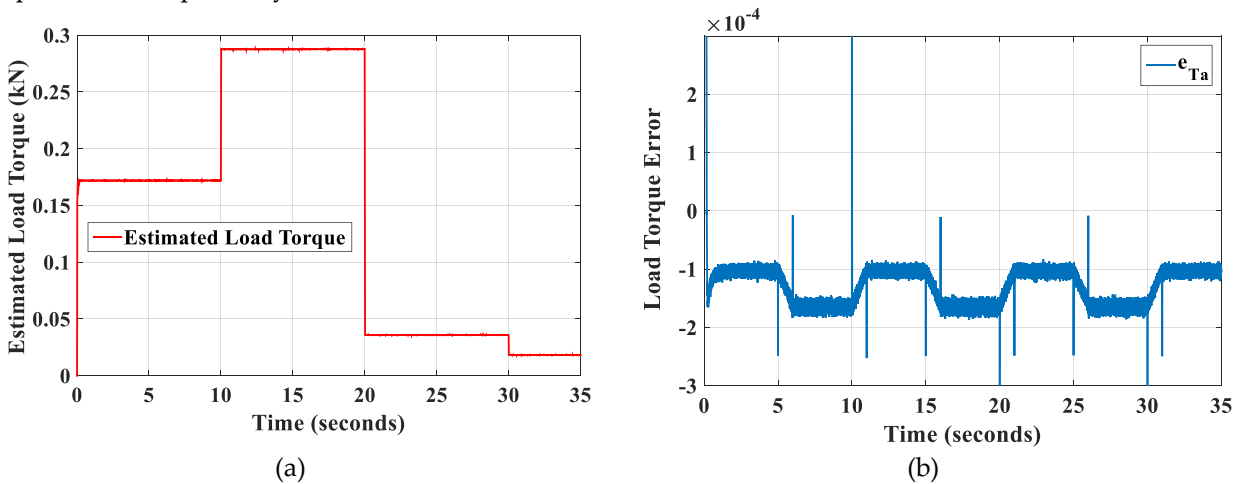


Figure 6. a) The trajectory of the estimated load torque b) The trajectory of the load torque error.

The trajectory of the estimated motor currents ($\hat{I}_{s\alpha}, \hat{I}_{s\beta}$) and current errors ($e_{I_{s\alpha}}, e_{I_{s\beta}}$) are represented in Figure 7 and Figure 8, respectively.

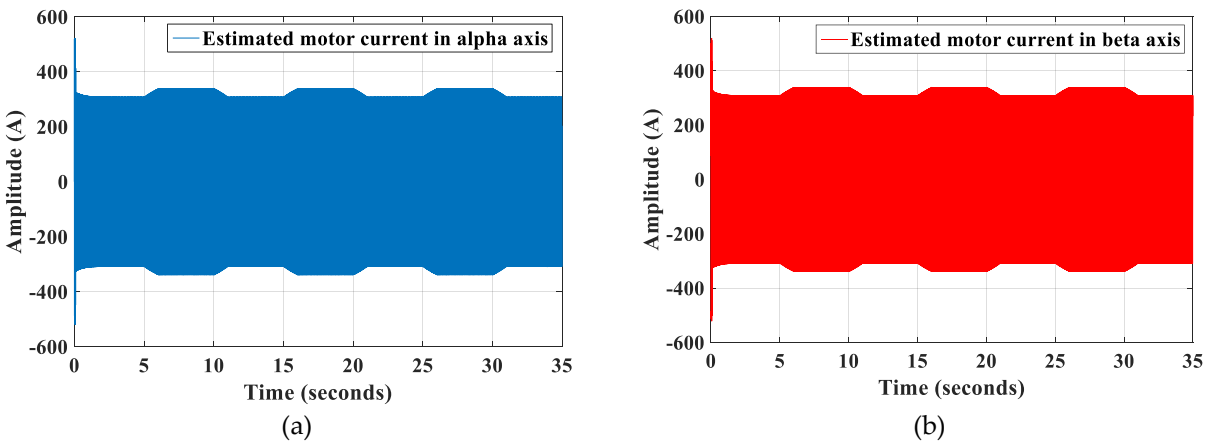


Figure 7. The trajectories of the estimated motor currents a) in α axis b) in β axis.

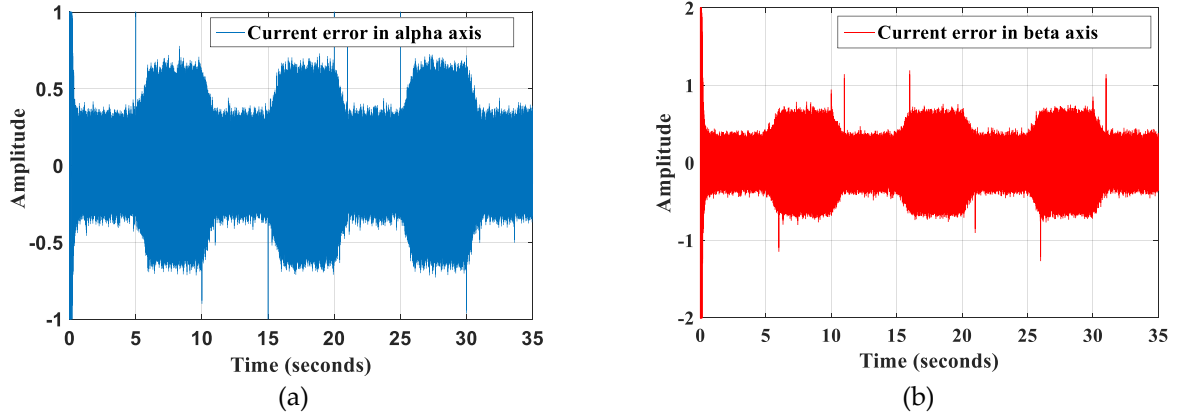


Figure 8. The trajectories of the motor current errors a) in α axis b) in β axis.

The trajectory of the estimated rotor fluxes ($\hat{\psi}_{r\alpha}, \hat{\psi}_{r\beta}$) and flux errors ($e_{\psi_{r\alpha}}, e_{\psi_{r\beta}}$) are represented in Figure 9 and Figure 10, respectively.

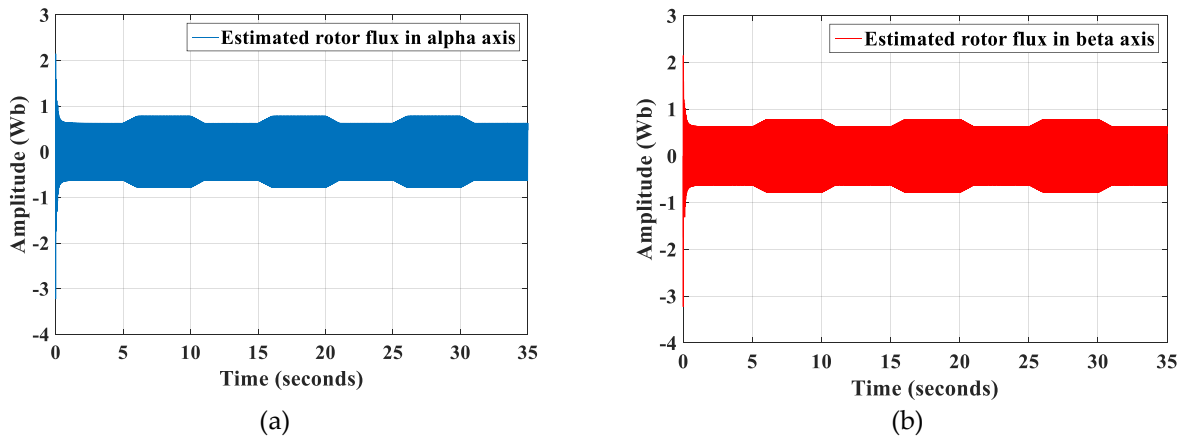


Figure 9. The trajectories of the estimated rotor fluxes a) in α axis b) in β axis.

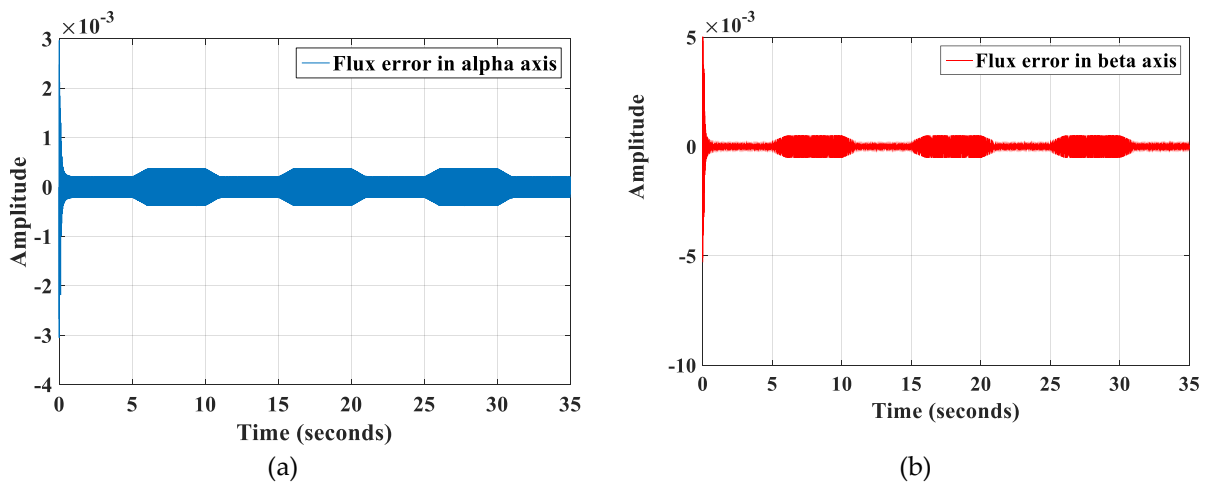


Figure 10. The trajectories of the motor flux errors a) in α axis b) in β axis.

The estimation and actual dynamics of the motor torque (\hat{T}_m, T_m) are given in Figure 11.

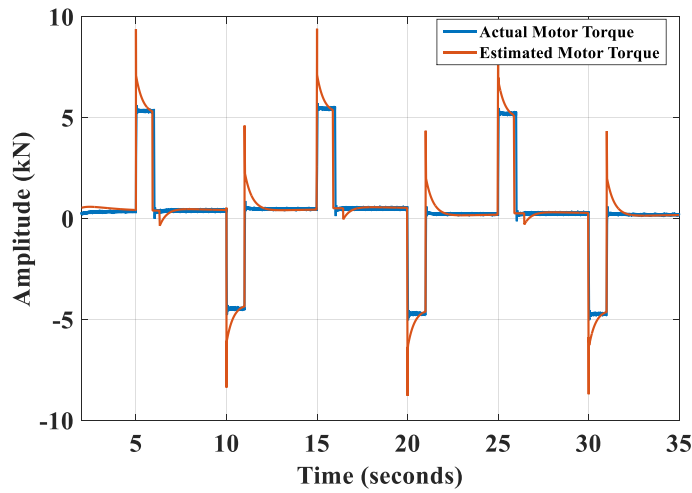


Figure 11. Actual and estimated pattern of the motor torque.

It can be seen that, when the speed command suddenly changes, the error usually changes in a narrow band interval. It can be concluded that the estimator tracks the trajectories of the states with higher precision and converges fast. In Figure 12., the trajectory of the estimated adhesion force (\hat{F}_a) can be derived from the part of the Equation (1) by using estimated load torque data as $\hat{T}_L = \frac{2r_0}{n_i} \hat{F}_a$.

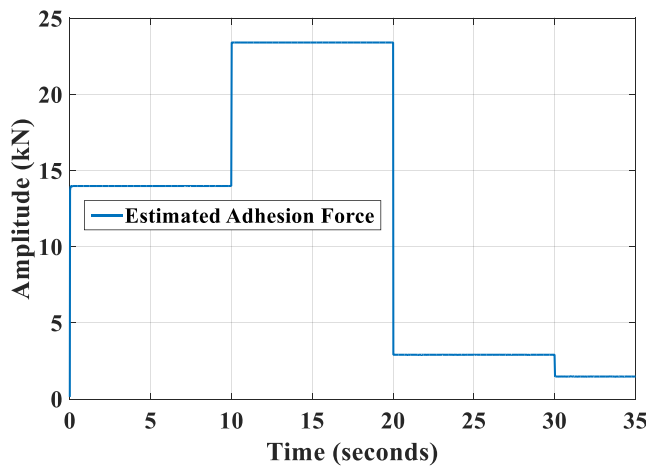


Figure 12. The trajectory of the estimated adhesion force.

With the help of the estimated longitudinal creep force, it is possible to determine the level of the adhesion present, and the effect of the railway vehicle upon the track infrastructure. The performances has been checked into thoroughly at various dynamic operation conditions both simulated and estimated results.

CONCLUSION

The real-time information about the wheel-rail contact has become essential to satisfy the consistent traction and braking performance. A novel method to detect the wheel-rail contact conditions, which are very hard to be known in practical applications, has been investigated in this paper. An extended Kalman filter (EKF) based condition monitoring is proposed to make it an effective re-adhesion controller. The EKF performance was evaluated by comparing the actual and estimated values of load current, motor speed, stator current and rotor currents. Then the electric motor torque and adhesion force were calculated by moving from the estimated data. It was observed that the EKF responded

quickly and estimated with low error value, as the adhesion conditions of the wheel-rail contact varied. Different creep curves, which correspond to different contact conditions are utilized in simulations and the estimation results are found robust and accurate. The primary aim of this kind of estimation of these variables is to design a real-time system, which detects local adhesion conditions, and predicts wear generated. With the help of such an estimator, the performance of the re-adhesion controller can be improved, the creepage is reduced, and maximum traction is achieved. It has been proved that proposed EKF estimator has a superiority in estimation while changing the contact conditions. These predictions can be translated into a useful condition monitoring phase, which seeks to reveal the creep characteristics at low creep values using a scale roller rig, and validation of the techniques generated by a multi-bodied dynamic simulation package such as SIMPACK and data obtained from a full scale railway vehicle. These applications shall be carried out in future works. The lateral dynamics of the vehicle can also be included in the estimator. The estimator performance under varying traction load can also be studied, and several adaptive tuning algorithms should be applied to improve the estimation accuracy and stability with the help of sensors, which perform better resolution, and high sampling rate of the data acquisition system.

REFERENCES

- Alonge, F., D'ippolito, F., 2010, "Extended Kalman Filter for Sensorless Control of Induction Motors", *First Symposium on Sensorless Control for Electrical Drives*, Padova, Italy, 9-10 July 2010.
- Alsofyani, I. M., Idris, N., Sutikno, T., Alamri, Y. A., 2012, "An optimized Extended Kalman Filter for Speed Sensorless Direct Torque Control of An Induction Motor", *IEEE International Conference on Power and Energy*, Kota Kinabalu, Malaysia, 2-5 December 2012.
- Barut, M., Bogosyan, O., Gokasan, M., 2002, "EKF Based Estimation for Direct Vector Control of Induction Motors", *IEEE 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society*, Sevilla, Spain, 5-8 November 2002.
- Barut, M., Bogosyan, S., Gokasan, M., "EKF Based Sensorless Direct Torque Control of IMs in The Low Speed Range", *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2005, ISIE 2005, Dubrovnik, Croatia, 20-23 June 2005.
- Barut, M., Bogosyan, S., Gokasan, M., 2007, "Speed-Sensorless Estimation for Induction Motors Using Extended Kalman Filters", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 54(1), pp. 272-280.
- Barut, M., Gokasan, M., Bogosyan, O., 2003, "An extended Kalman Filter Based Sensorless Direct Vector Control of Induction Motors", *IECON'03. 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IEEE Cat. No.03CH37468)*, Roanoke, VA, USA, 2-6 November 2003.
- Bogosyan, S., Barut, M., Gokasan, M., 2007, "Braided Extended Kalman Filters for Sensorless Estimation In Induction Motors at High-Low/Zero Speed", *IET Control Theory & Application*, Vol. 1(4), pp. 987-998.
- Cai, L., Zhang, Y., Zhang, Z., Liu, C., Lu, Z., 2003, "Application of Genetic Algorithms in EKF for Speed Estimation of an Induction Motor", *Proc. on IEEE Power Electronics Specialist Conference*, Acapulco, Mexico, Vol. 1, pp. 345-349, 15-19 June 2003.
- Charles, G., Goodall, R., 2006, "Low Adhesion Estimation", *IET International Conference on Railway Condition Monitoring*, Birmingham, UK 29-30 Nov. 2006
- Gaspar, P., Szabo, Z., Bokor, J., 2006, "Observer Based Estimation of The Wheel-Rail Friction Coefficient", *IEEE Conference on Computer Aided Control System Design*. Munich, Germany 4-6 Oct. 2006
- Hussain, I., Mei, T. X., Ritchings, R. T., 2013, "Estimation of Wheel-Rail Contact Conditions and Adhesion Using The Multiple Model Approach", *Vehicle System Dynamics*, Vol. 51(1), pp. 32-53.

- Iwnicki, S., 2003, "Simulation of Wheel-Rail Contact Forces", *Fatigue Fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol. 26(10), pp. 887-900.
- Kalker, J., 1968, "On The Rolling Contact of Two Elastic Bodies in The Presence of Dry Friction", *Wear*, Vol. 11(4), pp. 303.
- Kawamura, A., Takeuchi, K., Furuya, T., Cao, M., Takaoka, Y., Yoshimoto, K., 2003, "Measurement of Tractive Force and the New Maximum Tractive Force Control by the Newly Developed Tractive Force Measurement Equipment", *IEEJ Transactions on Industry Applications*, Vol. 123(8), pp. 885-893.
- Matsumoto, Y., Eguchi, N., Kawamura, A., 2001, "Novel Re-Adhesion Control for Train Traction System of The "Shinkansen" with The Estimation of Wheel-to-Rail Adhesive Force", *IECON'01, 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (Cat. No.37243)*, Denver, CO, USA, Vol. 2, pp. 1207-1212 29 Nov.-2 Dec. 2001
- Mei, T., Hussain, I., 2010, "Detection of Wheel-Rail Conditions for Improved Traction Control", *IET Conference on Railway Traction Systems*, Birmingham, UK 13-15 April 2010
- Polach, O., 1999, "A Fast Wheel-Rail Forces Calculation Computer", *Veh. Syst. Dyn. Suppl*, 1999, Vol. 33, pp. 728-739.
- Radionov, I. A., Mushenko, A. S., 2015, "The method of estimation of adhesion at "wheel-railway" contact point", *2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, Omsk, Russia, 21-23 May 2015.
- Rizzo, R., Iannuzzi, D., 2002, "Indirect Friction Force Identification for Application in Traction Electric Drives", *Mathematics and Computers in Simulation*, Vol. 60(3-5), pp.379-387.
- Shi, K., Chan, T., Wong, Y., Ho, S., 2002, Speed Estimation of An Induction Motor Drive Using an Optimized Extended Kalman Filter", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 49(1), pp.124-133.
- Singh, K., Singh, M., 2013, "Design of Kalman Filter for Induction Motor Drive" Students Conference on Engineering and Systems (SCES), Allahabad, India, 12-14 April 2013.
- Wang, S., Xiao, J., Huang, J., Sheng, H., 2016, "Locomotive Wheel Slip Detection Based on Multi-Rate State Identification of Motor Load Torque", *Journal of the Franklin Institute*, 2016, Vol. 353(2), pp. 521-540.
- Ward, C. P., Goodall, R. M., Dixon, R., 2011, "Contact Force Estimation in the Railway Vehicle Wheel-Rail Interface", *IFAC Proceedings Volumes*, Vol. 44(1), pp. 4398-4403.
- Ward, C., Goodall, R., Dixon, R., Charles, G., 2012, "Detection of Low Adhesion in The Railway Vehicle Wheel/Rail Interface: Assessment of Multi-Bodied Simulation Data, Proceedings of 2012 UKACC International Conference on Control, Cardiff, UK, 3-5 September 2012.
- Zhao, Y., Liang, B., 2013, "Re-adhesion Control for A Railway Single Wheelset Test Rig Based on The Behaviour of The Traction Motor", *Vehicle System Dynamics*, Vol. 51(8), pp. 1173-1185.
- Zhao, Y., Liang, B., Iwnicki, S., 2012, "Estimation of the Friction Coefficient Between Wheel and Rail Surface Using Traction Motor Behaviour", *Journal of Physics: Conference Series*, 2012, Vol. 364, 012004.
- Zhao, Y., Liang, B., Iwnicki, S., 2014, "Friction Coefficient Estimation Using an Unscented Kalman Filter", *Vehicle System Dynamics*, Vol. 52(Sup1), pp. 220-234.

FREKANS ANALİZİNDE ALTERNATİF BİR PARAMETRE TAHMİN METODU

¹Ömer Levend AŞIKOĞLU

¹Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, 35100 Bornova, İzmir

¹omer.asikoglu@ege.edu.tr

(Geliş/Received: 21.02.2017; Kabul/Accepted in Revised Form: 02.06.2017)

ÖZ: Taşkınlar, sağanaklar ve kurak akımlar gibi ekstrem hidrolojik olayların frekans analizi, su kaynakları sistemlerinin planlanması, boyutlandırılması ve işletilmesi açısından büyük önem arz ettiği gibi, bu ekstrem olayların ekonomik ve sosyal açıdan olumsuz sonuçlarından kaçınma konusunda da büyük fayda sağlamaktadır. Frekans analizinin önemli adımlarından biri uygun dağılım modelinin parametrelerinin tahmin edilmesidir. Bu makalede, merkezi eğilimin robust (sağlam) bir parametresi olan M (medyan), istatistiksel saçılmayı gösteren robust parametre IQR (kuartiller arası uzaklık) ve kuartil çarpıklık katsayısı QC_s istatistiklerini kullanan alternatif bir parametre tahmin metodu (RİM) (Robust İstatistikler Metodu) anlatılmaktadır. Çalışma kapsamında, özellikle hidrolojik frekans analizinde yaygın bir şekilde kullanılan altı farklı olasılık dağılım fonksiyonuna (Normal, 2 ve 3 parametrelili lognormal, Gamma, Gumbel, ve genelleştirilmiş ekstrem değer GEV) yer verilmiştir. Medyan ve kuartiller arası uzaklık gibi robust istatistiklerin kullanılmasının, aykırı gözlemlerin varlığından veya değişiminden kaynaklanan etkilere karşı daha güvenli parametre tahmini sağlayacağı düşünülmektedir. Çalışmada sayısal örnekler olarak, altı yağış istasyonunun 24 saat süreli yıllık maksimum yağış şiddeti verileri kullanılmıştır. Son olarak, Robust İstatistikler Metodu ile elde edilen parametreler kullanılarak hesaplanan belli olasılıklı tahminler (kuantiller), Maksimum Olabilirlik Metodu, Momentler Metodu ve Olasılık Ağırlıklı Momentler Metodu gibi geleneksel parametre tahmin metotlarıyla elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Hidrolojik Frekans Analizi, Parametre Tahmin Metotları, Robust İstatistikler

An Alternative Parameter Estimation Method in Frequency Analysis

ABSTRACT: Frequency analysis of extreme hydrologic events such as floods, storms, and droughts provides important information on planning, design, and management of water resources systems, and this information is helpful in avoiding negative economic and social consequences. An important step of the frequency analysis is to estimate the appropriate distribution's parameters. This paper shows the application of an alternative parameter-estimation method, RSM (Robust Statistics Method), which calculates the robust measure of central tendency M (median), statistical dispersion IQR (interquartile range) and quartile coefficient of skewness QC_s ; and uses these robust statistics by the estimation of the parameters of various distribution functions. Six probability distributions (Normal, 2- and 3- parameter lognormal, Gamma, Gumbel and generalized extreme value GEV), which are commonly used in hydrological frequency analysis were discussed within the study. The advantage of using robust statistics like median and interquartile range in parameter estimation is to ensure the resistance to the effect of a change in value or presence of outlying observations. Numerical analyses as part of this research were carried out on the annual maximum 24h rainfall intensities of rainfall gages in the Aegean Region (Turkey). Eventually, the quantile estimations calculated with the parameters of Robust Statistics Method were compared with the results of conventional methods like Maximum Likelihood, Method of Moments, and Probability-Weighted Moments.

Key Words: Frequency Analysis, Parameter Estimation Methods, Robust Statistics

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Sağanaklar ve bunların sonucu olan taşkınlar gibi ekstrem olaylar, binlerce insanın ölümüne sebep olabileceği gibi, milyonlarca liralık da maddi hasara sebep olabilmektedirler. Ekstrem kurak akımlar ve kirleticiler de ekonomik, sosyal ve çevresel etkilere yol açabilirler. Hidrolojik çalışmalar, bu tip olayların ortaya çıkma olasılığını veya tekerrürünü yansıtmalıdır.

Frekans analizinin öncelikli amacı olasılık dağılımlarını kullanarak ekstrem olayların büyüklükleri ile ortaya çıkma sıklıklarını ilişkilendirmektir (Chow ve diğ., 1988). Frekans analizinde, belli bir periyotta ölçülmüş meteoroloji veya akım gözlemlerinin bağımsız ve aynı dağılıma ait oldukları varsayılmaktadır.

Frekans analizi üç temel adımdan oluşmaktadır:

- i. İncelenen olaya ait basit ve mantıklı bir olasılık dağılım modelinin tanımlanması,
- ii. Tanımlanan dağılım modelinin parametrelerinin tahmini ve
- iii. İncelenen olaya ait riskin uygun bir hassasiyet düzeyinde tahmin edilmesi.

Rastgele değişkenin toplumunu tümüyle gözlemlemek mümkün olmadığından, olasılık dağılımının eldeki örnekten elde edilen dağılıma eşdeğer olduğu varsayılmaktadır. Bu dağılımların performansı farklı istatistiksel testler kullanılarak değerlendirilmektedir (Rao ve Hamed, 2000).

Öte yandan her teorik olasılık dağılım fonksiyonunun belli sayıda parametresi bulunmaktadır ve bu parametreler eldeki örnekten çeşitli metotlarla elde edilmektedir. Bu metotların başlıcaları Momentler metodu (MOM), Maksimum Olabilirlik metodu (MLM), Olasılık Ağırlıklı Momentler metodu (PWM), En Küçük Kareler metodu (LSM) ve Genelleştirilmiş Momentler metodu (GMM) gibi metotlardır. Pratikte en çok kullanılan üç tanesi Momentler metodu (MOM), Maksimum Olabilirlik metodu (MLM) ve Olasılık Ağırlıklı Momentler metodudur (PWM), (Rao ve Hamed, 2000).

Momentler metodunun (MOM) kim tarafından geliştirildiğini söylemek zor da olsa, Johan Bernoulli (1667-1748) bu metodu çalışmalarında kullanan ilk araştırmacılardan biridir (Van Gelder, 2004). MOM metodu oldukça basit bir parametre tahmin metodudur. Genellikle MOM metoduyla elde edilen parametre tahminleri, bilhassa çok parametrelili dağılımlar (üç veya daha fazla) için, MLM metoduyla elde edilen tahminler kadar etkili olmamaktadır. Bunun sebebi, yüksek dereceden momentlerin küçük örneklerde oldukça taraflı olmalarındandır (Rao and Hamed, 2000).

Maksimum Olabilirlik metodu (MLM) ile ilgili en eski bilgiler Daniel Bernoulli (1700-1782) tarafından aktarılmıştır (Van Gelder 2004). MLM diğer metotlarla karşılaştırıldığında tahmin edilen parametrelerde en küçük örnekleme varyansını sağlamakta ve bu bakımdan en etkili metot sayılmaktadır. Yanlı tahminler vermesi MLM' nin zayıf yönü olarak gösterilmekle birlikte, bu sapmalar düzeltilenmektedir. Küçük örneklerde ve bilhassa çok parametrelili dağılımlarda maksimum olabilirlik tahminlerini elde etmek imkânsız olabilmektedir.

Olasılık ağırlıklı momentler (PWM) metodu (Greenwood ve diğ., 1979; Hosking, 1986) MLM tahminleriyle kıyaslanabilecek derecede tahminler vermektedir. Bazı durumlarda parametre tahmin prosedürü daha az karmaşık ve hesaplamalar daha basittir. PWM metodunun zaman zaman MLM tahminlerinden daha doğru parametre tahminleri verdiği de ifade edilmiştir (Landwehr ve diğ., 1979).

Literatürde hidrolojik olayların frekans analizinde, farklı olasılık dağılım modellerinin ve farklı parametre tahmin metotlarının seçimi ve kullanımı konusunda çok sayıda çalışma yapılmıştır.

Strupczewski ve diğ. (2002) çalışmalarında Polonya'da yer alan 39 akarsuya ait 70 yıllık taşkın verilerini incelemişlerdir. Çalışmada, büyük olasılıklarda ve momentlerde yanlı olasılık dağılım fonksiyonu seçiminde ortaya çıkacak asimptotik sapmalar incelenmiş; parametre tahmininde maksimum olabilirlik (MLM), momentler metodu (MOM), L-Momentler metodu (LMM) ve en küçük kareler metodu (LSM) kullanılmıştır. İlk üç tahmin yöntemi Lognormal ve Gamma dağılımlarıyla kullanılarak olasılık dağılımları için alternatif bir grup oluşturulmuştur. Nispi hatanın MOM için en küçük, MLM için en büyük olduğu, L-Momentler (LMM) için ise ikisi arasında kaldığı saptanmıştır.

Kumar ve diğ. (2003) Orta-Ganga ovası için L-Moment diyagramlarını kullanarak frekans analizi yapmışlar, çalışma alanı için GEV dağılımını en güçlü dağılım olarak belirlemişlerdir. Bölgesel olasılık

dağılım fonksiyonunun belirlenmesinde tüm parametre tahmin metotlarını kapsayan "FLOOD" adlı yazılım kullanılmıştır. Van Gelder, (2004) çalışmasında farklı parametre tahmin metotlarının (Momentler metodu (MOM), Maksimum Olabilirlik metodu (MLM), Olasılık Ağırlıklı Momentler metodu (PWM), L-Moment metodu (LMM), En Küçük Kareler metodu (LSM), Minimum Çapraz Entropi metodu, Bayes Noktasal Tahmin metodu) kapsamlı bir karşılaştırmasını yapmıştır. Üstel dağılım simülasyonuna dayanarak elde edilen sonuçlara göre, Momentler metodu, Maksimum Olabilirlik metodu ve Bayes Noktasal Tahmin metodu belirgin bir biçimde En Küçük Kareler metodundan daha düşük tahminler vermektedirler.

Panda ve diğ. (2005) Doğu Hindistan' da bulunan Mahandi havzasında bulunan 15 istasyonun maksimum akım verilerine frekans analizi uygulamıştır. Çalışmada kullandıkları yazılımla, Normal, 2- ve 3 parametrelili Lognormal, Gamma, Gumbel (max.), Gumbel (min), Weibull (WBL), Ekstrem değer Tip-III (EV3), GEV, Pearson (P), Log-Pearson (LP), Genelleştirilmiş Pareto (GPAR) ve Üstel (EXP) dağılımlarını değerlendirmişlerdir. Program, Momentler metodu (MOM), Maksimum Olabilirlik metodu (MLM), Olasılık Ağırlıklı Momentler metodu (PWM) ve Maksimum Entropi metodu gibi parametre tahmin metotlarından birini seçme opsiyonunu tanımaktadır. Çalışmada, tüm olasılık dağılım fonksiyonları ve parametre tahmin metotları arasından en iyi kombinasyonu GEV dağılımı ve PWM metodu vermiştir. İki parametrelili dağılımlar arasında (MOM tahmin metoduyla) en iyi sonucu Weibull dağılımının sağladığı tespit edilmiştir. Ayrıca PWM metodunun, bir veri setini olasılık dağılımına uyarlama konusunda en iyi parametre tahmin metodu olduğu gösterilmiştir.

Opere ve diğ. (2006), Ekvatorial Nil havzası ülkelerinin yer aldığı FRIEND/Nil projesi kapsamında GEV, Gumbel, Lognormal ve Log-Pearson Tip-3 dağılımlarını yıllık maksimum akım verilerine uyarlamışlardır. Olasılık dağılımlarının uyarlanmasında Momentler metodu (MOM), Maksimum Olabilirlik metodu (MLM), ve Olasılık Ağırlıklı Momentler metodu (PWM) kullanılmıştır. Bunun yanı sıra Q-Q noktalama analizinin sonuçları Ekvatorial Nil havzası taşkınlarına en uygun dağılım modeli olarak Gumbel dağılımını göstermiştir. Çoğu durum için Q-Q noktalama metodunun MOM, ML ve PWM gibi geleneksel parametre tahmin metotlarıyla çok yakın sonuçlar verdiği saptanmıştır.

Jee ve diğ. (2008), Kore'deki proje yağışlarının tahmin edilmesinde FARD adlı paket program ile frekans analizi yapmışlardır. Bu program, üç farklı parametre tahmin metodunu (MOM, MLM ve PWM) ve dokuz farklı olasılık dağılım fonksiyonunu (Normal, LN2, Gamma, LP3, GEV, Gumbel, Log-Gumbel, Weibull ve Wakeby) test ederek olası yağışı tahmin etmektedir. Çalışmada, Kore'de bulunan Daegu, Busan ve Andong istasyonlarının ve 8 ülkeden oluşan Asya Pasifik Friend ülkelerinde bulunan 40 istasyonun yağış verilerinin frekans analizi yapılmıştır. Sonuç olarak, Kore'deki istasyonlar için Gumbel dağılımı ve PWM metodu en uygun kombinasyonu sağlamıştır. Asya Pasifik Friend ülkeleri için de PWM metodu ve farklı olasılık dağılım fonksiyonları uygulanmıştır.

Saf (2009), Batı Akdeniz Havzalarında 47 istasyondan taşkın frekans tahminleri elde etmeyi amaçlamıştır. Bölgesel taşkın frekansı tahminleri üç alt bölge için yedi farklı olasılık dağılım modeli kullanılarak yapılmıştır (GLO, GEV, N, P3, GPA, Wakeby and Kappa). L-moment uygunluk istatistiği, Antalya ve Alt Batı Akdeniz alt bölgelerinde en uygun olasılık dağılımı olarak P3 dağılımını, Üst Batı Akdeniz alt bölgesi için ise GLO dağılımını göstermiştir.

Haktanır ve diğ. (2010) 5dk. – 24sa. lik yıllık maksimum yağış serilerinin frekans analizinde (1) Momentler, (2) Maksimum Olabilirlik, (3) Olasılık ağırlıklı momentler (PWM) ve (4) Kendinden tanımlı PWM parametre tahmin metotlarını kullanmışlar ve Gumbel, GEV, 3-parametrelili lognormal (LN3), Pearson-3 ve Log-Pearson-3 olasılık dağılım fonksiyonlarını verilere uyarlamışlardır. Çalışma sonucunda, tek bir olasılık dağılımının diğer dağılımlara bariz bir üstünlük sağlayamadığı vurgulanmış, bununla birlikte GEV dağılımının Türkiye maksimum yağışlarına iyi uyum sağladığı belirtilmiştir.

Rahman ve diğ. (2013) Avustralya'daki pik akım serilerine dayanan 15 frekans dağılımının uygunluğunu incelemeye çalışmışlar, en uygun olasılık dağılımın belirlenmesinde Anderson-Darling testi, Kolmogorov-Smirnov testi, bayes bilgi kriteri (BIC), Akaike bilgi kriteri (AIC) ve L-Moment oranı diyagramlarını kullanmışlardır. Avustralya'nın bütün eyaletlerinde pik akımlar için tek bir ana frekans

dağılım modeli tespit edilemediğini, bununla birlikte, P3, GEV ve GPA dağılımlarının en uygun dağılımlar olarak ortaya çıktığını belirtmişlerdir.

Atroosh and Moustafa (2012) Wadi Bana akışlarının dağılımını modellemek için Gamma, Weibull, Pearson 6, Rayleigh, Beta, Kumaraswamy ve Üstel dağılımlarını test etmişlerdir. En uygun olasılık dağılımını belirlemek amacıyla Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling ve Ki-kare testlerini kullanmışlardır. Gerek yaz gerekse sonbahar mevsimleri için Yemen'in Abyan Deltasında yer alan Wadi Bana akımlarına en uygun dağılımın Gamma olduğu, bunu Weibull dağılımının takip ettiği saptanmıştır.

Salinas ve diğ. (2014) 15 Avrupa ülkesinde 4.105 istasyonun yıllık en büyük akımlarından oluşan bir veri tabanı kullanarak Avrupa ölçeğinde bir ana olasılık dağılım modeli bulmaya çalışmışlardır. L-Moment oranı diyagramlarıyla GEV dağılımının Avrupa pik akımları için potansiyel bir ana olasılık dağılımı potansiyeli taşıdığını saptamışlar, ancak yapılan Monte Carlo simülasyonları sonrasında Avrupa pik akımlarının tek bir olasılık dağılım modeliyle temsil edilemediği sonucuna ulaşmışlardır.

Ahmad vd. (2016) Pakistan'da taşkın frekansı analizi için yıllık pik akım serilerinin en uygun olasılık dağılımını belirlemek için çeşitli parametre tahmin yöntemlerini (L-Momentler, TL-Momentler, Maksimum Olabilirlik) karşılaştırmışlardır. En uygun olasılık dağılımı olasılık noktalama korelasyon katsayısı (PPCC) testi, Anderson Darling (AD) testi ve her bir istasyon için L-momentleri diyagramı kullanılarak belirlenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, istasyonların çoğu için en uygun olasılık dağılımı olarak GPA belirlenmiş, bunu sırasıyla GLO ve GEV izlemiştir.

Bu çalışmada önerilen Robust İstatistikler Metodu (RİM), olasılık dağılım fonksiyonunun parametrelerini tahmin etmede alternatif bir metot olarak öne sürülmüştür. RİM, farklı olasılık dağılım fonksiyonlarının parametrelerini tahmin ederken medyan (M), kuantiller arası uzaklık (IQR) ve kuantil çarpıklık katsayısı (QC_3) gibi robust istatistikleri kullanmaktadır. Farklı formlara sahip olasılık fonksiyonlarının merkez değerini belirlemede, medyanın en uygun istatistik olduğu ifade edilebilmektedir. Medyan, özellikle veri dizilerindeki aykırı değerlerden etkilenmemesi açısından robust (sağlam) bir istatistik olarak tanımlanmaktadır (Reimann ve diğ., 2008). IQR merkez değer etrafındaki saçılımı güçlü bir biçimde tanımlamakta, çarpık ve aykırı değerlere sahip veri dizilerin incelenmesinde robust bir istatistik olarak öne çıkmaktadır.

Çalışma kapsamında olasılık dağılım modellerinden Normal, 2- ve 3-parametrelili lognormal, Gamma, Gumbel ve GEV dağılımları ele alınacaktır. Frekans analizinde belli olasılıklara karşı gelen tahminler, Robust İstatistikler Metodu (RİM), Momentler Metodu (MOM), Maksimum Olabilirlik Metodu (MLM) ve Olasılık Ağırlıklı Momentler (PWM) metodu ile elde edilen parametreler kullanılarak hesaplanacaktır. Belli olasılıklı tahminlerin başarısı, her yöntem için hem grafiksel olarak hem de kuadratik ortalama hataları (root mean square error: RMSE) yöntemleriyle değerlendirilecektir.

YÖNTEMLER (METHODS)

Olasılık Dağılım Fonksiyonları (Probability Distribution Functions)

Bir veri dizisine olasılık dağılımı uyarlamak, incelenen olayın olasılığını belirlemede veya belli bir sıklıkta (veya periyotta) görülecek olayın büyüklüğünü belirlemede büyük önem taşımaktadır.

İncelenen olayın karakteristiklerine veya dağılımına bağlı olarak, gözlenen olayın frekansını temsil etmek üzere pek çok olasılık dağılım fonksiyonu bulunmaktadır. Olasılık dağılımının uyumu, başarılı tahminler yapılması açısından önem arz etmektedir.

Rao ve Hamed (2000), hidrolojik frekans analizinde yaygın olarak kullanılan çoğu olasılık dağılımının matematiksel yapısıyla ilgili kapsamlı bir çalışma sunmuşlardır. Bu çalışma kapsamında, ilgili olasılık dağılım modellerinden altı tanesi ele alınacaktır (Normal, 2- ve 3-parametrelili lognormal, Gamma, Gumbel ve GEV).

Parametre Tahmin Metotları (Parameter Estimation Methods)

Klasik parametre tahmin metotları (Conventional parameter estimation methods)

Maksimum olabilirlik yöntemi (MLM) frekans analizinde kullanılan en klasik parametre tahmin yöntemlerinden biridir. Olasılık dağılım fonksiyonu ($f(x)$) bilinen bir rastgele değişkenin X olabilirlik fonksiyonu aşağıdaki gibidir:

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^n f(x_i|\theta) \quad (1)$$

Eşitlikte θ , bilinmeyen parametrelerin vektörünü, n ise rastgele değişkenin örnek büyüklüğünü ifade etmektedir. Burada amaç elde edilen veri seti için olabilirlik fonksiyonunu $L(\theta)$ maksimize etmektir. Parametre sayısı m olmak üzere, olabilirlik fonksiyonu $L(\theta)$ nın m adet kısmi türevi alınarak bunlar sıfıra eşitlenecektir. Bu eşitliklerin çözülmesiyle θ parametre setinin maksimum olabilirlik (ML) tahminleri elde edilecektir. Bunlar genellikle iteratif yapısı nedeniyle çözümü karmaşık algoritmalar gerektiren, doğrusal olmayan eşitliklerdir (Haktanır, 1991; Kottegoda ve Rosso, 2008).

Momentler yöntemi (MOM) de yine sık kullanılan ve oldukça pratik bir parametre tahmin yöntemidir. Bu yöntemde, m -parametrelili bir dağılımda dağılımın ilk m momentleri, ilk m örnek momentine eşitlenmektedir. Bu m adet eşitliğin birlikte çözülmesiyle parametreler elde edilmektedir.

Olasılık ağırlıklı momentler (PWM) de olasılık yoğunluk fonksiyonunu tanımlamada kullanılan bir diğer yaygın metottur. Rastgele bir değişkenin olasılık ağırlıklı momentleri Greenwood ve diğ. (1979) tarafından aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

$$M_{ijk} = E\left[X^i \{F_x(x)\}^j \{1 - F_x(x)\}^k\right] \quad (2)$$

Burada $F(\cdot)$ rastgele değişkenin kümülatif fonksiyonu, $E[\cdot]$ ise parantez içerisindeki ifadenin beklenen değeridir. Klasik anlamda (2) eşitliği $j=k=0$ olmak üzere i . sıradaki momentleri verir. Genellikle uygulamada $i=1$ olarak kabul edilir ve $k=0$ ya da $j=0$ dır. Momentler metodunda olduğu gibi olasılık ağırlıklı momentlerin (PWM) ilk m örneği, (2) eşitliğinden elde edilen ilk m toplum momentine eşitlenmektedir. Bu m adet eşitliğin birlikte çözülmesiyle dağılımın parametreleri elde edilmektedir.

Robust istatistikler metodu (RİM) (Robust statistics method)

Hidrolojik veriler sıklıkla gözlem dizisindeki genel yığılmanın oldukça uzağında kalan aykırı değerler ihtiva ederler. Dizilerdeki aykırı değerlerin sebebi ölçüm ya da kayıt hataları olabildiği gibi, gerçekten meydana gelmiş anormal bir olay da olabilir. Bilhassa küçük örneklerde aykırı değerler, önemli istatistiklerin gözlemlerin büyük bir kısmını temsil eden değerlerden uzaklaşmasına neden olmaktadır. Bu problemde, aykırı değerlere karşı robust (sağlam, dayanıklı) istatistiklerin kullanılması yoluyla kaçınılabılır (Stephenson, 2005).

Bu çalışmada önerilen ve alternatif bir parametre tahmin yöntemi olan Robust İstatistikler Metodunda (RİM), önce veri dizisinde %25, %50, %75 olasılık değerlerine denk gelen kuantiller ($x_{0.25}$, $x_{0.50}$, $x_{0.75}$) kullanılarak M (medyan), IQR (kuantiller arası uzaklık) ve QC_s (kuantil çarpıklık katsayısı) aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$M = x_{0.5} \quad (3)$$

$$IQR = x_{0.75} - x_{0.25} \quad (4)$$

$$QC_s = \frac{(x_{0.75} - x_{0.5}) - (x_{0.5} - x_{0.25})}{x_{0.75} - x_{0.25}} = \frac{x_{0.75} + x_{0.25} - 2M}{IQR} \quad (5)$$

Bu istatistikler ile olasılık dağılımlarının parametreleri arasındaki matematiksel ifadeler bir sonraki bölümde verilmektedir.

Farklı olasılık dağılım model parametrelerinin Robust İstatistikler Metodu ile tahmini (The parameter estimation of different probability distribution models with robust statistics method)

Bu çalışma kapsamında altı adet olasılık dağılımı (Normal, 2- ve 3-parametrelili lognormal, Gamma, Gumbel ve GEV) ele alınmıştır.

I. Normal Dağılım

Yıllık yağış gibi birbirinden bağımsız olayların toplamından oluşan hidrolojik değişkenler, normal dağılımı izleme eğilimindedirler. Verilen bir P olasılığı için normal dağılımın kuantil fonksiyonu x_p şu şekilde tanımlanır:

$$x_p = \mu_x + z_p \cdot \sigma_x \quad (6)$$

Burada μ_x ve σ_x dağılım parametreleri, z_p ise P aşılmama olasılığına karşılık gelen standart normal değişkendir. Normal dağılımın kuantil fonksiyonunu medyan ve kuartiller arası uzaklık için tanımlayacak olursak,

$$M = x_{0.5} = \mu_x + z_{0.5} \cdot \sigma_x = \mu_x \quad (7)$$

$$IQR = x_{0.75} - x_{0.25} = (M + z_{0.75} \cdot \sigma_x) - (M + z_{0.25} \cdot \sigma_x) \quad (8)$$

normal dağılımın parametreleri kolayca hesaplanabilmektedir:

$$\mu_x = M \quad (9)$$

$$\sigma_x = 0.7413 \cdot IQR \quad (10)$$

II. İki parametrelili lognormal dağılım (LN2)

Ekstrem yağışlar gibi pek çok hidrolojik süreç, sıfır alt sınırına sahip pozitif çarpık rastgele değişken süreçlerdir (Stedinger ve diğ. 1993). İki parametrelili lognormal dağılım (LN2), yukarıda bahsedilen süreç özelliklerini tümüyle sağladığından çeşitli hidrolojik olayların verilerine sıklıkla uyarlanmaktadır. Lognormal dağılımlı bir x değişkeninin, iki parametrelili kuantil fonksiyonu, y_p , şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$y_p = \mu_y + z_p \cdot \sigma_y \quad (11)$$

Bu eşitlikte μ_y ve σ_y x' in doğal logaritmasının ($y = \ln(x)$) parametreleri; z_p ise P aşılmama olasılığı için hesaplanan standart normal değişkendir. Lognormal dağılımın kuantil fonksiyonunu medyan ve kuartiller arası uzaklık için tanımladığımızda,

$$M_y = \ln(M) = y_{0.5} = \mu_y + z_{0.5} \cdot \sigma_y = \mu_y \quad (12)$$

$$IQR_y = y_{0.75} - y_{0.25} = (\mu_y + z_{0.75} \cdot \sigma_y) - (\mu_y + z_{0.25} \cdot \sigma_y) \quad (13)$$

dağılımın parametreleri aşağıdaki şekilde ortaya çıkmaktadır:

$$\mu_y = \ln(M) \quad (14)$$

$$\sigma_y = 0.7413 \cdot IQR_y \quad (15)$$

III. Üç parametrelili lognormal dağılım (LN3)

Üç parametrelili lognormal dağılımın iki parametrelili lognormal dağılımdan farkı, gibi dağılımın alt sınırını tanımlayan üçüncü bir parametreye (x_0) sahip olmasıdır. Lognormal dağılımlı bir x değişkeninin, üç parametrelili kuantil fonksiyonu x_p aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır:

$$x_p = x_0 + e^{\mu_y + z_p \cdot \sigma_y} \tag{16}$$

Bu eşitlikte μ_y ve σ_y x' in doğal logaritmasının ($y = \ln(x)$) parametreleri; z_p ise P aşılma olasılığı için hesaplanan standart normal değişkendir. Üç parametrelili lognormal dağılımın kuantil fonksiyonunu medyan, kuartiller arası uzaklık için tanımladığımızda,

$$M = x_{0.5} = x_0 + e^{\mu_y + 0 \cdot \sigma_y} = x_0 + e^{\mu_y} \tag{17}$$

$$\begin{aligned} IQR &= x_{0.75} - x_{0.25} = x_0 + e^{\mu_y + z_{0.75} \cdot \sigma_y} - x_0 - e^{\mu_y + z_{0.25} \cdot \sigma_y} = e^{\mu_y} \cdot e^{0.6745 \cdot \sigma_y} - e^{\mu_y} \cdot e^{-0.6745 \cdot \sigma_y} \\ &= e^{\mu_y} \left[e^{0.6745 \cdot \sigma_y} - e^{-0.6745 \cdot \sigma_y} \right] \end{aligned} \tag{18}$$

Üç parametrelili bir dağılım olduğundan parametrelerin tanımlanmasında üçüncü bir denkleme ihtiyaç duyulmaktadır ve bunun için kuantil çarpıklık katsayısı (QC_s) ifadesi kullanılmaktadır.

$$\begin{aligned} QC_s &= \frac{x_{0.75} + x_{0.25} - 2M}{IQR} = \frac{x_0 + e^{\mu_y + z_{0.75} \cdot \sigma_y} + x_0 - e^{\mu_y + z_{0.25} \cdot \sigma_y} - 2x_0 - 2e^{\mu_y}}{x_0 + e^{\mu_y + z_{0.75} \cdot \sigma_y} - x_0 - e^{\mu_y + z_{0.25} \cdot \sigma_y}} \\ &= \frac{e^{\mu_y} \left[e^{0.6745 \cdot \sigma_y} + e^{-0.6745 \cdot \sigma_y} - 2 \right]}{e^{\mu_y} \left[e^{0.6745 \cdot \sigma_y} - e^{-0.6745 \cdot \sigma_y} \right]} = \frac{e^{0.6745 \cdot \sigma_y} + e^{-0.6745 \cdot \sigma_y} - 2}{e^{0.6745 \cdot \sigma_y} - e^{-0.6745 \cdot \sigma_y}} \end{aligned} \tag{19}$$

σ_y , (19) eşitliğinden çekilmekte, dağılımın diğer iki parametresi, aşağıdaki eşitliklerle hesaplanmaktadır.

$$\mu_y = \ln \left[\frac{IQR}{e^{0.6745 \cdot \sigma_y} - e^{-0.6745 \cdot \sigma_y}} \right] \tag{20}$$

$$x_0 = M - e^{\mu_y} \tag{21}$$

IV. Gamma Dağılımı

İki parametrelili Gamma dağılımı, Pearson Tip 3 dağılımının alt sınırı sıfır olan özel bir halidir. Belli çarpıklığa sahip hidrolojik değişkenlerin log-dönüşüm gerektirmeden başarıyla ifade edilmesini sağlar (Chow ve diğ., 1988). Abramowitz ve Stegun (1984) $y = x/\alpha$ olmak üzere, aşılma olasılığını aşağıdaki şekilde tanımlamışlardır:

$$P(y) = P(\chi^2 | \nu) \tag{22}$$

Burada $P(\chi^2 | \nu)$, serbestlik derecesi $\nu = 2\beta$ olan ki-kare dağılımıdır ve $\chi^2 = 2y'$ dir. Kendall ve Stuart (1963) standart normal değişkeni aşağıdaki şekilde ifade etmişlerdir:

$$z = \left[\left(\frac{\chi^2}{\nu} \right)^{1/3} + \frac{2}{9\nu} - 1 \right] \left(\frac{9\nu}{2} \right) \tag{23}$$

z , $\nu > 30$ durumunda yaklaşık olarak normal dağılımlıdır. χ^2 , (23) eşitliğinden çekilerek,

$$\chi^2 = \nu \left[1 - \frac{2}{9\nu} + z_p \sqrt{\frac{2}{9\nu}} \right]^3 \quad (24)$$

ifadesiyle tanımlanır. Burada z_p , aşılma olasılığı P olan standart normal değişkeni tanımlamaktadır. Kuantil fonksiyonu, $\nu = 2\beta$, $\chi^2 = 2y$ ve $x = y \cdot \alpha$ ifadeleri birlikte kullanılarak aşağıdaki şekilde yazılır:

$$x_p = \alpha \beta \left[1 - \frac{1}{9\beta} + z_p \sqrt{\frac{1}{9\beta}} \right]^3 \quad (25)$$

Medyan ve IQR istatistikleri (25) eşitliğine göre

$$M = x_{0.5} = \alpha \cdot \beta \left[1 - \frac{1}{9\beta} + z_{0.5} \sqrt{\frac{1}{9\beta}} \right]^3 = \alpha \cdot \beta \left[1 - \frac{1}{9\beta} \right]^3 \quad (26)$$

$$IQR = \alpha \cdot \beta \cdot \left\{ \left[1 - \frac{1}{9\beta} + z_{0.75} \sqrt{\frac{1}{9\beta}} \right]^3 - \left[1 - \frac{1}{9\beta} + z_{0.25} \sqrt{\frac{1}{9\beta}} \right]^3 \right\} \quad (27)$$

şeklinde yazılırlar. β parametresi (28) numaralı eşitlikten deneme yanılma yöntemiyle çekilecektir.

$$\frac{IQR}{M} = \frac{\left\{ \left[1 - \frac{1}{9\beta} + z_{0.75} \sqrt{\frac{1}{9\beta}} \right]^3 - \left[1 - \frac{1}{9\beta} + z_{0.25} \sqrt{\frac{1}{9\beta}} \right]^3 \right\}}{\left[1 - \frac{1}{9\beta} \right]^3} \quad (28)$$

α parametresi ise (29) eşitliğiyle tanımlanmıştır.

$$\alpha = \frac{M_x}{\beta \left[1 - \frac{1}{9\beta} \right]^3} \quad (29)$$

V. Gumbel Dağılımı

Gumbel dağılımı (Gumbel, 1958), maksimum olayları temsil etmedeki başarısından dolayı özellikle yağışların şiddet-süre-tekerrür ilişkilerinin tanımlanmasında yaygın bir biçimde kullanılır (Koutsoyiannis ve diğ., 1998). Pozitif çarpıklığa ($C_s=1.14$) sahip olan Gumbel dağılımının kuantil fonksiyonu aşağıda verilmiştir:

$$x_p = \beta - \alpha \cdot \ln[-\ln(P)] \quad (30)$$

Burada α ve β dağılımın parametreleri olup, P aşılma olasılığıdır. Medyan ve IQR istatistiklerinin kuantil denkleminde yerleştirilmesiyle,

$$M = x_{0.5} = \beta - \alpha \cdot \ln[-\ln(0.5)] = \beta + 0.3665 \cdot \alpha \quad (31)$$

$$IQR = x_{0.75} - x_{0.25} = \{\beta - \alpha \cdot \ln[-\ln(0.75)]\} - \{\beta - \alpha \cdot \ln[-\ln(0.25)]\} = 1.5725 \cdot \alpha \quad (32)$$

ifadeleri elde edilmiştir. Dağılımın parametreleri ise

$$\alpha = 0.636 \cdot IQR \quad (33)$$

$$\beta = M - 0.233 \cdot IQR. \quad (34)$$

eşitlikleriyle hesaplanmaktadır.

VI. GEV Dağılımı

Genelleştirilmiş ekstrem değer dağılımı da olarak tanımlanan GEV dağılımı, hidrolojide maksimum ve minimum olayların doğasını temsil etmede ön plana çıkmaktadır. Dağılımın kuantil fonksiyonu

$$x_p = u + \frac{\alpha}{k} \left[1 - \{-\ln(P)\}^k \right] \quad (35)$$

ifadesiyle tanımlanmaktadır. u , α ve k dağılımın parametreleri olup, P aşılma olasılığını göstermektedir. Üç parametrelili olan bu dağılımın parametrelerinin hesabında üç farklı denkleme ihtiyaç duyulmaktadır. Medyan (M) ve IQR istatistiklerinin yanı sıra, QC_s , kuantil çarpıklık katsayısı için de kuantil fonksiyonu ifadesi yazılacaktır.

$$M = x_{0.5} = u + \frac{\alpha}{k} \left[1 - \{-\ln(0.5)\}^k \right] = u + \frac{\alpha}{k} \left[1 - 0.6932^k \right] \quad (36)$$

$$\begin{aligned} IQR &= x_{0.75} - x_{0.25} = u + \frac{\alpha}{k} \left[1 - \{-\ln(0.75)\}^k \right] - u - \frac{\alpha}{k} \left[1 - \{-\ln(0.25)\}^k \right] \\ &= \frac{\alpha}{k} - \frac{\alpha 0.2877^k}{k} - \frac{\alpha}{k} + \frac{\alpha 1.3863^k}{k} = \frac{\alpha}{k} \left[1.3863^k - 0.2877^k \right] \end{aligned} \quad (37)$$

$$\begin{aligned} QC_s &= \frac{x_{0.75} + x_{0.25} - 2M}{IQR} = \frac{u + \frac{\alpha}{k} - \frac{\alpha 0.2877^k}{k} + u + \frac{\alpha}{k} - \frac{\alpha 1.3863^k}{k} - 2u - 2\frac{\alpha}{k} + 2\frac{\alpha}{k} \left[0.6932^k \right]}{\frac{\alpha}{k} \left[1.3863^k - 0.2877^k \right]} \\ &= \frac{2(0.6932)^k - 0.2877^k - 1.3863^k}{1.3863^k - 0.2877^k} \end{aligned} \quad (38)$$

k parametresi (38) denkleminde deneme-yanılmayla çekilir. α ve u parametreleri de

$$\alpha = \frac{k \cdot IQR}{\left[1.3863^k - 0.2877^k \right]} \quad (39)$$

$$u = M - \frac{\alpha}{k} \left[1 - 0.6932^k \right] \quad (40)$$

denklemlerinden hesaplanır.

Parametre Tahmin Metotlarının Karşılaştırılması (Comparison of Parameter Estimation Methods)

Bu çalışmada anlatılan Robust İstatistikler Metodunun (RİM) ve diğer üç klasik parametre tahmin metodunun performansları kuadratik ortalama hataları (RMSE) kriteri yardımıyla karşılaştırılacaktır.

$$RMSE = \left[\sum_{i=1}^N (I_i - \hat{I}_i)^2 / N \right]^{1/2} \quad (41)$$

Bu eşitlikte N gözlem sayısı, I_i , 24 saatlik gözlenmiş yağış şiddetleri, \hat{I}_i , alternatif parametre tahmin yöntemlerinden (ML, MOM, PWM ve RİM) hesaplanan parametreler kullanılarak $T_i=1/(1-P_i)$ ampirik tekerrür aralığı için tahmin edilen yağış şiddetleridir. Ampirik aşılma olasılıkları, P_i ler, Gumbel ve GEV dağılımları için Gringorten'in, Normal, lognormal 2, lognormal 3 ve Gamma dağılımları içinse Blom'un önerdiği formüllerle hesaplanmıştır.

UYGULAMA ve BULGULAR (APPLICATION AND FINDINGS)

Çalışma kapsamında sayısal uygulamalar Ege Bölgesinde yer alan altı yağış istasyonunun (Muğla, Aydın, Kütahya, Çeşme, İzmir, Manisa) 24 saatlik yıllık maksimum yağış şiddeti verileriyle gerçekleştirilmiştir. Bu altı istasyonun seçiminde, incelenen altı farklı olasılık dağılımının (Normal, 2- ve

3-parametrelili lognormal, Gamma, Gumbel ve GEV) verilere uygunluğu esas alınmıştır. Olasılık dağılımlarının uygunluk sınamaları ki-kare (X^2), Kolmogorov-Smirnov (K-S) ve Anderson-Darling (A-D) testleriyle %10 anlamlılık düzeyinde gerçekleştirilmiştir. İstasyonlara ait yağış şiddetlerinin tanımlayıcı istatistikleri Çizelge 1 de gösterilmiştir. Çizelge 1 de N , istasyondaki veri uzunluğunu, \bar{x} , S_x , C_{vx} , C_{sx} , M , IQR ve QC_s ise sırasıyla yağış şiddetlerinin ortalama, standart sapma, değişkenlik katsayısı, çarpıklık katsayısı, medyan, kuartiller arası uzaklık ve kuantil çarpıklık katsayısını göstermektedir.

Çizelge 1. İstasyonlarda kaydedilen yağış şiddetlerinin tanımlayıcı istatistikleri

Table 1. Descriptive statistics of rainfall intensities recorded at stations

Yağış İstasyonu	Uygun ODF	N	\bar{x}	S_x	C_{vx}	C_{sx}	M	IQR	QC_s
Muğla	N	45	3,80	1,25	0,33	0,03	3,74	1,44	0,04
Aydın	LN2	38	1,95	0,67	0,34	1,09	1,97	0,73	-0,32
Kütahya	LN3	48	1,48	0,34	0,23	0,45	1,43	0,50	0,09
İzmir	GUM	57	2,70	0,85	0,32	1,00	2,59	1,03	0,07
Manisa	GEV	37	2,51	0,91	0,36	1,84	2,33	0,79	0,05
Çeşme	GAM	33	2,53	0,98	0,39	0,96	2,48	1,31	0,02

Bundan sonra, her istasyon için ilgili olasılık dağılım fonksiyonuna ait dağılım parametreleri, klasik parametre tahmin metotlarıyla (ML, MOM ve PWM) ve Robust İstatistikler Metoduyla (RSM) Bölüm 2.2 de anlatıldığı şekilde hesaplanmıştır. Kuantiller her bir metodun hesapladığı parametreler kullanılarak $T_i=1/(1-P_i)$ ampirik olasılıkları için hesaplanmıştır. Sonuç olarak, bahsedilen dört farklı parametre tahmin yönteminin performansını karşılaştırmak amacıyla kuadratik ortalama hataları (RMSE) hesaplanmıştır. Tahmin edilen dağılım parametreleri ve kuantillerin RMSE değerleri Çizelge 2' de gösterilmiştir.

Çizelge 2. Altı istasyonun verileriyle hesaplanan dağılım parametreleri ve RMSE değerleri

Table 2. The distribution parameters and RMSE values calculated from the data of six stations

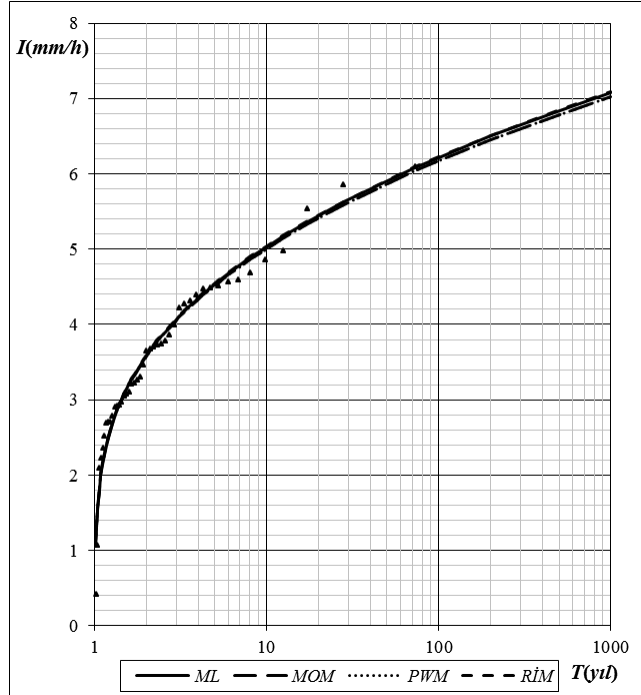
Muğla N				Aydın LN2				Kütahya LN3				
	μ_x	σ_x	RMSE		μ_y	σ_y	RMSE		x_0	μ_y	σ_y	RMSE
ML	3,59	1,13	0,182	ML	0,62	0,33	0,135	ML	-0,93	0,87	0,14	0,041
MOM	3,58	1,11	0,183	MOM	0,62	0,33	0,137	MOM	-0,74	0,79	0,15	0,041
PWM	3,58	1,11	0,183	PWM	0,62	0,33	0,136	PWM	0,07	0,32	0,22	0,048
RSM	3,60	1,13	0,182	RSM	0,62	0,33	0,135	RSM	-0,05	0,39	0,23	0,043

Çeşme Gamma				İzmir Gumbel				Manisa GEV				
	α	β	RMSE		α	u	RMSE		α	u	k	RMSE
ML	0,35	7,28	0,194	ML	0,64	2,21	0,089	ML	0,58	2,08	-0,11	0,157
MOM	0,37	6,90	0,188	MOM	0,60	2,22	0,088	MOM	0,62	2,07	-0,09	0,153
PWM	0,38	6,69	0,186	PWM	0,63	2,21	0,086	PWM	0,52	2,05	-0,22	0,113
RSM	0,38	6,71	0,186	RSM	0,63	2,22	0,087	RSM	0,56	2,03	-0,21	0,111

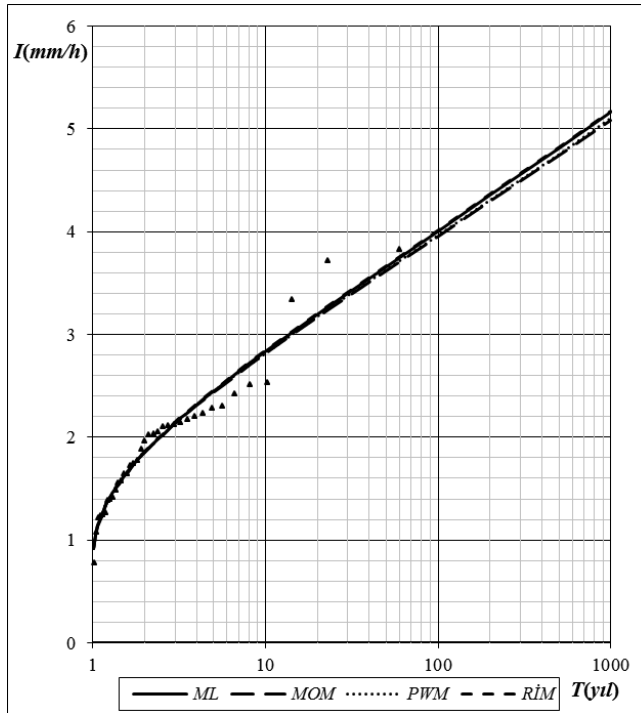
Çizelge 2 dikkatlice incelendiğinde, altı istasyonun (ya da altı olasılık dağılımının) kuantil tahminleri için hesaplanan RMSE değerlerinin dört farklı parametre tahmin yönteminde de yaklaşık sonuçlar verdiği görülmektedir.

Daha sonra parametre tahmin yönteminin, uzun periyotlarda nasıl etki yaratacağını izlemek amacıyla $T=1000$ yıla kadar bir süre için bu parametrelerle kuantil tahminleri yapılmıştır. Görsel

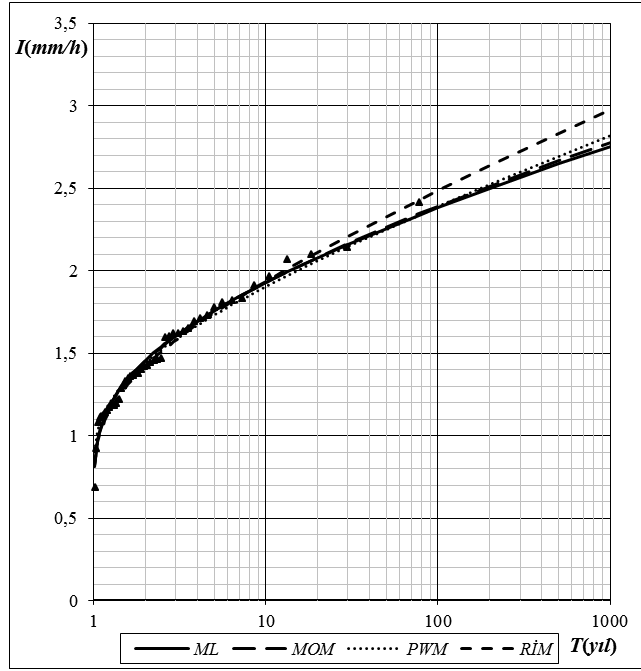
değerlendirme yapabilmek amacıyla altı istasyonun şiddet-tekerrür eğrileri Şekil 1 ila Şekil 6 da verilmiştir. Bu şekillerde eğriler farklı parametre tahmin metoduna, noktalar ise gözlenmiş yağış şiddetlerine karşılık gelmektedir.



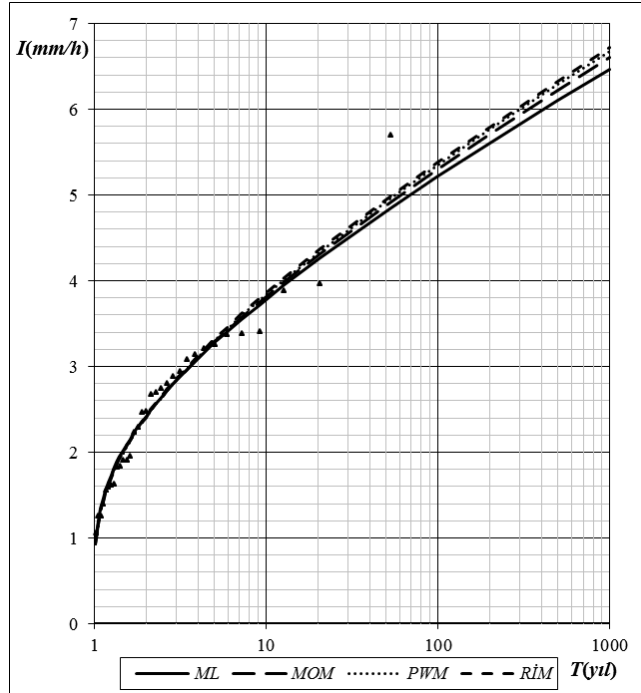
Şekil 1. Muğla istasyonu yağış şiddeti-tekerrür eğrisi (N)
Figure 1. Rainfall intensity-recurrence curve of Muğla station (N)



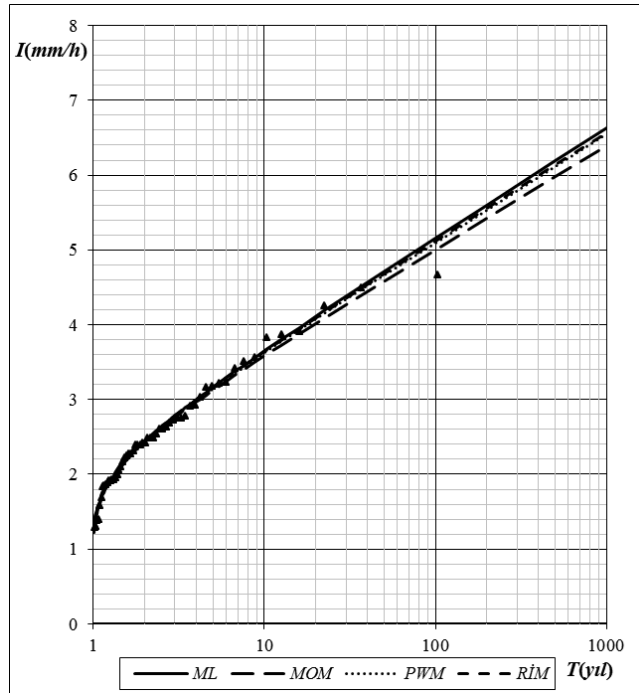
Şekil 2. Aydın istasyonu yağış şiddeti-tekerrür eğrisi (LN2).
Figure 2. Rainfall intensity-recurrence curve of Aydın station (LN2)



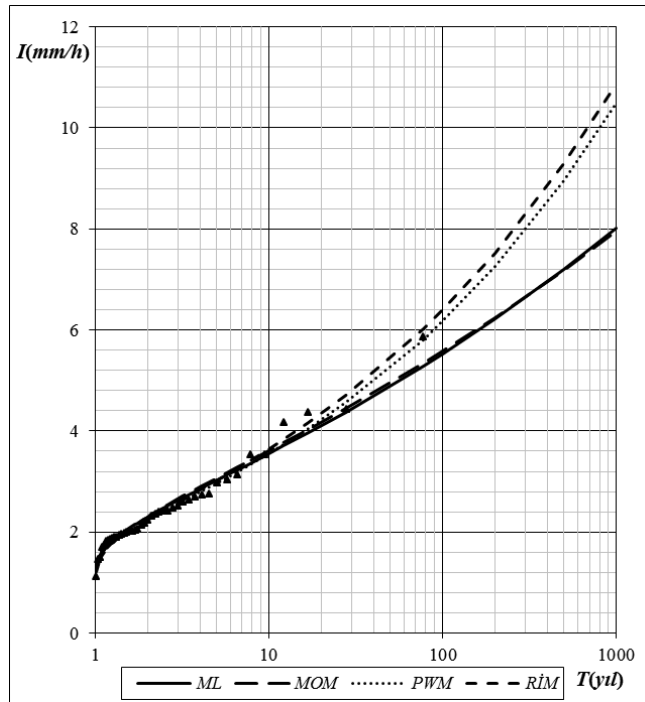
Şekil 3. Kütahya istasyonu yağış şiddeti-tekerrür eğrisi (LN3)
Figure 3. Rainfall intensity-recurrence curve of Kütahya station (LN3)



Şekil 4. Çeşme istasyonu yağış şiddeti-tekerrür eğrisi (Gamma)
Figure 4. Rainfall intensity-recurrence curve of Çeşme station (Gamma)



Şekil 5. İzmir istasyonu yağış şiddeti-tekerrür eğrisi (Gumbel)
Figure 5. Rainfall intensity-recurrence curve of İzmir station (Gumbel)



Şekil 6. Manisa istasyonu yağış şiddeti-tekerrür eğrisi (GEV)
Figure 6. Rainfall intensity-recurrence curve of Manisa station (GEV)

Genel olarak şekiller her altı istasyonda da (ve her altı dağılım için) şiddet-tekerrür eğrilerinin birbirine yakın bir şekilde dizildiğini göstermektedir. Aynı zamanda hemen tüm eğrilerin, gözlem uzunluklarına ait ampirik periyotlarla (gözlenmiş yağış şiddetleriyle) uyumlu olduğu dikkat çekmektedir.

SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Frekans analizinde en önemli aşamalardan biri seçilen olasılık dağılım fonksiyonuna ait parametrelerin doğru bir şekilde tahmin edilmesidir. Bu çalışmada alternatif bir parametre tahmin metodu, RİM (Robust İstatistikler Metodu) sunulmuştur. Bu metot, farklı olasılık dağılımlarının parametre tahmininde medyan (M), kuantiller arası uzaklık (IQR) ve kuantil çarpıklık katsayısı (QC_s) istatistiklerini kullanmaktadır. Bu robust istatistiklerin kullanımıyla, aykırı gözlemlerin varlığından veya büyüklüğünden etkilenilmemesi amaçlanmaktadır.

Çalışmanın uygulama kısmında sayısal analizler Ege Bölgesinde yer alan altı yağış istasyonunun 24 saat süreli yıllık maksimum yağış şiddetleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu altı istasyon, incelenen olasılık dağılım fonksiyonlarına uygunlukları doğrultusunda aynı bölgede yer alan 23 istasyon arasından seçilmiştir.

Robust istatistikler kullanılarak elde edilen parametrelerin, diğer üç parametre tahmin metoduyla birbirine yakın sonuçlar verdiği (ML, MOM, PWM) Çizelge 2 de açıkça görülmektedir. Ampirik tekerrür aralıkları için hesaplanan kuantil tahminlerine ait kuadratik ortalama hataları (RMSE) incelendiğinde, önerilen metodun çoğu durumda dört metot arasında ilk iki sırada yer aldığı dikkat çekmektedir.

Her bir parametre tahmin metodunun parametreleriyle hesaplanan ve $T=1000$ yıllık periyoda kadar uzanan kuantiller, metotların uzun dönem performansları için de görsel olarak karşılaştırma imkânı vermektedir (Şekil 1 - Şekil 6). Şekiller incelendiğinde dört parametre tahmin yöntemiyle elde edilen yağış şiddet-tekerrür eğrisinin genel olarak birbirine yakın olduğunu göze çarpmaktadır.

Bu çalışmada önerilen Robust İstatistikler Metodunun, incelenen dört parametre tahmin metodu sıralamasında genellikle en iyi iki metottan biri olduğu gözlenmiştir. Bunun yanında metodun performansının daha kesin bir şekilde ele alınması amacıyla sentetik veriler üretilerek daha detaylı analizlerin yapılması önerilmektedir.

REFERANSLAR (REFERENCES)

- Abramowitz, M., Stegun, I. A., 1984, *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*, A Wiley - Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Ahmad, I., Fawad, M., Akbar, M., Abbas, A., Zafar, H. 2016, "Regional Frequency Analysis of Annual Peak Flows in Pakistan Using Linear Combination of Order Statistics", *Polish Journal of Environmental Studies*, Vol. 25, 6.
- Atroosh, K.B., Moustafa, A. T., 2012, "An Estimation of the Probability Distribution of Wadi Bana Flow in the Abyan Delta of Yemen", *Journal of Agricultural Science*, Vol. 4, No. 6
- Chow, V. T., Maidment, D. R., Mays, L. W., 1988, *Applied Hydrology*, McGraw-Hill, New York.
- Greenwood, J. A., J. M. Landwehr, N. C. Matalas, J. R. Wallis, 1979, "Probability Weighted Moments: Definition and Relation to Parameters of Several Distributions Expressible in Inverse Form", *Water Resources Research*, Vol. 15, pp. 1049-1054.
- Gumbel, E. J., 1958, *Statistics of Extreme*, Columbia University Press, 375 pp.
- Haktanır, T., Cobaner, M., Kisi O., 2010, "Frequency Analyses of Annual Extreme Rainfall Series from 5 Min to 24 h", *Hydrological Processes*, Vol. 24, pp. 3574-3588
- Hosking, J. R. M. 1986, *The Theory of Probability Weighted Moments* Research Report RC12210, IBM Research Division, Yorktown Heights, N.Y.
- Jee, H. K, Yeo, W. K, Kim, J. H, Lee, S., 2008, *Rainfall Intensity Duration Frequency (IDF) Analysis for the Asia Pasific Region*, Chapter 8, 76-81, 'Technical Documents in Hydrology', No:2, Asian Pasific FRIEND, International Hydrological Programme, UNESCO Jakarta Office, Indonesia.
- Kendall, M. G., Stuart, A., 1961, *The Advance Theory of Statistics*, II, Griffin, London
- Koutsoyiannis, D., Kozonis, D., Manetas, A., 1998, "A Mathematical Framework for Studying Rainfall Intensity-Duration-Frequency Relationships", *Journal of Hydrology*, Vol. 206, pp. 118-135.

- Kottegoda, N. T., Rosso, R. 2008, *Applied Statistics for Civil and Environmental Engineers*, Second Edition, Blackwell Publishing.
- Kumar, R., Chatterjee, C., Kumar, S., Lohani, A. K., Singh, R. D. 2003, "Development of Regional Flood Frequency Relationships using L-moments for Middle Ganga Plains Subzone 1(f) of India", *Water Resources Management*, Vol. 17, pp. 243-257.
- Landwehr, J.M., Matalas, N.C., Wallis, J.R. 1979, "Probability Weighted Moments Compared with Some Traditional Techniques in Estimating Gumbel Parameters and Quantiles", *Water Resources Research*, Vol. 15 (5), pp. 1055-1064.
- Opere, A. O.; Mkhanda, S.; Willems, P. 2006, "At Site Flood Frequency Analysis for the Nile Equatorial Basins", *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 31, Issue 15-16, pp. 919-927.
- Panda S. N. Panda, S. N., Dey, G. K., Kumar, S., 2005, "Flood Frequency Analysis in the Mahanadi River Basin (Eastern India)" - Developing an Interactive Software FLOOD", *ICID 21st European Regional Conference*, Frankfurt (Oder) and Slubice – Germany and Poland, 15-19 May, 2005.
- Rahman, A. S., Rahman, A., Zaman, M. A., Haddad, K., Ahsan, A., Imteaz, M. 2013, "A Study on Selection of Probability Distributions for at-site Flood Frequency Analysis in Australia", *Natural Hazards*, Vol. 69 (3).
- Rao, A. R., Hamed, K. H., 2000, *Flood Frequency Analysis*, CRC Pres, Boca Raton, USA.
- Reimann, C., Filzmoser, P., Garrett, R. G., Dutter R., 2008, *Statistical Data Analysis Explained: Applied Environmental Statistics with R*, John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 978-0-470-98581-6
- Saf, B., 2009, "Regional Flood Frequency Analysis Using L-Moments for the West Mediterranean Region of Turkey", *Water Resources Management*, Vol. 23, pp. 531-551.
- Salinas, J. L., Castellarin, A., Kohnova, S., Kjeldsen, T. R. 2014, "Regional Parent Flood Frequency Distributions in Europe – Part 1: Is the GEV Model Suitable as a Pan-European Parent?" *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 18, pp. 4381-4389.
- Stedinger, J. R., Vogel, R.M., Fofoula-Georgiou, E., 1993, *Frequency Analysis of Extreme Events*, In: D. R. Maidment, Handbook of Hydrology, Chapter 18, McGraw-Hill, New York .
- Stephenson, D., 2005, *Data Analysis Methods in Weather and Climate Research*, Course in University of Reading.
- Strupczewski, W. G, Singh, V. P, Weglarczyk, S., 2002, "Asymptotic Bias of Estimation Methods Caused by the Assumption of False Probability Distribution", *Journal of Hydrology*, Vol. 258, Issues 1-4, 28 pp. 122-148.
- Van Gelder, P.H.A.J.M, 2004, "Statistical Estimation Methods in Hydrological Engineering, In: Analysis and Stochastic Modelling of Extreme Runoff in Euroasian Rivers under Conditions of Climate Change", *Proceedings International Scientific Seminar*, Irkutsk, pp. 11-57, 16-23 June 2003 Publishing House of the Institute of Geography Editors: L.M. Korytny and W.M. Luxemburg, ISBN 5-94797-040-6



KÜPRİK OKSİT/SİLİSYUM HETEROEKLEMLİ NANODİYOTLARIN FOTOVOLTAİK ÖZELLİKLERİ

¹Funda AKSOY AKGÜL

¹Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, NİĞDE
¹fundaaksoy01@gmail.com

(Geliş/Received: 16.03.2017; Kabul/Accepted in Revised Form: 02.05.2017)

ÖZ: Aygıt uygulamaları için nanoyapılı materyallerin sentezlenmesinde, ucuz olması sebebiyle solüsyon-bazlı yaklaşımlar kullanılır. Bu çalışmada, Küprük oksit/Silisyum p-n heteroeklemlili nanodiyotların fotovoltaiik performansı incelenmiştir. Yüksek yoğunluklu ve dikey olarak düzgün sıralanmış Silisyum nanotel kümeleri, n-tipi (100)-yönelimli kristal Silisyum dilimi üzerine akımsız dağlama tekniği ile sentezlendi. Daha sonra, üç-boyutlu heteroyapılar üretmek için p-tipi Küprük oksit ince filmleri Silisyum nanoteller üzerine kimyasal depolama yöntemi ile kaplandı. Akım-gerilim (*I-V*) ölçümleri, üretilen heteroeklemlili diyotların fotovoltaiik özelliklerini incelemek için kullanıldı. AM 1.5 G aydınlatma koşulları altında en yüksek güç dönüştürme verimliliği %0,58 olarak bulundu. Ayrıca, 400-1100 nm arasında geniş bir dalgaboyu spektrumunda oldukça yüksek dış kuantum verimi saptandı.

Anahtar Kelimeler: Küprük oksit ince filmi, p-n heteroeklemlili fotovoltaiik diyot, Silisyum nanoteller

Photovoltaic Characteristics of Cupric Oxide/Silicon Heterojunction Nanodiodes

ABSTRACT: Solution-based approaches are used to prepare nanostructured materials for device applications to reduce material production and device fabrication costs. In this study, photovoltaic performance of Cupric oxide/Silicon p-n heterojunction nanodiodes were investigated. Highly dense and vertically well-aligned Silicon nanowire arrays were successfully synthesized on a n-type (100)-oriented Si wafer through electroless etching technique. p-type Cupric oxide thin films were then coated onto Silicon nanowires via chemical bath deposition method to form three-dimensional heterostructures. Current-voltage (*I-V*) measurements were utilized to examine photovoltaic properties of the fabricated heterojunction diodes. The maximum power conversion efficiency were found to be 0.58% under simulated solar irradiation of AM 1.5 G. Furthermore, relatively high external quantum efficiency over a broadband spectrum of wavelengths between 400-1100 nm was detected.

Key Words: Cupric oxide thin film, p-n heterojunction photovoltaic diode, Si nanowires,

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bir-boyutlu nanomateryaller, kendilerine has ve tamamıyla yeni elektrik, optik ve kimyasal özelliklerinden dolayı son yıllarda malzeme biliminde yoğun araştırmaların odak noktası olmuştur. Bir-boyutlu nanoyapılar arasında yer alan nanoteller, sahip oldukları geniş yüzey alanı, etkili yük toplama kapasitesi ve gelişmiş soğurma özellikleri ile yeni nesil mikroelektronik, fotonik, elektromekanik ve fotovoltaiik aygıt uygulamaları için gelecek vaat eden yapıtaşları olarak düşünülmektedir.

Yarıiletken Silisyum, günümüz fotovoltaiik ve mikroelektronik teknolojisinde kullanılan temel materyaldir. Silisyumun tüm fiziksel özelliklerinin kapsamlı şekilde bilinmesi ve bu malzeme ile ilgili teknolojik gelişmeler sebebiyle, nanoteknolojik araştırmalarda özellikle Silisyum nanoteller en çok ilgiyi

çeken bir-boyutlu malzemeler olmuştur. Silisyum nanotellerin kimyasal ve biyolojik sensörlerde, yüksek performanslı lityum iyon bataryalarında, fotodetektörlerde, ışık yayan diyotlarda ve fotovoltaik güneş hücrelerinde kullanımına yönelik geniş araştırmalar kesintisiz şekilde devam etmektedir. Şimdiye kadar Silisyum alttabanlar üzerine nanotel büyütme için birçok üretim tekniği geliştirilmiştir. Bu teknikler arasında buhar-sıvı katı (Hochbaum ve diğ., 2005), kimyasal buhar depolama (Colli ve diğ., 2007), plazmalı buhar depolama (Sharma ve Sunkara, 2004), moleküler demet epitaksi (Bauer ve diğ., 2007), termal buharlaştırma (Ma ve diğ., 2002) ve lazer ablasyon (Morales, 1998) en yaygın kullanılan yöntemlerdir. Reaktif-iyon dağlama ile birlikte kullanılan çeşitli litografik metotlar (Fu ve diğ., 2009) ve yeni bir yöntem olan akımsız dağlama (Srivastava ve diğ., 2014), diğer alternatif Silisyum nanotel sentezleme metotlarıdır. Akımsız dağlama oldukça kolay ve güçlü bir solüsyon-bazlı işlem olup, kristal Silisyum fotovoltaik güneş hücrelerinin üretim teknolojisine kolaylıkla uyarlanabilir. Diğer nanotel sentezleme yöntemleri ile karşılaştırıldığında, akımsız dağlama yönteminin üstün yönleri ve sahip olduğu temel avantajlardan bazıları şu şekilde sıralanabilir: Basit ve oldukça ucuz deneysel teçhizat gereksinimi, 0-60 °C arasında değişen sıcaklık aralığında nanotel sentezleme kolaylığı, geniş alanlı yüzeylere uyarlanabilme, kısa sürede üretim yaparak zamandan tasarruf edebilme, alttaban olarak kullanılan kristal Silisyum dilimi ile aynı katkılama tipinde, aynı katkılama oranında ve aynı kalitede kristal yapıya sahip nanotel üretebilme ve nanotel uzunluğunu kontrol edebilme.

Silisyum nanoteller, farklı yeni nesil aygıt uygulamalarının gerçeğe dönüştürülmesinde diğer bir-boyutlu materyallere göre en çekici seçenektir. Özellikle, Silisyum nanotellerin fotovoltaik teknolojilerinde kullanımı yakın gelecekte ticarileştirilebilecek en umut verici uygulama olarak düşünülmektedir. Akımsız dağlama yöntemi ile sentezlenen Silisyum nanoteller, fotovoltaik aygıt uygulamalarında hem aktif hem de pasif tabaka olarak işlev yapabilir ve aktif bir bileşen olarak homoeklem ve heteroeklem aygıtların her ikisinde de kullanılabilir. Silisyum nanotel-temelli üç-boyutlu radyal heteroeklem aygıtların düzlemsel aygıtlara göre önemli avantajlara sahip oldukları ve çok daha iyi çalışma performansı sergiledikleri birçok bilimsel çalışmada gösterilmiştir (Akgül ve diğ., 2014). Bu heteroyapıların en önemli özelliği, nanotellerin bir ucundan diğer ucuna boyuna boyuna üç-boyutlu eklemlerin oluşmasıdır. Düzlemsel olmayan bu geometride, Silisyum nanotellerin duvarları üzerinde radyal olarak büyüyen arayüzey kontak alanı, aygıtın aktif alanını önemli ölçüde artırma imkânını sunar. Bunun ötesinde, alttabana göre düşey olarak düzgün şekilde sıralanmış Silisyum nanoteller, dikkate değer ölçüde yansıma-engelleyici özelliğe sahiptir. Bu özellik, gelen ışığın özellikle kısa dalgaboylarında nanotel kümeleri içinde tuzaklanıp saçılması neticesinde her yönde foton soğurulmasından kaynaklanmaktadır (Srivastava ve diğ., 2010). Nanoteller ile oluşturulan bu aygıt konfigürasyonu, aynı zamanda yüklerin etkin şekilde toplanması için en uygun dizayndır. Dikey nanoteller, ışığın soğurulmasının ve ışık etkisiyle oluşan yüklerin toplanmasının birbirine dik yönlerde gerçekleşmesine olanak sağlayarak bu iki olayı birbirinden ayırır. Tüm bu avantajlar, Silisyum nanotel-temelli yüksek çalışma performansına sahip optoelektronik ve fotovoltaik aygıtların gerçeğe dönüştürülmesinde fayda sağlayacaktır.

Son dönemlerde, Silisyum nanotellerin potansiyel uygulamalarını araştırmak için çeşitli heteroeklem konseptleri geliştirilmiş ve farklı tamamlayıcı organik ve inorganik yarıiletkenler kullanılmıştır. Çeşitli birçok geçiş metal oksitleri arasında Küprik oksit, sahip olduğu uygun optik özellikleri ve son yıllarda özellikle güneş hücresi teknolojisindeki potansiyel uygulamaları sebebiyle gelecek vaat eden tamamlayıcı inorganik yarıiletken adaylardan biridir. Doğal bir yarıiletken olan Küprik oksit, kristal yapısında yer alan Bakır atomu boşluklarından dolayı p-tipi özellik sergilemektedir. Monoklinik kristal yapısına ve 1,2-1,9 eV arasında değişen oldukça dar yasak bant aralığına sahiptir (Johan ve diğ., 2011). Bu bant aralığı, elektromanyetik spektrumun yakın-kızılötesi bölgesi için fotodetektör ve optik anahtar uygulamalarında Küprik oksiti mükemmel bir potansiyel seçenek haline getirmektedir. Küprik oksit, aynı zamanda fotovoltaik güneş hücresi teknolojilerindeki potansiyel uygulamaları sebebiyle de oldukça ilgi çekmektedir. Bu bileşik, solar spektrumun büyük bir kısmını oluşturan görünür ve yakın-kızılötesi bölgede yüksek soğurma katsayısına, düşük termal yayıcılığa sahiptir (Maruyama, 1998); aynı zamanda oksijen fazlalığının olduğu ortamda oldukça kararlı bir yapı sergilemektedir. Küprik oksitin

sentezlenmesi için ucuz ve kolayca bulunabilen prekürsörler gereklidir. Doğada bol miktarda bulunması ve Kadmiyum, Arsenik ve Kurşun gibi toksik elementlere göre çok daha az zararlı olması, bu bileşiği diğer alternatif organik veya inorganik yarıiletkenlere nazaran daha çekici hale getirmektedir. Küprik oksit ince filmleri, birçok yöntem kullanılarak üretilebilmektedir. Bu yöntemler arasında reaktif buharlaştırma (Balamurugan ve Mehta, 2001), kimyasal depolama (Johan ve diğ., 2011; Serin ve diğ., 2005), termal oksidasyon (Jayatissa ve diğ., 2009; Figueiredo ve diğ., 2008; Papadimitropoulos ve diğ., 2006), kimyasal buhar depolama (Maruyama, 1998) ve sol-jel (Mridha ve Basak, 2006) sayılabilir. Küprik oksit ince filmlerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri üzerinde üretim metodu ve üretim şartları önemli rol oynamaktadır. Bu metotlardan kimyasal depolama uygun maliyeti, basitliği, kontrol edilebilme ve endüstriyel boyutta uygulanabilirlik özellikleri sebebiyle en yaygın şekilde kullanılan yöntemlerden biridir. Bu yöntemin kullanılması ile atmosferik şartlarda geniş yüzeylere ince film kaplamak mümkün olmaktadır.

Optoelektronik ve fotovoltaiik aygıtların üretiminde kullanılan geleneksel yöntemlerde, kaliteli eklem arayüzeyleri oluşturmak için yüksek maliyetli ve karmaşık vakum sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak basit ve ucuz metotlar ile bu tür aygıtların üretilebilmesi, bilimsel ve ekonomik açıdan oldukça önemlidir. Bu anlamda Küprik oksit, solüsyon-bazlı ve vakum sistemi gerektirmeyen üretim teknikleri ile uygun maliyette geniş alanlı aygıtların üretimi için imkân sağlamaktadır. Literatürde, organik veya inorganik yarıiletken materyallerin Silisyum nanoteller ile kombine edilmesinden oluşan yüksek verimlilikte güneş hücrelerinin üretildiği birçok çalışma mevcuttur (Jia ve diğ., 2012; Tian ve diğ., 2007; Garnett ve Yang, 2008; Sivakov ve diğ., 2009; Akgul ve diğ., 2016). Sahip olduğu üstün özellikleri ile Küprik oksit, özellikle optoelektronik aygıtlar için çok uygun bir inorganik yarıiletken malzemedir. Ancak şu ana kadar yapılan araştırmalar neticesinde, Silisyum nanotellerin kimyasal depolama yöntemi vasıtasıyla Küprik oksit ince filmi ile entegrasyonu yapılarak üretilen p-n heteroeklemlili fotovoltaiik hücreler ile ilgili herhangi bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır. Bu çalışmada, Silisyum nanoteller akımsız dağlama metodu kullanılarak n-tipi kristal Silisyum dilimler üzerine büyütülmüştür. Daha sonra, p-tipi Küprik oksit ince filmleri kimyasal depolama yöntemi ile düşey olarak sıralanmış n-tipi Silisyum nanotel kümeleri üzerine kaplanarak nanoyapılı p-n heteroeklemlili yapılar üretilmiş ve elde edilen yapıların akım-gerilim (*I-V*) karakteristikleri ve fotovoltaiik özellikleri incelenmiştir. Küprik oksit/Silisyum heteroeklemlili nanodiyot yapılarının elektriksel ve fotovoltaiik özelliklerin daha iyi anlaşılması, gelecekte bu yapıları içeren ideal elektriksel karakteristiklere ve yüksek çalışma performansına sahip uzun ömürlü Silisyum nanotel-temelli diyotların, transistörlerin ve fotovoltaiik hücrelerin üretimini mümkün kılacaktır.

MATERYAL ve YÖNTEM (MATERIAL and METHOD)

Bu çalışma kapsamında üretimi yapılan Küprik oksit ince filmlerinin ve Silisyum nanotellerin tüm sentezlenme aşamaları, önceki bir çalışmada detaylı şekilde verilmiştir (Kaya, 2016). İlk olarak, p-tipi Küprik oksit ince filmlerinin kimyasal depolama yöntemi ile üretimi için gerekli çözelti hazırlanmıştır. Bakır kaynağı olarak %99,9 saflıkta bakır asetat ($\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) kullanılmıştır. 2,5 g bakır asetat 100 ml etil alkol içerisinde 50 °C sıcaklıkta manyetik karıştırıcı yardımı ile karıştırılarak çözünmesi sağlanmıştır. Daha sonra çözeltiliye katalizör olarak 20 damla laktik asit ($\text{CH}_3\text{CHOH-COOH}$) ilave edilmiştir. Çözelti karıştırırken viskozitesini artırmak için içerisine 3 ml trietilamin ($\text{C}_6\text{H}_{15}\text{N}$) eklenmiştir. Manyetik karıştırıcı üzerinde toplam 2 saat karıştırılan çözelti, oda sıcaklığında 1-2 gün beklemeye alınmıştır. Elde edilen çözeltinin PH değeri yaklaşık olarak 5,5'tir.

Çalışmanın ikinci aşamasında, n-tipi Silisyum nanoteller akımsız dağlama yöntemi kullanılarak sentezlenmiştir. Nanotellerin üretiminde, (100) yönelime sahip direnci 1-10 $\Omega \cdot \text{cm}$ aralığında olan Fosfor katkılanmış n-tipi Silisyum dilimler kullanılmıştır. Bir elmas uçlu kesici yardımı ile parçalara bölünen n-tipi Silisyum dilimler, öncelikle ayrıntılı yüzey temizliğine tabi tutulmuştur (Kaya, 2016). Silisyum nanotellerin üretiminde kullanılan çözelti, molarite oranı 4,6M:0,02M olacak şekilde hidroflorik asit (HF, %38-40) ve gümüş nitrat (AgNO_3 , %99,5) karıştırılması ile elde edilmiştir. Önceden temizlenmiş Silisyum

kristal parçaları bu çözelti içerisinde oda sıcaklığında bekletilmiştir. Nanotel uzunlukları istenilen boyuta ulaştığında, Silisyum dilimler çözeltiden dışarı alınarak saf su ile durulanmıştır. Silisyum nanotellerin yüzeylerindeki Ag kalıntılarını gidermek için kristal dilimler seyreltilmiş nitrik asit çözeltisi içerisinde bekletilmiştir.

Silisyum alttaban üzerinde dikey yönde büyümüş nanotel kümelerinin yüzeylerindeki doğal oksit tabakası saf su ile seyreltilmiş HF çözeltisi ile kaldırılmıştır. Alttabanlar azot tabancası yardımıyla kurutulduktan sonra, önceden hazırlanmış Küprük oksit çözeltisi içerisinde dik şekilde daldırılıp 20 s boyunca bekletilmiştir. Bu sürenin sonunda çözeltiden dışarı çıkarılan Silisyum alttabanlar, ince filmin nanotellerin yüzeyine daha iyi yapışması amacıyla bir fırın içerisinde atmosferik ortamda 150 °C'de 5 dakika ısıtılmıştır. Kaplama ve ön ısıtma işlemi 10 defa tekrar edilmiştir. Üretilen heteroeklemlı yapılar, yapının p-kısmını oluşturan Küprük oksit ince filminin fiziksel özelliklerini iyileştirmek için 600 °C'de 20 dakika boyunca tavlama işlemine tabi tutulmuştur. İnce film kaplama ve tavlama işlemi, filmlerin fiziksel özelliklerini incelemek için önceden temizlenmiş soda-kireç-silikat cam alttabanlar üzerine de yapılmıştır.

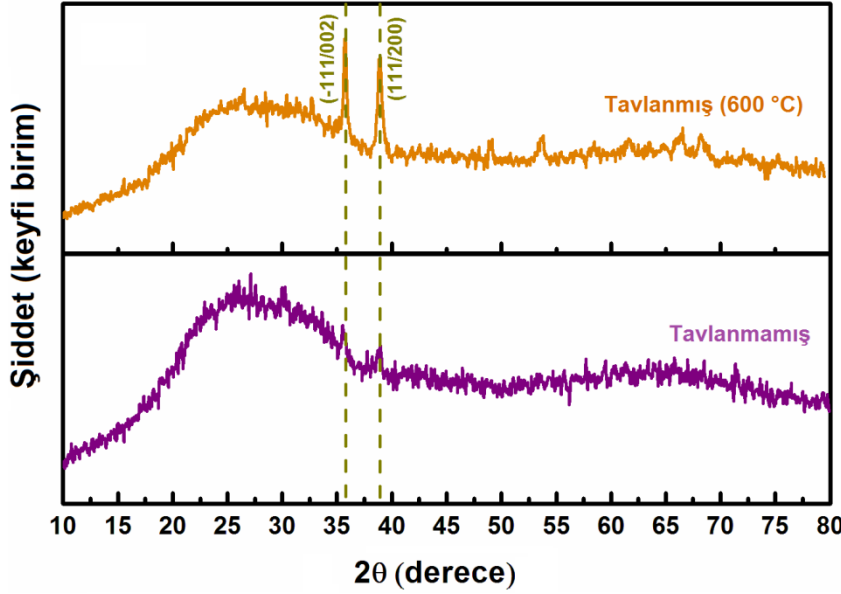
Nanoyapılı p-n heteroeklemlı diyotların üretiminin en son basamağı, arka ve ön metal kontaktlama işlemidir. n-tipi kristal Silisyum dilimlerin arka yüzüne Gümüş ve p-n eklemine olduğu ön yüze ise Altın kontaklar termal buharlaştırma metodu ile atılmıştır. Ön kontaklar için 1 mm çapında noktasal desene sahip bir maske kullanılmıştır. Kontaktların daha iyi yapışması ve omik kontak özelliği göstermeleri için diyot yapıları fırında 200 °C'de 15 dakika süresince ısıtılmıştır. Böylece Küprük oksit/Silisyum yapısından oluşan üç-boyutlu heteroeklemlı nanodiyotların üretimi tamamlanmıştır.

Küprük oksit ince filmlerin yapısal özellikleri, ortalama dalga boyu 1,54059 Å olan CuK α radyasyonu ile desteklenmiş Rigaku Miniflex model X-ışını kırınımı (XRD) sistemi ile incelenmiştir. İnce filmlerin ve heteroeklemlı yapıların morfolojik özellikleri, Nova NanoSEM 430 model Alan Yayınımlı Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) ve Veeco MultiMode V model Atomik Alan Mikroskopu (AFM) kullanılarak belirlenmiştir. İnce filmlerin optik özellikleri, Newport, Oriel 70679NS model 1 inç genişliğinde açıklara sahip 8 inç yarıçapında toplama küresi ile Newport, Oriel 70356 model bir monokromatörden ve 100 W gücünde bir halojen lambadan oluşan optik sistem kullanılarak analiz edilmiştir. Optik geçirgenlik (T) ve yansımaya (R) ölçümleri, 300-1100 nm dalga boyu aralığında yapılmıştır. Küprük oksit ince filmlerinin elektriksel özellikleri (iletkenlik tipi, taşıyıcı yoğunluğu ve mobilite), Hall-etkisi ölçümlerinden elde edilmiştir. Ölçümler için geleneksel dört-nokta dc Van der Pauw geometrisi kullanılmıştır ve ölçümler çapraz kontaklardan alınmıştır. Bu amaçla, kare cam alttabanlar üzerine büyütülen ince filmlerin köşelerine termal buharlaştırma sisteminde Altın kontaklar atılmıştır. Hall-etkisi ölçümünde programlanabilir Keithley 220 model akım kaynağı, Keithley 619 model multimetre ve yaklaşık 0,9 T değerinde manyetik alana sahip Walker Magnion Model FFD-4D elektromagnet kullanılmıştır. Küprük oksit/Silisyum heteroeklemlı nanodiyot yapıların elektriksel ölçümleri, karanlıkta ve ışık altında "Newport Solar Simulator" akım-gerilim (I - V) ölçüm sisteminde yapılmıştır. Ölçüm sırasındaki test şartları AM 1.5 G aydınlatma ve 100 mW/cm² ışık şiddetidir. I - V ölçümleri için üretilen nanoyapılı diyotların ön ve arka kontaklarına sabit bir akım uygulanmış ve voltaj düşmesi Labview PC programı ile kontrol edilen Keithley 2400 model bir akım-gerilim kaynağı ile 1×10^{-1} - 1×10^{-9} A akım aralığında ölçülmüştür. Üretilen nanodiyotlu yapıların dış kuantum verimi, 100 W'lık bir halojen lamba ve kalibre edilmiş bir fotodiyot ile desteklenmiş Oriel 7400 model bir monokromatör yardımıyla ölçülmüştür. Tüm ölçümler oda sıcaklığında ve çevresel koşullar altında yapılmıştır.

BULGULAR ve SONUÇLARIN İRDELENMESİ (RESULTS and DISCUSSIONS)

Kimyasal depolama yöntemi ile cam alttaban üzerine büyütülen Küprük oksit ince filmlerinin kristal yapısını ve film içinde var olan fazları belirlemek için XRD ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler, kimyasal daldırma ve bu işlemi takip eden ön ısıtma işleminin 10 defa tekrar edilmesi sonucunda elde edilen yaklaşık 450 nm kalınlığa sahip ince filmlerden alınmıştır. Şekil 1, tavlansız ve atmosferik şartlarda 600 °C'de 20 dakika süresince tavlansız ince filmlerin XRD desenini göstermektedir. Her iki ince film

örneğin de polikristal yapıya sahip olduğu açıkça görülmektedir. Tavlanmamış örneğin XRD deseninde $2\theta=35,5^\circ$ ve $38,6^\circ$ civarında birbirinden kolayca ayırt edilebilir iki kırınım piki göze çarpmaktadır. Hemen hemen eşit şiddete sahip bu kırınım pikleri, Küprik oksit fazının (-111/002) ve (111/200) Bragg yansımalarına aittir (JCPDS kart no. 45-0937). 600°C tavlama sıcaklığında bu piklerin şiddeti artmış ve pikler darlaşarak daha keskin hale gelmiştir. Bu sonuç, tavlanan örneğin film kristalinitesinin iyileştiğinin bir göstergesidir. Ayrıca, 600°C 'de Küprik oksit fazına ait yeni kırınım pikleri ortaya çıkmıştır (Akgül ve diğ., 2014). Ölçüm sınırları içerisinde, üretilen filmlerde herhangi bir ikincil fazın veya kirliliğin oluşmadığı da XRD ölçümleri ile ortaya konmuştur.



Şekil 1. Tavlanmamış ve 600°C 'de tavllanmış Küprik oksit ince filmlerinin X-ışını kırınım desenleri
Figure 1. X-ray diffraction patterns of as-deposited and annealed Cupric oxide thin films at 600°C

İnce film örneklerin ortalama kristalit boyutu, XRD ölçümlerinden elde edilen sonuçların analiz edilmesiyle belirlenmiştir. Bunun için $D=(0,9\lambda)/(\beta\cos\theta)$ ile tanımlanan Scherrer formülünden yararlanılmıştır. Burada D kristalit boyutuna, λ ölçümde kullanılan X-ışınının dalgaboyuna, β en şiddetli pikin yarı-şiddet genişliğine ve θ ise kırınım açısına karşılık gelir. Örneklerin XRD deseninde $35,5^\circ$ açı değerinde gözlenen (-111/002) kırınım piki, kristalit boyutu hesabında kullanılmıştır. Tavlanmamış ve 600°C 'de tavllanmış Küprik oksit ince filmlerin ortalama kristalit boyutu sırasıyla 7,9 ve 26,8 nm olarak belirlenmiştir. Tavlanan örneğin kristalit boyutunda kayda değer bir artış söz konusudur. Bu da tavlama işlemi ile ince film yapısına verilen termal enerjinin daha büyük boyutta Küprik oksit kristallerinin oluşumunu sağladığının bir göstergesidir. Böylece, ince film 600°C tavlama sıcaklığında oldukça yüksek derecede kristalin duruma geçmiştir.

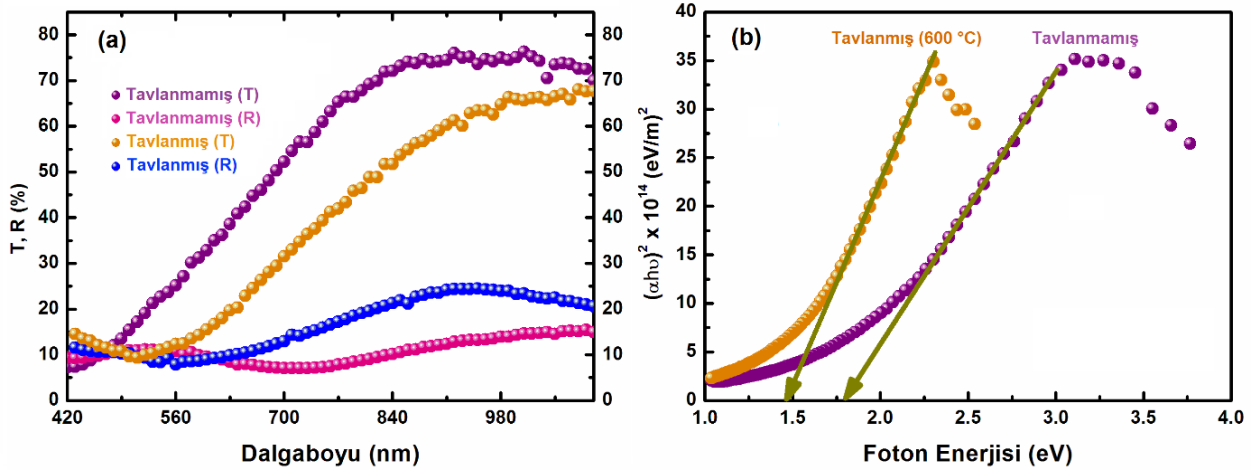
Küprik oksit ince film örneklerinin optik özellikleri, yansımaya (R) ve geçirgenliğe (T) ölçümleri yapılarak incelenmiştir. İnce filmlerin, spektrumun görünür bölgesinde (400-700 nm) oldukça soğurucu özellikte olduğu ancak yakın-kızılötesi bölgede (700-1100 nm) ise geçirgen oldukları gözlenmiştir (Şekil 2(a)). Optik geçirgenlik, 850-900 nm dalgaboyundan daha küçük dalgaboyu değerlerinde keskin bir biçimde azalmıştır. Deneysel olarak ölçülen optik yansımaya ve geçirme spektrumları, ince film örneklerin soğurma katsayısını (α) ve yasak bant aralığı (E_g) değerlerini belirlemek için kullanılmıştır. Dalgaboyuna bağlı soğurma katsayılarını belirlemek için;

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \left[\frac{(1-R)^2}{2T} + \left(\frac{(1-R)^4}{4T^2} + R^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (1)$$

denklemleri kullanılmıştır. Burada d film kalınlığı, R optik geçirgenlik yüzdesi ve T ise yansımaya yüzdesidir. İnce filmlerin yasak bant aralığı değerleri aşağıda verilen Tauc denklemi (Tauc, 1972) yardımıyla belirlenmiştir:

$$\alpha(h\nu) = A(h\nu - E_g)^n \quad (2)$$

Denklem 2'de $h\nu$ foton enerjisini, A foton enerjisinden bağımsız bir karakteristik sabiti ve n ise doğrudan ve dolaylı bant yapısına sahip yarıiletkenlerdeki izinli ve yasak elektronik geçişler için sırasıyla 1/2, 3/2, 2 veya 3 olan bir değerdir (Yacobi, 2002). Küprük oksit doğrudan (direk) bant aralıklı bir yarıiletken olduğundan, bu çalışmada üretilen Küprük oksit ince film örneklerin E_g değerleri izinli doğrudan geçişler varsayılarak ($n=1/2$) ve Şekil 2(b)'de görülen Tauc grafiğinin yüksek enerji bölgesindeki lineer kısmı kullanılarak hesaplanmıştır (Akgül ve diğ., 2014). Tavlanmamış ve 600 °C'de tavlanmış Küprük oksit ince filmlerin optik bant aralığı enerjisi sırasıyla 1,81 ve 1,47 eV bulunmuştur. Elde edilen bant aralığı değerlerinin literatürde Küprük oksit ince filmler için verilen değerler ile uyumlu olduğu gözlenmiştir (Ramya ve diğ., 2015). Tavlanan örneğin bant aralığında bir azalma vardır. Yarıiletkenlerin yasak bant aralığını etkileyen etkenler arasında kristalinite, doku büyüklüğü ve iç-stres sayılabilir. Bu çalışmada, XRD sonuçlarının da işaret ettiği gibi 600 °C'de tavlanan ince filmin kristal yapısında bir iyileşme ve kristalit boyutunda bir artış gözlenmiştir. Bu sonuç, kristallenmenin ve doku büyüklüğünün ince filmin yasak bant aralığını değiştiren faktörler arasında olduğunu açıkça göstermektedir. İnce filmlerin yapısındaki iç-stresin, film kalınlığı arttıkça azalma eğilimi gösterdiği bilinmektedir (Park ve diğ., 2011). Ancak, bu çalışmada elde edilen Küprük oksit ince filmlerin kalınlığında tavlama sonrasında kayda değer bir değişiklik gözlenmemiştir. Bu sebeple tavlama işlemi sonunda iyileşen kristal yapı ve artan doku büyüklüğü, bant aralığı değerinde gözlenen azalma ile ilişkilendirilebilir.



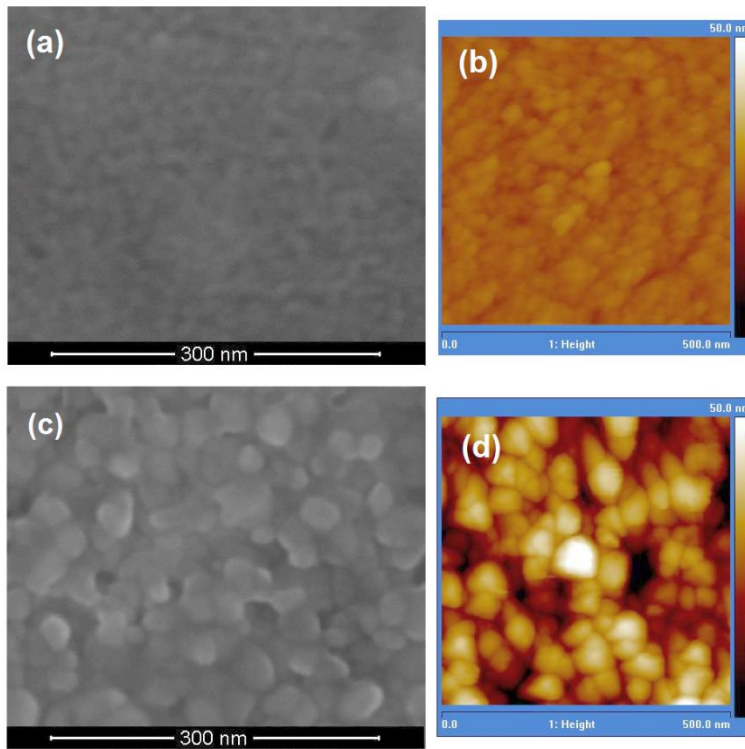
Şekil 2. Tavlanmamış ve 600 °C'de tavlanmış Küprük oksit ince filmlerin optik geçirgenlik (T), yansımaya (R) spektrumları (a) ve Tauc grafiği (b)

Figure 2. Optical transmission (T), reflection (R) spectra (a) and Tauc plot (b) of as-deposited and annealed Cupric oxide thin films at 600 °C

Şekil 3(a) ve (c) tavlanmamış ve 600 °C'de tavlanmış Küprük oksit ince filmlerin SEM resimlerini göstermektedir. Her iki örneğin cam alttabanlara iyi şekilde yapıştıkları ve yüzeylerinde herhangi bir çatlak, delik veya boşluk oluşumunun bulunmadığı şekilden görülmektedir. Tavlanmamış örneğin yüzeyinde şekil ve boyut olarak hayli düzenli dağılmış sıkı-paketli doku oluşumu vardır; bundan dolayı bu örnek için doku boyutu hesabı yapılamamıştır. Diğer taraftan, tavlama işlemi sonunda ince filmin yüzey morfolojisinin iyileştiği ve örneğin yüzeyinde nanoboyutlu küresel dokuların oldukça homojen bir dağılım sergilediği açıktır. Bunun ötesinde nano-küresel dokuların birbiri ile birleşerek

daha büyük dokular oluşturdukları da Şekil 3(c)'de görülmektedir. 600 °C'de tavlama tabi tutulmuş örneğin ortalama doku boyutu 45 nm olarak belirlenmiştir. XRD ve SEM ölçüm sonuçlarından elde edilen birbirinden farklı kristalit ve doku boyutu değerleri, kristalitlerin bir araya gelip topaklanarak daha büyük boyutlu dokular oluşturduklarının bir göstergesidir.

Küprük oksit ince film örneklerin yüzey pürüzlülüğü AFM tekniği ile incelenmiştir. Şekil 3(b) ve (d), tavlınmamış ve 600 °C'de tavlınmış Küprük oksit ince filmlerin AFM görüntülerine aittir. İnce filmlerin yüzeylerinin homojen dağılımlı düzgün dokular ile tamamen kaplandığı açıktır. Örneklerin yüzey pürüzlülükleri tavlınmamış örnek için 2,2 nm ve 600 °C'de tavlınmış örnek için 6,9 nm olarak ölçülmüştür. Bu sonuç, tavlamanın etkisiyle ince film yüzeyinin daha pürüzlü hale geldiğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, yine de ince film örneklerin oldukça düzgün yüzeylere sahip oldukları söylenebilir. Ayrıca, XRD analizi sonucunda gözlenen kristalit boyutundaki artışın ince filmlerin yüzey pürüzlülüğünü de artırdığı açıktır.



Şekil 3. Tavlınmamış ve 600 °C'de tavlınmış Küprük oksit ince filmlerin SEM (a ve c) ve AFM (b ve d) görüntüleri

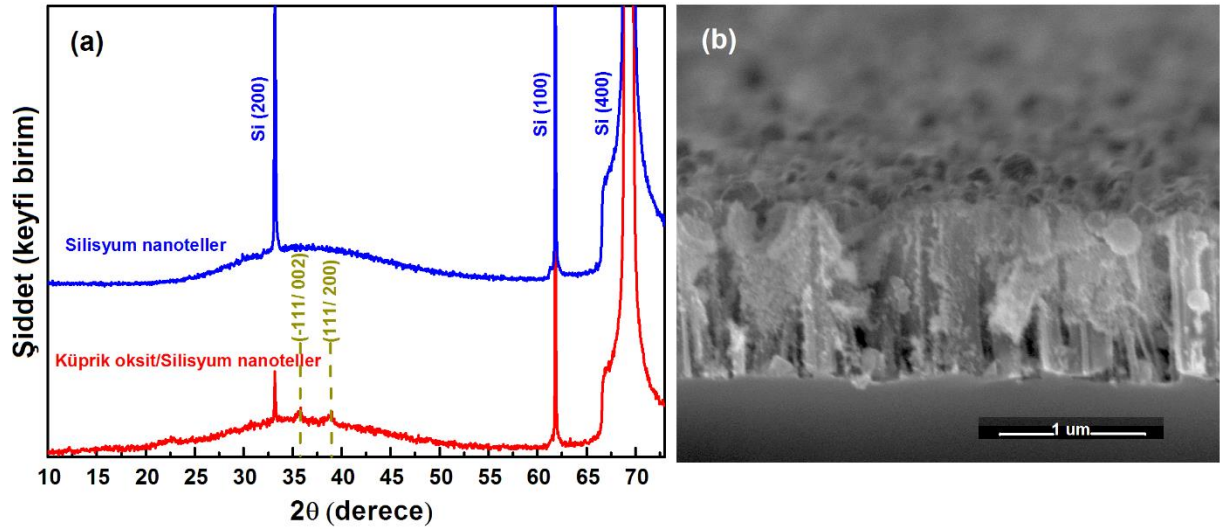
Figure 3. SEM (a and c) and AFM (b and d) images of as-deposited and annealed Cupric oxide thin films at 600 °C

Tavlınmamış ve 600 °C'de tavlınmış Küprük oksit ince film örneklerin taşıyıcı tipi, taşıyıcı yoğunluğu ve mobilite gibi elektriksel özellikleri, geleneksel dört-nokta dc Van der Pauw geometrisinin kullanıldığı Hall-etkisi ölçümlerinden elde edilmiştir. Üretilen ince filmler p-tipi yarıiletken özellik göstermişlerdir. Tavlınmamış örneğin mobilitesi 1,73 cm²/V.s ve taşıyıcı yoğunluğu 6,5×10¹⁸ m⁻³ olarak ölçülmüştür. Öte yandan 600 °C'de tavlınan ince filmin mobilitesi 29,8 cm²/V.s ve taşıyıcı yoğunluğu 69,4×10²¹ m⁻³'tür. Bu sonuç, tavlamanın etkisi ile ince filmin kristal yapısının iyileştiğini göstermektedir.

Şekil 4(a), akımsız dağlama yöntemi kullanılarak sentezlenen Silisyum nanotellerin Küprük oksit film tabakası ile kaplanmasından sonraki XRD desenidir. Karşılaştırma amacı ile ince film kaplanmamış nanotellerin kırınım deseni de Şekil 4(a)'ya eklenmiştir. Kırınım deseninde yer alan (-111/002) ve (111/200) pikleri, cam alttaban üzerine büyütülen Küprük oksit ince filmlerden elde edilen kırınım piklerine benzerdir. Küprük oksit dışında herhangi bir fazın oluşumuna ait bir kırınım deseni gözlenmemiştir. Böylece Silisyum nanotel-temelli p-n heteroeklem yapısından oluşan nanodiyotların

XRD ölçümleri, nanotellerin saf Küprük oksit fazına ait bir film tabakası ile kaplandığını işaret etmektedir. Kırınım desenlerinde göze çarpan $2\theta=33^\circ$, 62° ve 69° açı değerlerindeki pikler, kristal Silisyum'a ait kırınım pikleridir.

Kimyasal depolama yöntemi ile ince film kaplanmış Silisyum nanotellerin kesit-alan SEM resimleri Şekil 4(b)'de görülmektedir. Küprük oksit parçacıkları Silisyum nanotel kümelerinin arasına yayılarak nanotel yüzeylerine yapışmış ve böylece bütünleşmiş bir p-n yapısı oluşturmuşlardır. Nanotellerin arasındaki boşluklar, bu küçük yarıiletken parçacıklar ile kısmen doldurulmuştur. Silisyum nanotellerin uç kısımlarına doğru film kaplaması artmış ve en üst yüzeyde sürekli bir film tabakası oluşmuştur. Nanotel kümelerinin alt kısımlarındaki koyu renkli boş bölgeler, örneklerin ölçüm için bir elmas keski yardımıyla kırılmasından kaynaklanmıştır.



Şekil 4. Küprük oksit ince filmi ile kaplanmış Silisyum nanotellerin XRD deseni (a) ve kesit-alan SEM görüntüsü (b)

Figure 4. XRD pattern (a) and cross-sectional SEM image (b) of Silicon nanowires coated with Cupric oxide thin film

Üretilen Silisyum nanotel-temelli heteroeklemlı nanodiyotların elektriksel özellikleri, akım-gerilim (I - V) ölçümleri vasıtasıyla incelenmiştir. Deneyler, oda sıcaklığında -1 Volt'tan +1 Volt'a değişen gerilim aralığında karanlıkta ve 100 mW/cm^2 şiddetindeki AM 1.5 G aydınlatması altında yapılmıştır. Şekil 5(a), heteroeklemlı aygıtların tipik I - V karakteristiklerini göstermektedir. Lineer olmayan iyi-tanımlı doğrultma davranışı, Küprük oksit/Silisyum yapısındaki üç-boyutlu p-n eklemelerinin başarılı bir şekilde oluştuğunun bir göstergesidir. I_F ileri yöndeki akım ve I_R ise ters yöndeki akım olmak üzere, karanlık ortamda $\pm 1 \text{ V}$ gerilim değerleri için doğrultma oranı (I_F/I_R) yaklaşık 10^4 bulunmuştur. Bu sonuç, Küprük oksit ince filmi ile Silisyum nanoteller arasında tüketim (depleasyon) bölgesinin etkin biçimde oluşumunu açıkça yansıtmaktadır. Diyot yapısındaki nanotellerin üç-boyutlu doğası, gözlenen doğrultma oranına katkıda bulunan etkenler arasında sayılabilir.

Diyot özelliklerini belirleyen önemli parametreler arasında eklem kalitesini gösteren idealite faktörü (n) bulunmaktadır. İleri yönde oldukça düşük gerilim değerleri için I - V özellikleri, standart diyot eşitliği ile tanımlanabilir (Schroder, 2006):

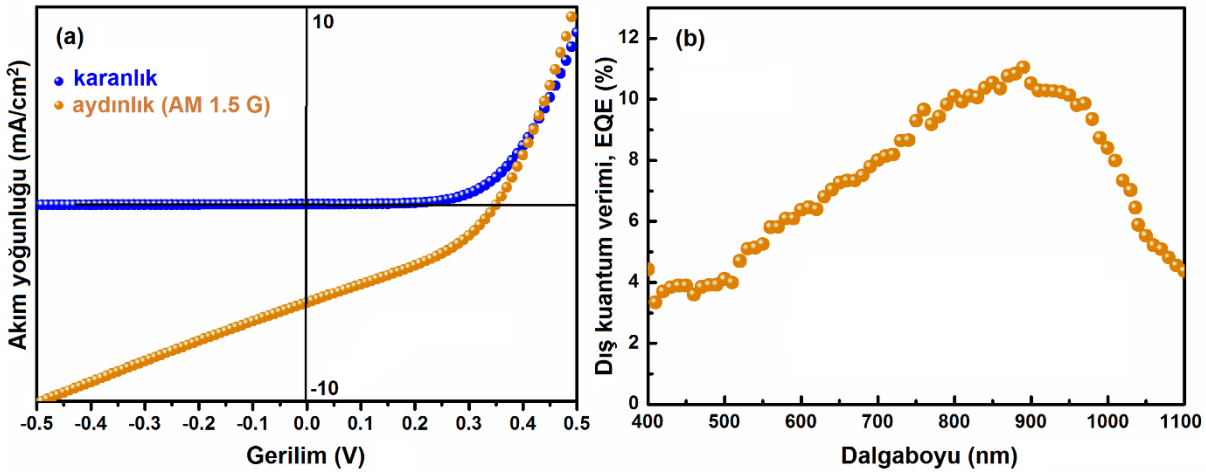
$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nk_B T}\right) - 1 \right] \quad (3)$$

Burada V uygulanan gerilimi, q elementer yükü, k_B Boltzman sabitini ve T ise Kelvin cinsinden mutlak sıcaklığı ifade eder. Bu çalışmada üretilen nanoboyutlu diyotların idealite faktörü, yarı-logaritmik I - V eğrilerinin pozitif gerilimlerdeki lineer bölgeleri için hesaplanan eğim değerinin aşağıdaki denklemde kullanılmasıyla belirlenmiştir:

$$n = \frac{q}{k_B T} \left(\frac{dV}{d(\ln I)} \right) \quad (4)$$

Silisyum nanotel-temelli heteroeklemlı nanodiyotların karanlık ortamdaki idealite faktörü 1,45 bulunmuştur. İdeal Shockley diyotu için n değerinin 1 olduğu bilinmektedir. Bu sebeple, bu çalışmada üretilen heteroeklemlı diyotlar için hesaplanan idealite faktörünün 1 değerine yakın olması optoelektronik uygulamalar için umut vericidir.

Şekil 5(a)'da görüldüğü gibi, aydınlatma şartları altında heteroeklemlı aygıt içinde tüketim bölgesinde oluşan elektron-boşluk çiftleri akıma katkıda bulunmuş ve I - V eğrisi negatif akım ekseninde aşağı doğru kaymıştır. Bu sonuç, üretilen p-n heteroeklemlı Küprük oksit/Silisyum yapısının fotovoltaik davranış sergilediğini açıkça göstermektedir. Üretilen nanodiyotlu yapılar arasında en iyi fotovoltaik özelliklere sahip aygıt için standart solar simülatör test şartları (oda sıcaklığı, 100 mW/cm² ışık şiddeti ve AM 1.5 G aydınlatması) altında 350 mV açık-devre gerilimi, 4,9 mA/cm² kısa-devre akım yoğunluğu, %34 dolun faktörü değerleri ölçülmüştür. Bu fotovoltaik parametrelere sahip diyot yaklaşık %0,58 değerinde verimlilik değeri göstermiştir.



Şekil 5. Küprük oksit/Silisyum heteroeklemlı nanodiyotların karanlıkta ve AM 1.5 G aydınlatması altında tipik I - V karakteristikleri (a) ve dış kuantum verimi (b)

Figure 5. Typical I - V characteristics (a) and external quantum efficiency of (b) Cupric oxide/Silicon heterojunction nanodiodes under dark and AM 1.5 G illumination

Seri direnç ve şönt direnci gibi parazitik dirençler, fotovoltaik aygıtların dolun faktörünü ve verimliliğini önemli oranda azaltan ve çalışma performansını düşüren faktörlerdir. Bu çalışmada üretilen yapıları nanoyapılı fotovoltaik diyotlar için seri direnç $\sim 35 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ve şönt direnci ise $\sim 750 \Omega \cdot \text{cm}^2$ olarak belirlenmiştir. Elde edilen değerler göz önüne alındığında, nanodiyotlu yapıların fotovoltaik verimliliği üzerinde yüksek miktardaki seri direncin ve düşük miktardaki şönt direncinin ortak etkisinin olduğu açıktır. Seri direnç, kısa devre-akım yoğunluğunun azalmasına ve şönt direnci ise açık-devre geriliminin düşmesine neden olmuştur. Buna bağlı olarak incelenen diyot yapılarının dolun faktörü ve güç dönüşüm verimliliği, yapılarıdaki parazitik dirençler tarafından sınırlandırılmıştır.

Üretilen fotovoltaik nanodiyotların dış kuantum verimi (EQE) ölçümleri, kalibre edilmiş bir ışık kaynağı yardımıyla 1 V ters gerilim altında 400-1100 nm dalgaboyu aralığında yapılmıştır. Heteroeklemlı yapı, Şekil 5(b)'de görüldüğü gibi spektrumun tüm dalgaboyu bölgesinde ışıkla etkileşmiştir. Bu sonuç yapıdaki elektron-boşluk oluşumunun, yük taşıyıcılarının eklemde ayrışmasının ve yüklerin metalik kontaklara taşınmasının etkin biçimde gerçekleştiğini göstermektedir. Ayrıca, nanotel kümelerinin yansıma-engelleyici özelliği gelen ışığın daha fazla soğurulmasını sağlayarak EQE değerinde artışa yol açmıştır.

Bu çalışmada gözlenen fotovoltaik performans ve güç dönüştürme verimliliği, diğer Silisyum

nanotel-temelli fotovoltaik diyotlar için elde edilen değerler kadar yüksek olmayabilir. Fakat nanotellerin üretim işlemleri ile boyut ve geometri özellikleri optimize edilerek, nanoteller üzerine kaplanan Küprük oksit film tabakasının elektrik, optik özellikleri ve kristal kalitesi daha da iyileştirilerek ve aygıt yapısında oluşabilecek ön ve arka kontak problemleri ortadan kaldırılarak bu çalışmada gözlenen verimlilik daha da yüksek değerlere geliştirilebilir.

SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, Silisyum nanoteller kolay ve ucuz akımsız dağlama yöntemi ile büyütüldü ve üç-boyutlu heteroeklemlı nanodiyotlar üretmek için Küprük oksit ince film tabakası sentezlenen Silisyum nanotellerin üzerine kimyasal depolama metodu ile başarılı bir şekilde kaplandı. Elde edilen yapılar oda sıcaklığında, karanlık ve aydınlık ortamda p-n diyot karakteristikleri gösterdi. İdealite faktörü ve doğrultma oranı gibi diyot özelliğini belirleyen parametreler 1,45 ve 10^4 olarak belirlendi. Üretilen nanoyapılarda gözlenen kayda değer diyot karakteristikleri, heteroeklemlerin üç-boyutlu doğası ve ışık yansıma, tuzaklama ve soğurma özelliklerini iyileştiren gelişmiş yüzey alanı ile ilişkilendirildi. Nanotel temelli Küprük oksit/Silisyum p-n heteroeklemlı diyotların fotovoltaik performansı yine bu çalışmada incelendi. Aydınlatma altında, üretilen fotovoltaik diyotlar için 350 mV açık-devre gerilimi, 4,9 mA/cm² kısa-devre akım yoğunluğu ve %34 dolum faktörü değerleri elde edildi. Belirlenen bu fotovoltaik parametreler ile yaklaşık %0,58 değerinde güneş enerjisi dönüştürme verimi ölçüldü.

KATKI BELİRTME (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma FEB 2014/26-BAGEP nolu proje kapsamında Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Akgul, G., Aksoy Akgul, F., Mulazimoglu, E., Unalan, H. E., Turan, R., 2014, "Fabrication and Characterization of Copper Oxide-Silicon Nanowire Heterojunction Photodiodes", *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 47, pp. 065106-1-065106-7.
- Akgul F. A., Akgul G., Yildirim N., Unalan H. E., Turan R., 2014, "Influence of Thermal Annealing on Microstructural, Morphological, Optical Properties and Surface Electronic Structure of Copper Oxide Thin Films", *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 147, pp. 987-995.
- Akgul, G., Aksoy Akgul, F., Unalan, H.E., Turan, R., 2016, "Photovoltaic Performance of Gallium-doped ZnO Thin Film/Si Nanowires Heterojunction Diodes", *Philosophical Magazine*, Vol. 96, No. 11, pp. 1093-1109.
- Balamurugan, B., Mehta, B.R., 2001, "Optical and Structural Properties of Nanocrystalline Copper Oxide Thin Films Prepared by Activated Reactive Evaporation", *Thin Solid Films*, Vol. 396, pp. 90-96.
- Bauer, J., Fleischer, F., Breitenstein, O., Schubert, L., Werner, P., Gösele, U., Zacharias, M., 2007, "Electrical Properties of Nominally Undoped Silicon Nanowires Grown by Molecular Beam Epitaxy", *Applied Physics Letters*, Vol. 90, pp. 012105-1-012105-3.
- Colli, A., Fasoli, A., Beecher, P., Servati, P., Pisana, S., Fu, Y., Flewitt, A.J., Milne, W.I., Robertson, J., Ducati, C., De Franceschi, S., Hofmann, S., Ferrari, A.C., 2007, "Thermal and Chemical Vapor Deposition of Si Nanowires: Shape Control, Dispersion, and Electrical Properties", *Journal of Applied Physics*, Vol. 102, pp. 034302-1-034302-13.
- Figueiredo, V., Elangovan, E., Gonçalves, G., Barquinha, P., Pereira, L., Franco, N., Alves, E., Martins, R., Fortunato, E., 2008, "Effect of Post-annealing on the Properties of Copper Oxide Thin Films Obtained from the Oxidation of Evaporated Metallic Copper", *Applied Surface Science*, Vol. 254, pp. 3949-3954.
- Fu, Y.Q., Colli, A., Fasoli, A., Luo, J.K., Flewitt, A. J., Ferrari, A.C., Milne, W. I., 2009, "Deep Reactive Ion Etching As a Tool for Nanostructure Fabrication", *Journal of Vacuum Science & Technology B*:

- Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, Vol. 27, pp. 1520-1526.
- Garnett, E.C., Yang, P., 2008, "Silicon Nanowire Radial p-n Junction Solar Cells", *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 130, pp. 9224-9225.
- Hochbaum, A. I., Fan, R., He, R., Yang, P., 2005, "Controlled Growth of Si Nanowire Arrays for Device Integration", *Nano Letters*, Vol. 5, pp. 457-460.
- Jayatissa, A. H., Guo, K., Jayasuriya, A.C., 2009, "Fabrication of Cuprous and Cupric Oxide Thin Films by Heat Treatment", *Applied Surface Science*, Vol. 255, pp. 9474-9479.
- Jia, G., Steglich, M., Sill, I., Falk, F., 2012, "Core-shell Heterojunction Solar Cells on Silicon Nanowire Arrays", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 96, pp. 226-230.
- Johan, M.R., Mohd-Suan, M.S., Hawari, N.L., Ching, H.A., 2011, "Annealing Effects on the Properties of Copper Oxide Thin Films Prepared by Chemical Deposition", *Int. J. Electrochem. Sci.*, Vol. 6, pp. 6094-6099.
- Kaya, M., 2016, *p-tipi Bakır Oksit İnce Film/n-tipi Silisyum Nanotel Heteroeklemlı Diyotların Üretimi ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.
- Ma, X. L., Zhu, Y. L., Zhang, Z., 2002, "Growth Orientation of One-dimensional Silicon Nanowires Prepared by Thermal Evaporation", *Philosophical Magazine Letters*, Vol. 82, pp. 461-468.
- Maruyama, T., 1998, "Copper Oxide Thin Films Prepared by Chemical Vapor Deposition From Copper Dipivaloylmethanate", *Solar Energy Materials And Solar Cells*, Vol. 56, pp. 85-92.
- Morales, A. M., 1998, "A Laser Ablation Method for the Synthesis of Crystalline Semiconductor Nanowires", *Science*, Vol. 279, pp. 208-211.
- Mridha, S., Basak, D., 2006, "Investigation of a p-CuO/n-ZnO Thin Film Heterojunction for H₂ Gas-sensor Applications", *Semiconductor Science and Technology*, Vol. 21, pp. 928-932.
- Papadimitropoulos, G., Vourdas, N., Vamvakas, V.E., Davazoglou, D., 2006, "Optical and Structural Properties of Copper Oxide Thin Films Grown by Oxidation of Metal Layers", *Thin Solid Films*, Vol. 515, pp. 2428-2432.
- Park, J.Y., Kwon, T. H., Koh, S. W., Kang, Y. C., 2011, "Annealing Temperature Dependence on the Physicochemical Properties of Copper Oxide Thin Films", *Bulletin of Korean Chemical Society*, Vol. 32, pp. 1331-1335.
- Ramya, V., Neyvasagam, K., Chandramohan, R., Valanarasu, S., Benial, A.M.F., 2015, "Studies on Chemical Bath Deposited CuO Thin Films for Solar Cells Application", *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, Vol. 26, pp. 8489-8496.
- Schroder, D. K., 2006, *Semiconductor Material and Device Characterization*, 3rd ed., John Wiley & Sons, New York, NY.
- Serin, N., Serin, T., Horzum, Ş., Çelik, Y., 2005, "Annealing Effects on the Properties of Copper Oxide Thin Films Prepared by Chemical Deposition", *Semiconductor Science and Technology*, Vol. 20, pp. 398-401.
- Sharma, S., Sunkara, M.K., 2004, "Direct Synthesis of Single-crystalline Silicon Nanowires Using Molten Gallium and Silane Plasma", *Nanotechnology*, Vol. 15, pp. 130-134.
- Sivakov, V., Andra, G., Gawlik, A., Berger, A., Plentz, J., Falk, F., Christiansen, S. H., 2009, "Silicon Nanowire-based Solar Cells on Glass: Synthesis, Optical Properties, and Cell Parameters", *Nano Letters*, Vol. 9, pp. 1549-1554.
- Srivastava, S.K., Kumar, D., Singh, P.K., Kar, M., Kumar, V., Husain M., 2010, "Fabrication of Silicon Nanowire Arrays Based Solar Cell with Improved Performance", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 94, pp. 1506-1511.
- Srivastava, S. K., Kumar, D., Schmitt, S. W., Sood, K. N., Christiansen, S. H., Singh, P. K., 2014, "Large Area Fabrication of Vertical Silicon Nanowire Arrays by Silver-assisted Single-step Chemical Etching and Their Formation Kinetics", *Nanotechnology*, Vol. 25, pp. 175601-1-175601-17.
- Tauc, T. J., 1972, *Optical Properties of Solids*, North-Holland, Amsterdam.

- Tian, B., Zheng, X., Kempa, T. J., Fang, Y., Yu, N., Yu, G., Huang, J., Lieber, C. M., 2007, "Coaxial Silicon Nanowires as Solar Cells and Nanoelectronic Power Sources", *Nature*, Vol. 449, pp. 885-889.
- Yacobi, B.G., 2002, *Semiconductor Materials: An Introduction to Basic Principles*, Kluwer Academic/Plenum Publishers, London.



SANTRİFÜJ BİR KALP DESTEK POMPASI PROTOTİPİNİN SAYISAL VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Ömer İNCEBAY¹, Rafet YAPICI²

^{1,2}Selçuk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Müh. Bölümü Selçuklu/Konya TÜRKİYE
¹oincebay@selcuk.edu.tr, ²rafet@selcuk.edu.tr

(Geliş/Received: 17.03.2017; Kabul/Accepted in Revised Form: 27.04.2017)

ÖZ: Bu çalışmada büyük ölçekli pompaların tasarımında kullanılan konvansiyonel yöntemle tasarlanan prototip bir santrifüj kalp destek pompasının HAD yazılımları aracılığıyla santrifüj pompa karakteristiklerinin belirlenmesi ve bu karakteristiklerin deneysel olarak doğrulanması yapıldı. Ayrıca HAD simülasyonu ile pompanın cidarlarındaki kayma gerilmeleri incelendi. Pompanın tasarım parametreleri olarak 5 lt/dak debi, 3000 dev/dak dönme sayısı ve 100 mm-Hg basınç farkı seçildi. Tasarlanan pompa çarkının katı modellenmesi oluşturularak hızlı prototipleme cihazlarıyla imalatı yapıldı. Katı modeli oluşturulan pompa salyangozu alüminyum bloktan CNC dik işlem merkezinde imal edildi. Pompanın performans deneylerinde akışkan olarak; su ve akışkan özellikleri kana benzer olan hacimce %40 gliserin-%60 su çözeltisi kullanıldı. Tasarım dönme sayısı ve debisinde yaklaşık 72 mm-Hg'lik bir toplam basınç farkı elde edildi. Akışkan olarak su kullanılan testlerde HAD simülasyonu ile belirlenen pompa performansı sonuçları ile deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyum olduğu görüldü. Akışkan olarak su-gliserin çözeltisi kullanılan deneysel sonuçlarla HAD simülasyon sonuçları arasında yaklaşık %15 sapma olduğu görüldü. HAD simülasyonlarıyla yapılan analizlerde; su için 664.7Pa, su-gliserin çözeltisi için 1271 Pa kayma gerilmesi değerleri bulundu. Gelecek çalışmalarda bu kayma gerilmesi değerlerinin azaltılması üzerine yoğunlaşılacaktır.

Anahtar Kelimeler: HAD, Kalp Destek Pompası, LVAD, Santrifüj Pompa

Numerical and Experimental Investigation of A Centrifugal Heart Assist Pump Prototype

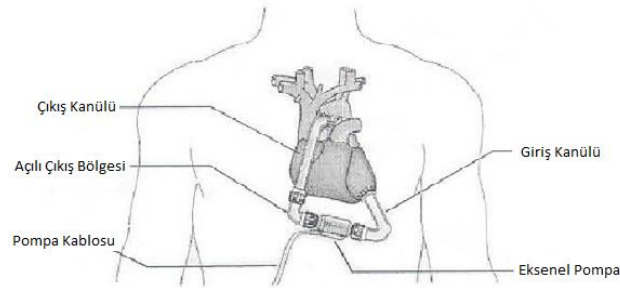
ABSTRACT: In this study, pump characteristics of a prototype centrifugal ventricular assist pump, which is designed with conventional design method of large scale pumps, have been determined by CFD software and these characteristics are confirmed experimentally. Also shear stresses on the walls of the pump were inspected with CFD simulations. As design parameters; 5 L/min flow rate, 3000 rpm motor speed and 100 mm-Hg pressure rise have been selected. Solid model of the designed pump was prepared and manufactured by rapid prototyping machine. Volute of the pump was manufactured from aluminum block at CNC milling machine. At performance tests of the pump, water and 40% glycerin-60%water solution, which have similar rheological properties with blood, were used as working fluid. At design speed and flow rate, 72 mm-Hg of pressure rise has been obtained. For tests which water used as fluid, a fine agreement between CFD determined and experimental pump performance results has been seen. For tests which water-glycerin solution used as fluid, there is nearly 15% of deviation between CFD determined and experimental pump performance results. At CFD simulations shear stress value for water was 664.7 Pa and 1271 Pa for glycerin solution. Upcoming researches will be focused on decreasing this shear stress level.

Key Words: CFD, Centifugal Pump, LVAD, Ventricular Assist Pump

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dünyada her yıl binlerce insan kalp rahatsızlıklarından dolayı hayatını kaybetmektedir. T.C. Sağlık Bakanlığı'nın "Türkiye Kalp ve Damar Hastalıkları Önleme ve Kontrol Programı"nda belirtilen verilere göre 2014 yılında dolaşım sistemine bağlı hastalıklar nedeniyle yaşanan can kayıplarının yaklaşık 88.500 kadarı kalp hastalıkları sonucudur (T.C. Sağlık Bakanlığı, 2015). Bu kayıpların önlenmesi veya kalp rahatsızlığı olan insanların yaşam kalitelerini artırmak için pek çok çalışma yapılmaktadır.

Bu çalışmalardan biri de mekanik sistemlerle kalp rahatsızlıklarının hayata olumsuz etkilerinin önüne geçilmesidir. Esasen bir pompa olan kalbin yerine geçecek veya ona destek olacak mekanik sistemler olarak pompalar kullanılmaktadır. Bu çalışmada sol karıncık kalp destek pompasının (LVAD) tasarımı incelenmiştir. Şekil-1.'de bir LVAD uygulaması şematik olarak gösterilmiştir. Bu pompalar göğüs kafesinin içine yerleştirilerek, kanı kalbin sol karıncığına bağlanan giriş borusundan emip aort damarına bağlanan çıkış borusuna basmaktadır. Sol Karıncık Destek Pompalarının kullanımında hastanın kendi kalbi çalışmaya devam eder, pompa kalbe sadece yardımcı olur.



Şekil 1. LVAD uygulaması şematik gösterimi (Fan ve diğ., 2009)

Figure 1. Schematic representation of LVAD application

Ancak bu pompaların kullanımında pek çok sorunla karşılaşılabilir. Bu sorunların başında pompa içinde meydana yüksek kayma gerilmeleri sonucu kan hücrelerinin deformasyona uğraması ve bunun sonucunda hemoliz meydana gelmesidir (Reul ve Akdiş, 2000). Kan hücrelerindeki bu deformasyonları minimuma indirmek için pompa içindeki kayma gerilmelerinin mümkün olan en düşük değere indirilmesi gerekmektedir. Kan hücrelerinin dayanabileceği kayma gerilmeleri üzerine pek çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların sonuçlarına göre kayma gerilmesine maruz kalma süreleri kıaldıkça kayma gerilmesi limiti artmış ve 10^{-6} s. Süre için 4000 Pa seviyesinde bir kayma gerilmesine ulaşmıştır (Yen ve diğ., 2014). Her ne kadar kanın maruz kalma süreleri kıaldıkça hücrelerin dayanabilecekleri kayma gerilmesi değeri artsa da araştırmacılar, kalp destek pompaları için kayma gerilmesi limiti olarak 400 Pa değerini kabul etmektedirler (Lua ve diğ., 2001). Pompa tasarımı yapılırken bu özel durum da dikkate alınmalıdır.

Kalp destek pompalarında kayma gerilmeleri üzerine yapılan bir çalışmada; sıcak film sensörüyle, farklı hızlarda pompa kapağında oluşan kayma gerilmeleri ölçülmüş, kanat ile kapak arasında 3000 dev/dak hızda 586 Pa değerinde kayma gerilmesi bulunmuştur (Mizunuma ve Nakajima, 2007).

Santrifüj kalp destek pompalarının tasarlanması üzerine yapılan başka bir çalışmada üç geometrik özellikte - çark-salyangoz boşluğu, kanat çıkış açısı ve çıkış borusu konumu- değişiklik yaparak en uygun tasarım bulunmaya çalışılmıştır. Bu çalışmaya göre çark-salyangoz boşluğu hemoliz oluşumu açısından önemli bir pompa tasarım parametresidir (Masuzawa ve diğ., 1999).

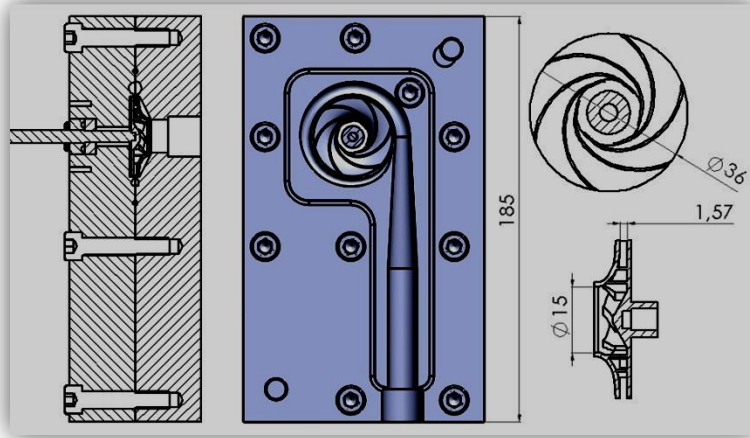
Yeni tasarlanmış bir santrifüj kalp destek pompasının neden olduğu kan hücresi deformasyonunu ölçmek üzere yapılan kapsamlı bir çalışmada PTV (Particle Tracking Velocimetry) ve HAD metoduyla pompa incelenmiş ve hemoliz testiyle karşılaştırılmıştır (Nishida ve diğ., 2009).

Kan pompalarının tasarım aşamalarında hesaplamalı akışkanlar dinamiği metodlarından yararlanılarak ön tasarım ve analizler yapıp, karşılaşılabilecek çeşitli uyumsuzluklara karşı önlemler alınıp iyileştirmeler gerçekleştirilebilmektedir. Bu çalışmanın amacı da; büyük ölçekli rotodinamik çarklı

pompalar için kullanılan tasarım yöntemiyle tasarlanan pompanın performansını sayısal ve deneysel olarak belirlemek ve sonuçlarını karşılaştırmaktır. Böylece kalp destek pompalarının tasarımında klasik (Stepanoff, 1957) yöntemin uygunluğu değerlendirilip iyileştirme yolları bulunabileceği değerlendirilmektedir.

MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Tasarlanacak olan Sol Karıncık Kalp Destek Pompasının (LVAD) tasarım parametreleri olarak; istirahat halindeki nominal aortik basınç 100 mm-Hg pompa yükü, yetişkin bir insan için istirahat halindeki nominal kan ihtiyacı 5 L/dak debi (Behbahani ve diğ., 2009) ve 3000 dev/dak pompa devri seçildi. Bu parametreler üzerinden klasik metotla örtülü çarklı bir tam santrifüj pompa için çark ve salyangozu tasarlandı. Bu tasarlanan pompanın üç boyutlu CAD programlarıyla katı modeli oluşturulup bu model üzerinde ticari bir HAD yazılımı olan ANSYS Fluent 15 programı yardımıyla pompanın sayısal analizleri yapıldı. Bu analizlere dayanılarak ilk katı modelde; çark dış çapı artırılması, kanat çıkış açısı azaltılması ve salyangoz çıkış borusu genişleme açısının azaltılması değişiklikleri yapıldı. Modifiye edilen katı modeline uygun olarak pompa imal edildi ve deney seti kurularak imal edilen pompanın deneysel performansı belirlendi; sayısal ve deneysel performanslar birbirleriyle kıyaslandı. İmal edilen pompanın çarkı ve salyangozu Şekil-2.'de gösterildi.



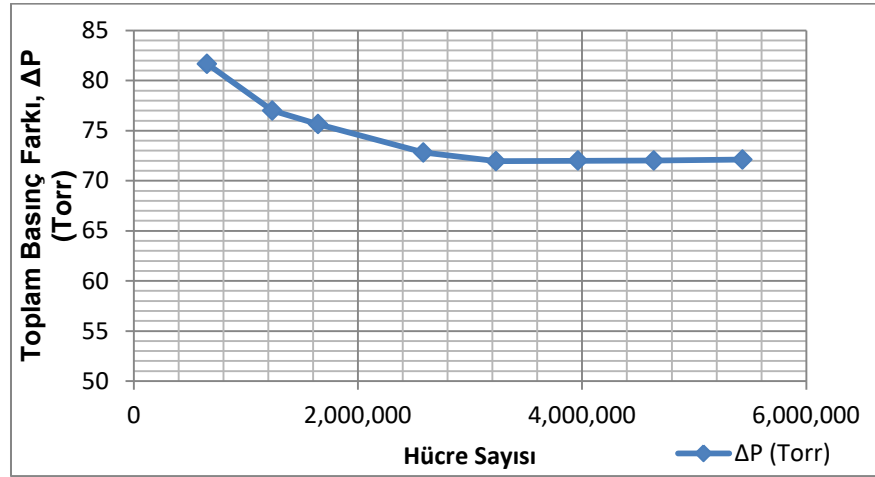
Şekil 2.Pompa çarkı ve salyangozu

Figure 2.Pump impeller and volute

Kalp destek pompalarının tasarımında kullanılan parametrelerin optimizasyonu üzerine yapılan bir çalışmada maksimum verime ulaşabilmek için özgül hız ve özgül çap arasındaki ilişki incelenmiştir (Mozafari ve diğ., 2017). Bizim çalışmamızda tasarım debisi ve dönme sayısında elde edilen 0.52 özgül hız ve 6.56 özgül çapın Mozafari ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada gösterilen 0.5 özgül hız için yaklaşık 6 özgül çap verisine uygun olduğu görüldü.

HAD Simülasyonu(CFD Simulation)

HAD simülasyonu için pompa çarkının deney düzeneğinde kullanılabilecek bir salyangoz bloğu içine yerleştirilmiş modeli hazırlanıp, model içindeki akış alanı için Fine 100 mertebesinde çözüm ağı oluşturuldu. Analizlerde hesaplanan sonucun, çözüm ağındaki düğüm sayısına bağlılığının tespiti için farklı çözüm ağı sayılarında ve tasarım debisinde analizler yapıp sonuçları Şekil-3.'de verildi. Bu çözüm ağı bağımsızlık testi değerlerine göre yaklaşık 4 milyon adet hücre ile kararlı (değişmeyen) bir sonuca ulaşılabildi.



Şekil 3. Hücre sayısı ve toplam basınç farkı arasındaki ilişki

Figure 3. Relationship between cell number and total pressure difference

Bu çözüm ağı üzerinden Transition SST türbülans modeli kullanılarak 1-7 L/dak arasında 7 noktada debiler tanımlanıp sabit 3000 dev/dak dönme sayısında çözümler yapıldı. Basınç bazlı çözücüde yöneten denklemleri (süreklilik ve momentum) ve türbülans denklemleri üçüncü mertebeden doğruluktaki ayrıklaştırma şemaları kullanılarak çözüldü. Çözüm yakınsama kriteri olarak 9×10^{-5} belirlendi. Çözümlerde yer çekim ivmesi deney düzeneğine uygun olarak pompa çıkış borusunun ters yönünde 9.81 m/s^2 olacak şekilde tanımlandı. Akışkan olarak önce kana yakın özellikler gösterdiği için su kullanıldı. Daha sonra program içinde suyun akışkan özellikleri; yoğunluk 1050 kg/m^3 , viskozite 0.0035 Pa.s olacak (Song ve diğ., 2010) şekilde değiştirilerek test akışkanı kana daha çok yaklaştırıldı ve analizler tekrarlandı. Pompaya giriş ve çıkışlarda türbülans şiddetini tanımlamak için;

$$TI = 0,16 * Re^{-1/8} \quad (1)$$

ifadesi kullanıldı. Pompa performansının tespitinde kullanılan parametrelerden:

Toplam basınç farkı;

$$\Delta P_t = P_{tç} - P_{tg} \quad (2)$$

Buradaki toplam basınç;

$$P_t = P + \rho * \frac{v^2}{2} \quad (3)$$

Pompa çarkının gücü;

$$N_{ç} = T * \omega \quad (4)$$

Akışkan gücü;

$$N_a = \Delta P_t * Q \quad (5)$$

Pompanın mil gücü

$$N_m = N_{mot,yükte} - N_{mot,boşta} \quad (6)$$

Pompa hidrolik verimi;

$$\eta_h = \frac{\Delta P_t * Q}{N_{ç}} = \frac{N_a}{N_{ç}} \quad (7)$$

Pompa verimi (genel);

$$\eta_p = \frac{N_a}{N_m} \quad (8)$$

formülleriyle hesaplanmıştır.

Deneysel Yöntem (Experimental Method)

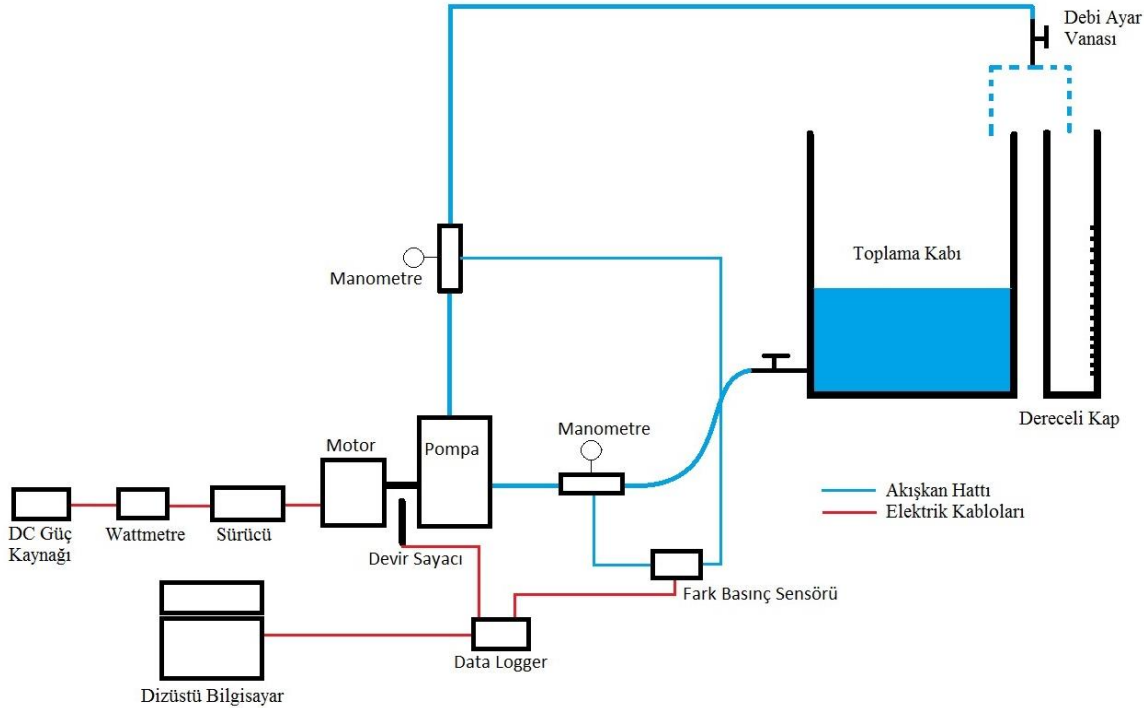
Klasik metotla hesaplanan ve katı modeli oluşturulan pompa çarkı, lazer sinterleme metoduyla Pa2200 (%100 naylon) malzemeden üretildi. Pompanın salyangozunun malzemesi için paslanmaz olması ve kolay işlenebilmesi açısından alüminyum tercih edildi. Salyangoz alüminyum bloktan CNC dik işlem merkeziyle imal edildi. Pompa mili imalat kolaylığı açısından bronz malzemeden imal edildi. Sızdırmazlık elemanı olarak 6X16X7 mm yaylı döner mil keçesi, yataklama için de kapaklı 625 rulman kullanıldı. Kurulan deney düzeneğinin şematik gösterimi Şekil-4.'de verilmiştir.

İçinde deney akışkanının bulunduğu ağzı atmosfere açık toplama kabı, iç çapı 10.5 mm olan esnek hortumlarla pompaya bağlanmıştır. Pompa çıkışında da tekrar aynı tip esnek hortumlarla bu kaba geri basıldı. Basma hattının üzerine debiyi ayarlamak için bir vana konuldu. Akışkanı, debi ölçümü için dereceli kaba yönlendirmek amacıyla debi ayar vanasından sonra esnek bir hortum yerleştirildi. Hortumun yönü değiştirilerek akışkan dereceli kaba yönlendirildi. Deneyde debi, 20 ml hassasiyetli dereceli bir kap ile suyun hacmi, bir kronometreyle suyun alınma zamanı ölçülerek belirlendi.

Emme ve boşaltma hatlarına basınç ölçümlerinin yapılacağı, üzerlerinde 2 mm çapında delikler olan iki alüminyum basınç prizi takıldı. Giriş ve çıkışlardaki basınç prizleri arasında 51 cm yerden yükseklik farkı bulunmaktadır. Bu prizlere bağlanan ince hortumlarla basınç sinyali fark basınç sensörüne aynı seviyede iletildi. Toplam basınç farkının ölçümü için %0.25 hassasiyete sahip Valcom 27D Fark basınç sensörü kullanıldı. Bu iki noktadaki efektif basınçların kontrolü iki adet manometre ile yapıldı.

Motor devrinin ölçümü ise motor-pompa mili bağlantısı üzerine takılan bir endüktif proximity sensörüyle yapıldı. Deneyde motor devir sayacı olarak Sick IME1603 endüktif proximity sensör kullanıldı. Bu sayacın doğrulaması %0.05 hassasiyete sahip Lutron DT2236 dijital foto takometre ile yapıldı.

Deneyde güç ölçümü, motor güç hattına bağlanan dijital göstergeli %1 hassasiyete sahip bir wattmetre ile yapıldı.



Şekil 4. Deney düzeneğinin şematik gösterimi

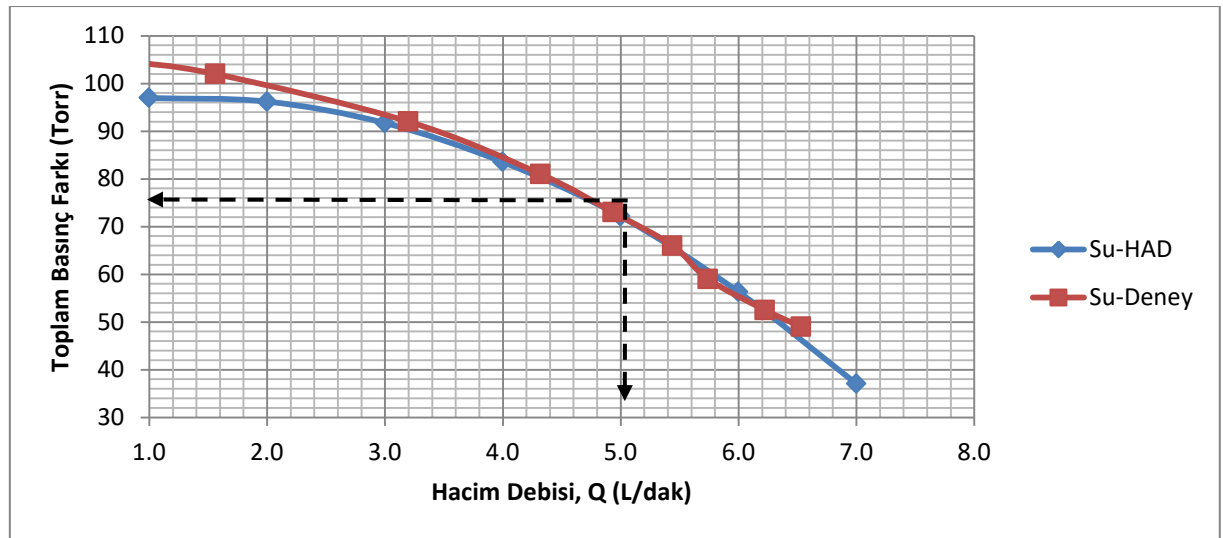
Figure 4. Schematic representation of experiment setup

Deneylerin ilk aşamasında akışkan olarak su kullanıldı. Sabit 3000 dev/dak devirde 0-7 L/dak. Debi aralığında 9 farklı noktada ölçümler yapıldı. Deneyin ikinci aşamasında kana benzer akışkan özellikleri

gösteren hacimce %40 gliserin-%60 su çözeltisi (Untarouve diğ., 2005) kullanıldı. Bu çözelti için de 0-6 L/dak debi aralığında 8 noktada ölçümler yapıldı.

SAYISAL-DENEYSEL SONUÇLAR ve TARTIŞMA (NUMERICAL-EXPERIMENTAL RESULTS and DISCUSSION)

Akışkan olarak su kullanılan deneylerde belirlenen kalp destek pompası $\Delta P=f(Q)$ performansının HAD simülasyonu ile elde edilenlerle karşılaştırılması Şekil-5.'de verilmiştir. Burada denenen mini santrifüj pompanın hem sayısal hem de deneysel debiye göre basıncının değişimi, düşük özgül hızlı büyük ölçekli rotodinamik (çarklı) pompalarinkine benzer bir davranış göstermektedir. Su için yapılan deneylerin sonuçlarının, HAD yazılımıyla elde edilen sonuçlarla çok büyük benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir. 5 L/dak değerindeki tasarım debisinden uzaklaştıkça, simülasyon ve deneysel sonuçları arasında biraz farklılık olduğu görülmektedir. Santrifüj kalp destek pompalarının performans analizleri üzerine yapılan bir çalışmada; akışkan olarak su kullanılmış, 800 dev/dak dönme sayısında analiz ve deneysel çalışma sonuçları arasında çok iyi bir uyum ve 2000 dev/dak dönme sayısı kullanılan testlerde yaklaşık %9.75 sapma gözlenmiştir (Masuzawa ve diğ., 2009) .

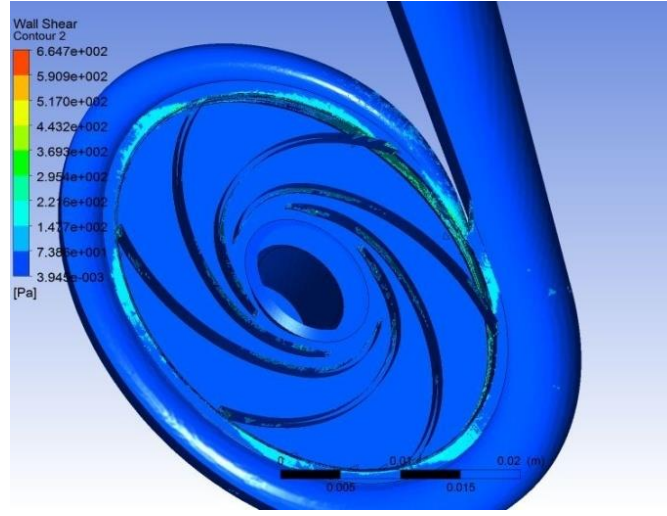


Şekil 5. Deneysel sonuçların HAD sonuçlarıyla karşılaştırılması

Figure 5. Comparison of experimental and CFD results

Tasarım debisinde hedeflenen tasarım toplam basınç farkı olan 100 mm-Hg değerine dönme sayısı yaklaşık %12 arttırılarak 3350 dev/dak dönme sayısında ulaşılmıştır.

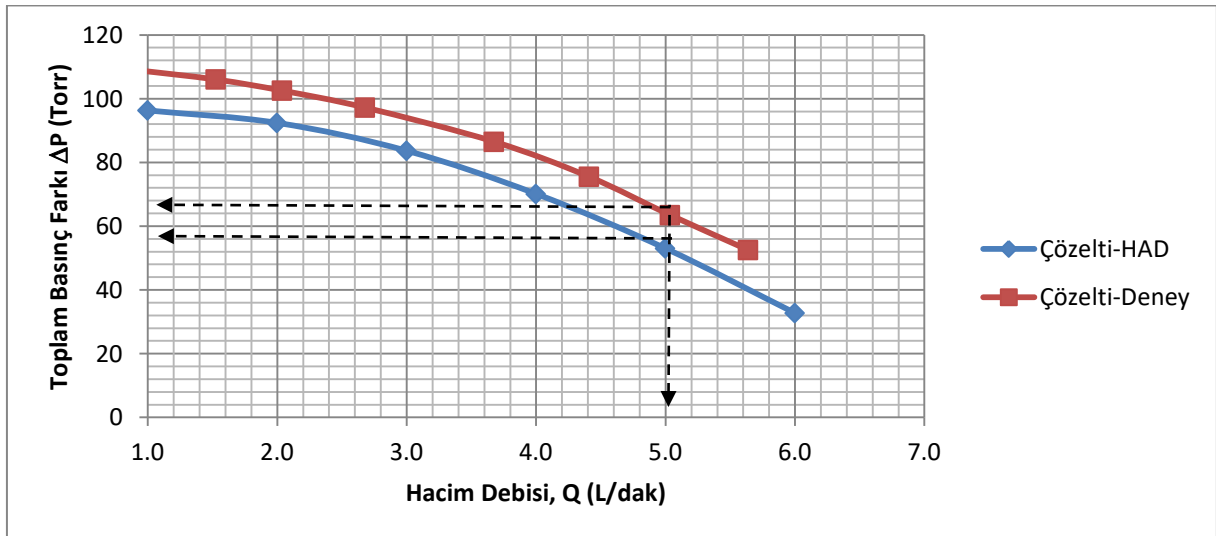
HAD simülasyonu testleriyle belirlenen, pompa içinde meydana gelen kayma gerilmesinin önemli olduğu bölgeler Şekil-6.'da açık tonlu renklerle gösterilmiştir. Pompa içinde kayma gerilmelerinin en yüksek olacağı bölgelerin, biri sabit diğeri hareketli duvarla çevrelenen en dar yerlerde olacağı öngörüldü ve bu bölgeler incelendi. Akışkan olarak suyu kullanıldığı durumda pompa içerisinde oluşan kayma gerilmelerine bakıldığı zaman, en yüksek kayma gerilmesinin olduğu bölgenin salyangoz dilinin çark tarafı olduğu görülmektedir. Bu bölgede görülen kayma gerilmesinin değeri 664.7Pa'dır. Çark diski ve salyangoz gövdesi arasında kalan 0.25' mm'lik dar alanda da kayma gerilmesinde yükselme gözlemlendi ancak bu yükselme 460 Pa seviyesinde kaldı.



Şekil 6. Su için HAD simülasyonu ile bulunan kayma gerilmeleri

Figure 6. Shear stresses determined by CFD for water

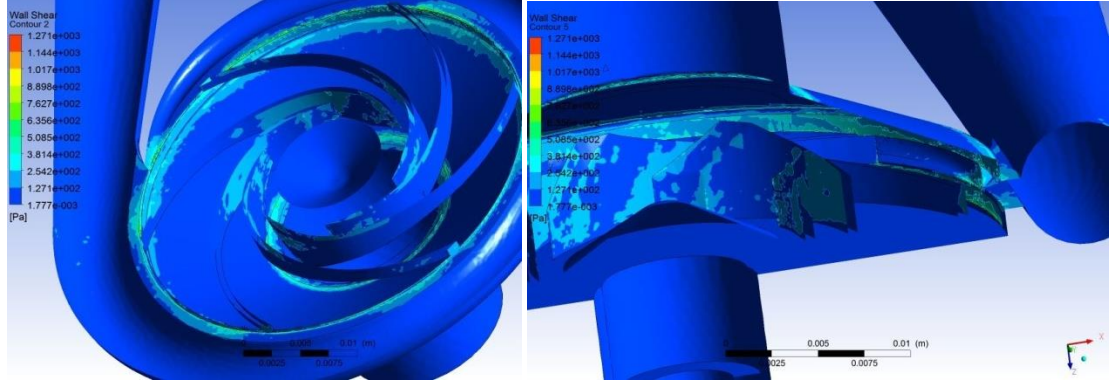
Su-gliserin çözeltisi kullanılan deneylerin $\Delta P=f(Q)$ sonuçlarıyla HAD simülasyonu ile elde edilen sonuçların karşılaştırılması Şekil-7.'de verilmiştir. Su-gliserin çözeltisi kullanılan deneylerin sonuçlarını HAD simülasyonu ile elde edilenlerle karşılaştırıldığında sonuçların tasarım noktasında %15 kadar farklılık gösterdiği tespit edildi. Kan akışının modellenmesinde kanın, 1050 kg/m^3 yoğunluk ve 0.0035 kg/ms viskoziteli newtonyen akışkan olduğu kabulünün yapıldığı bir çalışmada; k- ω SST türbülans modeli kullanılarak santrifüj kalp destek pompası performansı belirlenmiştir. Deneylerle sayısal analizler arasındaki basınç sapması; bir pompa tipinde 320 mm-Hg pompa basıncında ortalama 15 mm-Hg ve basıncı 55 ile 175 mm-Hg arasında değişen diğer tip pompa da ise ortalama 19 mm-Hg bulunmuştur (Fraser ve diğ., 2012). Dört farklı karışık akışlı çark modelinin farkı incelenen bir çalışmada kan için newtonyen akışkan olduğu kabulü yapılmış, 1059 kg/m^3 yoğunluk ve 0.0036 Pa.s viskozite kabul edilmiştir. Aynı çalışmada bir pompa modeli için ana çalışma noktasında; deneysel ve sayısal pompa basınçları arasında çok iyi bir uyum yakalanırken, diğer bir modelde %14 civarı bir sapma görülmüştür (Arvand ve diğ., 2004). Bir başka santrifüj kan pompası incelemesinde ise 1056 kg/m^3 yoğunluk ve 0.0035 Pa.s viskozite olacak şekilde akışkan özellikleri tanımlanmış sayısal analizlerin sonuçlarıyla boyutsuzlaştırılmış deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyum görülmektedir (Ogami ve diğ., 2010).



Şekil 7. Deneysel sonuçlarının HAD simülasyonu sonuçlarıyla karşılaştırılması

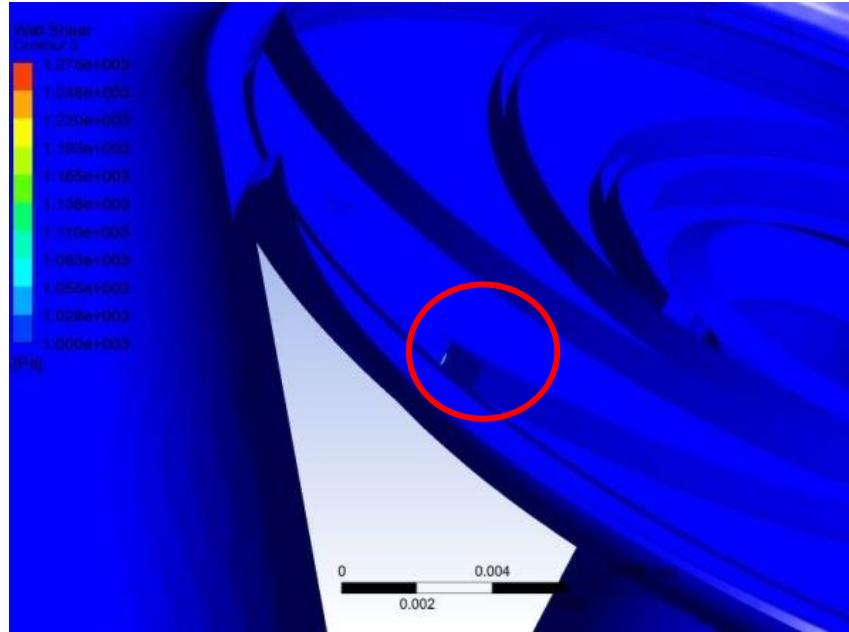
Figure 7. Comparison of experimental and CFD results

Su-gliserin çözeltisinin HAD simülasyonu ile yapılan analizlerde belirlenen kayma gerilmeleri Şekil-8a-b-c'de gösterilmiştir. Su-gliserin çözeltisini için tespit edilen en yüksek kayma gerilmesi 1271 Pa olup, bu değer görüldüğü bölgenin çark kanadının çıkış ucunun arka kısmı olduğu anlaşıldı (Şekil-8.b).



Şekil 8.a Su-gliserin çözeltisi için HAD simülasyonu ile bulunan kayma gerilmeleri

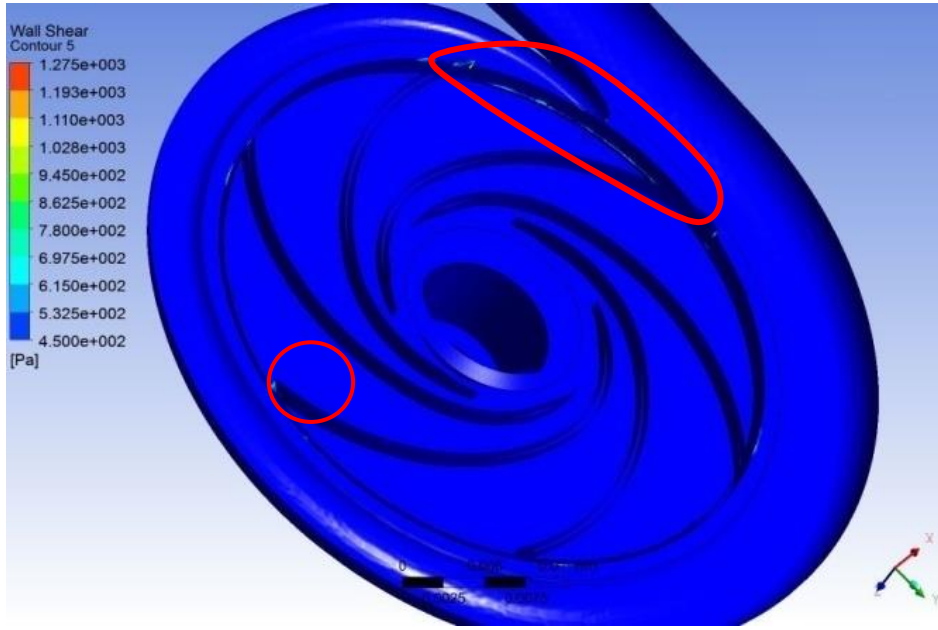
Figure 8.a Shear stresses determined by CFD for water-glycerin solution



Şekil 8.b Su-gliserin çözeltisini için tespit edilen en yüksek kayma gerilmesi

Figure 8.b Highest shear stress for water-glycerin solution

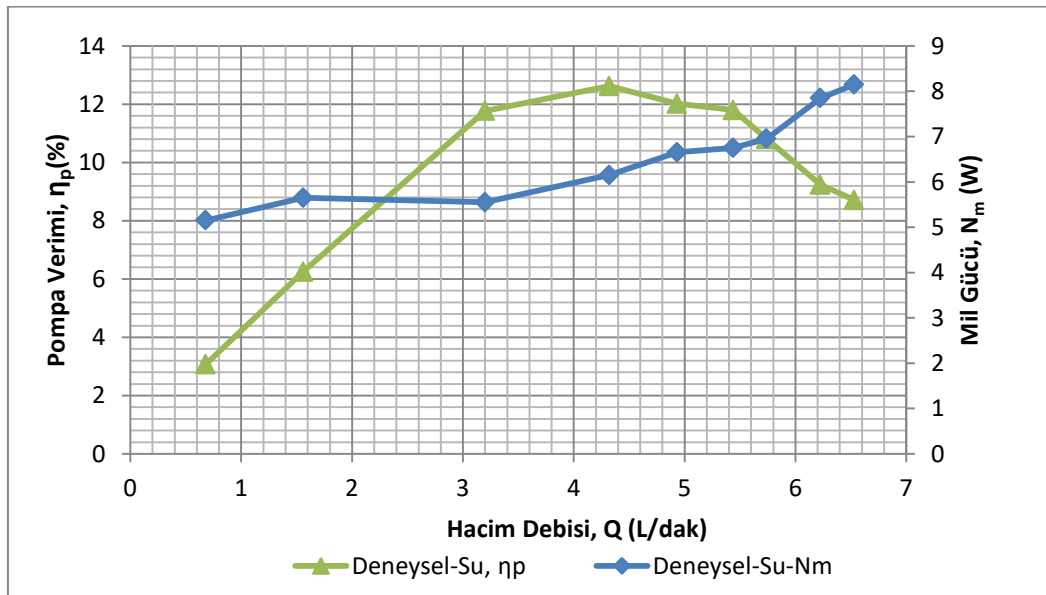
Yine salyangoz dilinin çark tarafında, çark diski ve örtüsü ile salyangoz arasındaki 0.25 mm'lik dar kanalda ve salyangoz giriş dudakları arasındaki dar kanalda kayma gerilmelerinde artış olduğu gözlemlendi. Kayma gerilmesinin, tüm katı yüzey alanına göre çok küçük bir yüzey alanında 450 Pa'ın üzerine çıktığı gözlemlendi. Bu alanlar Şekil-8.c'de açık tonla gösterilmiştir.



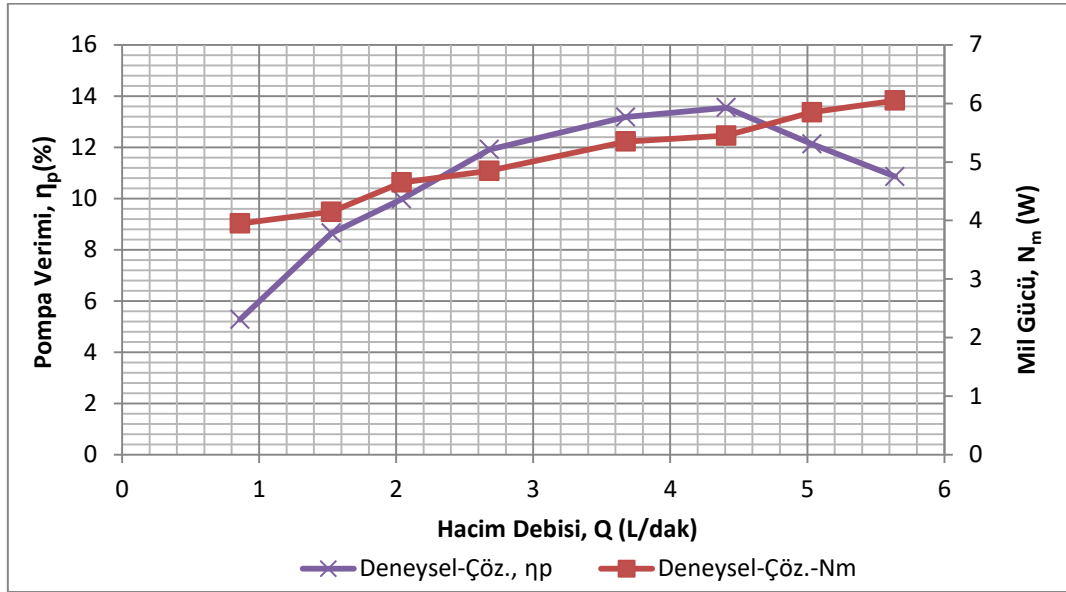
Şekil 8.c Kayma gerilmesinin 450 Pa üzeri olduğu bölgeler
Figure 8.c Region where shear stresses are over 450 Pa

Bu çalışmanın sonuçlarına benzer sonuçlar elde edildiği söylenebilecek bir çalışmada, HAD simülasyonu sonuçlarına göre salyangoz dili bölgesinde 719 Pa kayma gerilmeleri bulunmuştur. Salyangoz içinde tespit edilen en yüksek kayma gerilmeleri 1158 ve 903 Pa olarak dar bölgelerde gerçekleşmiştir (Masuzawa ve diğ., 1999).

Deney sonuçlarına göre elde edilen, pompa debisine bağlı olarak verim $\eta_p=f(Q)$ ve mil gücü eğrileri $N_m=f(Q)$ sırayla Şekil-9.a ve b'de gösterilmiştir. Su ve su-gliserin çözeltisi ile yapılan deneylerin sonucunda; bu prototip pompada maksimum verimlerin yaklaşık %13 ve 5 L/dak debideki verimlerin yaklaşık %12 değerleriyle hemen hemen aynı değerlerde olduğu görüldü. İncelenen debi aralığında pompa mil gücünün 4 ila 8 W arasında değiştiği belirlendi.

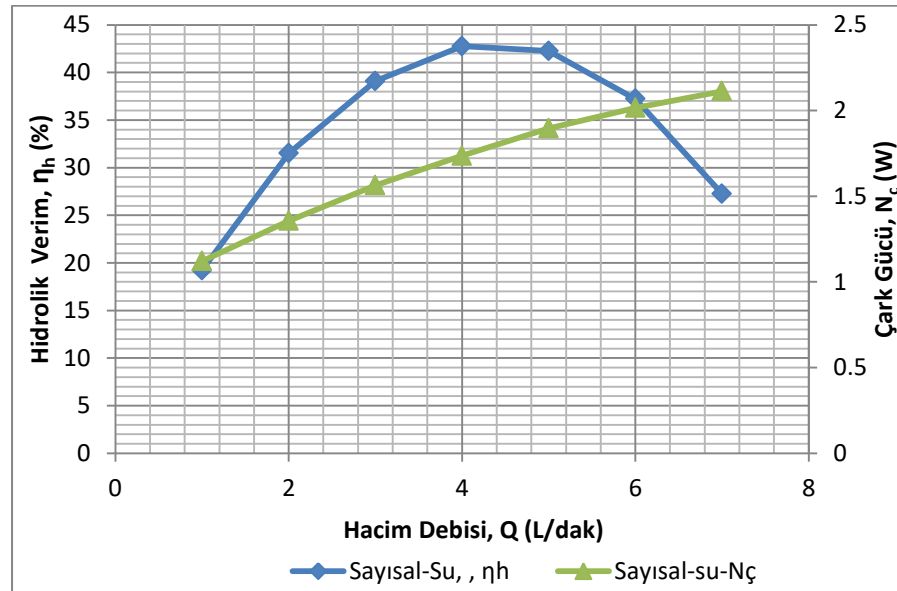


Şekil 9.a Su için deneysel güç ve verim grafiği
Figure 9.a Experimental power and efficiency graphs for water

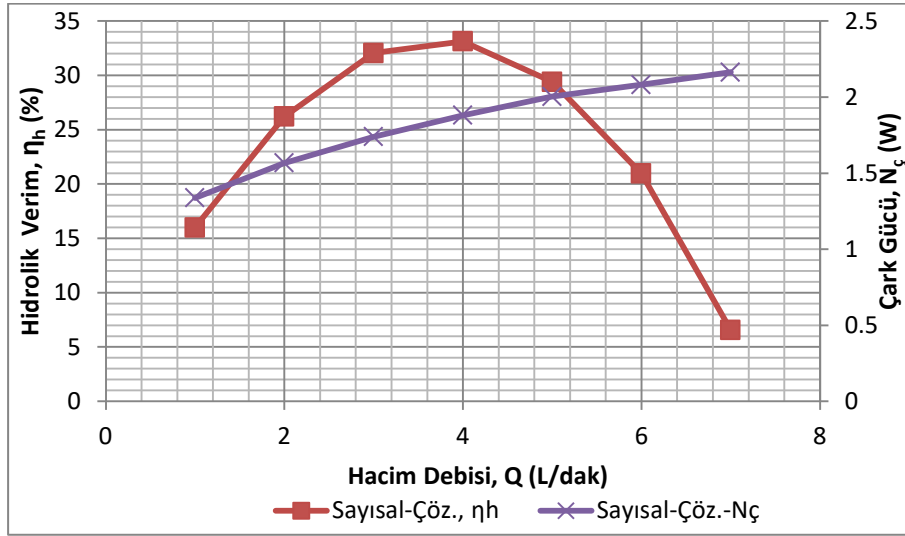


Şekil 9.b Su-gliserin çözeltisi için deneysel güç ve verim grafiği
 Figure 9.b Experimental power and efficiency graphs for water-glycerin solution

HAD simülasyonu ile belirlenen debiye bağlı olarak çizilen güç $N_c=f(Q)$ ve verim $\eta_h=f(Q)$ grafikleri Şekil 10.a ve b'de gösterilmiştir. Çark gücünün her iki akışkanda da aynı değerde olduğu görüldü. Grafiklerine baktığımız zaman su için sayısal yöntemle belirlenmiş maksimum verim yaklaşık %43 iken su-gliserin çözeltisinde, sayısal yöntemle belirlenmiş maksimum verimin yaklaşık %33 olduğu görülmektedir. Bu verimlerdeki farklılığın %10 civarında olduğu görülmüştür. Güç değerlerindeki benzeşmeye rağmen verim değerlerindeki farklılığın toplam basınç farkındaki farklılıkla açıklanabilir.



Şekil 10.a Su için sayısal çark gücü ve hidrolik verim grafiği
 Figure 10.a Numerical impeller power and hydraulic efficiency graphs for water



Şekil 10.b Su-gliserin çözeltisi için sayısal hidrolik verim ve çark gücü grafiği
 Figure 10.b Numerical hydraulic efficiency and impeller power graphs for water-glycerin solution

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, kalp destek pompaları üzerine yapılan bazı çalışmalarla karşılaştırıldığında sonuçların benzer olduğu görüldü.

Kalp destek pompalarının performansına kanat yükseklik profili etkisinin incelendiği bir çalışmada; akışkan olarak su kullanılarak HAD simülasyonunda 3000 dev/dak dönme sayısı ve 5 L/dak su debisinde, 46 mm çapında bir çarkla yaklaşık 130 mm-Hg toplam basınç farkı elde edilmiştir (Demir ve diğ., 2011). Bizim çalışmamızda ise aynı dönme sayısı ve debide 34 mm çapında bir çarkla 72 mm-Hg toplam basınç farkı elde edildi.

Bu alandaki bir başka bir deneysel çalışmada, %40 oranında gliserin-su çözeltisi kullanılarak yaklaşık 50 mm disk çapına sahip kanat profilleri farklı olan 4 adet çark incelenmiş, 2000 dev/dak dönme sayısı ve 5 L/dak debide 85-110 mm-Hg aralığında sonuçlar elde edilmiştir (Yu ve diğ., 2000). Aynı çalışmada kayma gerilmeleri incelendiğinde kanat çıkış ucu bölgesinde maksimum 273 Pa değerinde kayma gerilmesi gözlemlendiği ifade edilmiştir (Yu ve diğ., 2000).

ARAŞTIRMA SONUÇLARI (RESEARCH RESULTS)

Üzerinde çalıştığımız pompa büyük ölçekli santrifüj pompaların tasarımında kullanılan Stepanoff metoduyla tasarlanmış olup tasarım aşamasında kullanılan ampirik katsayıların genel amaçlı pompalar için hazırlanmış olduğu düşünülürse tasarım parametreleriyle elde edilecek deney sonuçları arasında farklılık olması bekleniyordu. Bu farkın imalat öncesi görülüp prototip pompa tasarımda düzeltmeler yapılması açısından HAD yazılımlarının zaman ve maliyet faktörleri dikkate alındığında faydası açıkça ortaya çıkmaktadır.

Su için yapılan deneylerin sonuçlarıyla HAD simülasyonu ile elde edilen sonuçlar arasında iyi bir uyum gözlemlendi. Gliserin-su çözeltisi ile yapılan analizlerde ise tasarım noktasında %15 kadar deney sonuçlarından sapma görüldü. Bu çalışmada su için ulaşılan uyum ve literatürdeki diğer çalışmalarda ulaşılan sonuçlar neticesinde, tasarım aşamasında karşılaşılabilecek sorunların giderilmesi ve daha iyi performansa sahip kalp destek pompaları geliştirilmesi için HAD simülasyonlarının kullanılabilirliği söylenebilir.

HAD sonuçlarına baktığımız zaman pompa içinde kayma gerilmeleri, sabit ve hareketli duvarlar arasındaki dar kanallarda ve akışın ani yön değişimi gösterdiği bölgelerde artmaktadır. Yüksek kayma gerilmelerinden kaçınmak için bu tip bölgelere yoğunlaşılması gerektiği görüldü. Günümüzdeki çalışmalar, ağırlıklı olarak bu bölgelerde geometri düzeltmeleriyle kayma gerilmesi değerlerinin istenen limitlerin altına çekilmesi üzerinedir.

Bu çalışma, yazarların prototip kalp destek pompasıyla ilgili ilk çalışmasıdır. Pompa içindeki kayma gerilmelerinin istenen seviyenin altına indirilmesi, HAD modellemelerinin hatalarının azaltılması, pompa performansının ve fonksiyonelliğinin artırılması üzerine çalışmalar sürdürülmektedir.

TEŞEKKÜRLER(ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Selçuk Üniversitesi ÖYP Koordinatörlüğü tarafından 2015-ÖYP-092 nolu proje çerçevesinde desteklenmiştir.

SEMBOLLER(NOTATION)

N_a: Güç (Akışkan)
 N_m: Güç (Mil)
 N_ç: Güç (Çark)
 N_{mot,y}: Yükteki motor gücü
 N_{mot,b}: Boştaki motor gücü
 n: Devir (dev/dak)
 η: Verim
 P: Basınç (Torr)
 ΔP: Toplam basınç farkı (Torr)
 Re: Reynolds sayısı
 T: Tork (Nm)
 TI: Türbülans şiddeti
 Q: Debi (L/dak)
 ω: Açısal hız

İNDİSLER(INDICES)

a: Akışkan
 b: Boşta
 ç: Çıkış
 g: Giriş
 h: Hidrolik
 m: Mil
 p: Pompa
 y: Yükte
 t: Toplam

KAYNAKLAR(RESOURCES)

- Arvand, A., Hahn, N., Hormes, M., Akdis, M., Martin, M., Reul, H., 2004 "Comparison of Hydraulic and Hemolytic Properties of Different Impeller Designs of an Implantable Rotary Blood Pump by Computational Fluid Dynamics", *Artificial Organs*, Sayı:28(10), s. 892–898, Blackwell Publishing, Inc.
- Behbahani, M., Behr, M., Hormes, M., Steinseifer, U., Arora, D., Coronado, O., Pasquali, M., 2009, "A Review of Computational Fluid Dynamics Analysis of Blood Pumps", *European Journal of Applied Mathematics*, Sayı:20,s.363–397
- Demir, O., Biyikli E., Lazoglu, I., Kucukaksu, S., 2011, "Design of a Centrifugal Blood Pump: Heart Turcica Centrifugal", *Artificial Organs*, Sayı:35, No. 7, s.720-725

- Fan, H. M., Hong, F. W., Zhou, L. D., Chen, Y. S., Ye, L., Liu, Z. M., 2009 "Design of Implantable Axial-Flow Blood Pump and Numerical Studies on Its Performance", *Journal of Hydrodynamics*, Sayı:21(4), s.445-452
- Fraser, K. H., Zhang, T., Taskin, M. E., Griffith, B. P., Wu, Z. J., 2012, "A Quantitative Comparison of Mechanical Blood Damage Parameters in Rotary Ventricular Assist Devices: Shear Stress, Exposure Time and Hemolysis Index", *Journal of Biomechanical Engineering*, Vol. 134 / 081002-1
- Reul H. M., Akdis M., 2000, "Blood Pumps for Circulatory Support", *Perfusion*, Sayı: 15, s. 295-311
- Lua P.C., Laia H.C., Liub J.S., 2001, "A Reevaluation and Discussion on The Threshold Limit for Hemolysis in A Turbulent Shear Flow", *Journal of Biomechanics*, Sayı:34, s. 1361-1364.
- Masuzawa, T., Tsukiya, T., Endo, S., Tatsumi, E., Taenaka, Y., Takano, H., Yamane, T., Nishida, M., Asztalos, B., Miyazoe, Y., Ito, K., Sawairi, T., Konishi Y., 1999, "Development of Design Methods For a Centrifugal Blood Pump with a Dynamic Approach: Results in Hemolysis Tests", *Artificial Organs*, Sayı:23(8), s.757-761 Blackwell Science, Inc.
- Masuzawa, T., Ohta, A., Tanaka, N., Qian, Y., Tsukiya, T., 2009, "Estimation of Changes in Dynamic Hydraulic Force in a Magnetically Suspended Centrifugal Blood Pump with Transient Computational Fluid Dynamics Analysis" *The Japanese Society for Artificial Organs*, Sayı: 12, s. 150-159
- Mizunuma, H., Nakajima, R., 2007, "Experimental Study on Shear Stress Distributions in a Centrifugal Blood Pump", *Artificial Organs*, Sayı: 31(7), s. 550-559, Blackwell Publishing, Inc.
- Mozafari S., Rezaenia M. A., Paul G. M., Rothman M. T., Wen P., Korakianitis T., 2017, "The Effect of Geometry on the Efficiency and Hemolysis of Centrifugal Implantable Blood Pumps", *ASAIO Journal*, 63, 53-59
- Nishida, M., Maruyama, O., Kosaka, R., Yamane, T., Kogure, H., Kawamura, H., Yamamoto, Y., Kuwana, K., Sankai, Y., Tsutsui, T., 2009, "Hemocompatibility Evaluation With Experimental and Computational Fluid Dynamic Analyses for a Monopivot Circulatory Assist Pump", *Artificial Organs*, Sayı: 33(4), s. 378-386, Wiley Periodicals, Inc.
- Ogami, Y., Matsuoka, D., Horie, M., 2010, "Computational Study of Magnetically Suspended Centrifugal Blood Pump (The First Report: Main Flow and Gap Flow)", *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, Sayı:3, No. 2. s.102-112.
- Stepanoff, A.J., 1957, *Centrifugal and Axial Flow Pumps: Theory, Design and Application*, 2nd Ed. John Wiley&Sons Inc., New York, USA
- Song, G., Chua, L. P., Lim, T. M., 2010, "Numerical Study of a Centrifugal Blood Pump With Different Impeller Profiles", *ASAIO Journal*, Sayı: 56, s.24-29.
- T.C. Sağlık Bakanlığı, Halk Sağlığı Kurumu, Türkiye Kalp ve Damar Hastalıkları Önleme ve Kontrol Programı, 988, Ankara, 2015
- Untarou, A., Wood, H. G., Allaire, P. E., Throckmorton, A. L., Day, S., Patel, S. M., Ellman, P., Tribble, C., Olsen, D. B., 2005, "Computational Design and Experimental Testing of a Novel Axial Flow LVAD", *ASAIO Journal*, Sayı: 51, s.702-710.
- Yen, J. H., Chen, S. F., Chern M. K., Lu P. C., 2014, "The Effect of Turbulent Viscous Shear Stress on Red Blood Cell Hemolysis", *The Japanese Society for Artificial Organs*, Sayı: 17, s.178-185.
- Yu, S.C.M., Ng, B.T.H., Chan, W.K., Chua, L.P., 2000, "The Flow Patterns within The Impeller Passages of a Centrifugal Blood Pump Model", *Medical Engineering & Physics*, Sayı: 22, s.381-393

BİYOKÖMÜR: ÜRETİMİ ve KULLANIM ALANLARI

¹Gökçen AKGÜL

¹Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü 53100
Fener, RİZE

gokcen.akgul@erdogan.edu.tr

(Geliş/Received: 21.03.2017; Kabul/Accepted in Revised Form: 13.05.2017)

ÖZ: Artan dünya nüfusu, azalan enerji kaynakları ve fosil enerji kaynaklarının kullanımı sonucu ortaya çıkan küresel ısınma gibi dünyanın karşılaştığı enerji problemlerine alternatif enerji kaynakları ile çözümler sunulmaya çalışılmaktadır. Biyokütle enerji kaynağı bu çözümlerden bir tanesidir. Klasik yöntemlerden farklı olarak biyokütlenin günümüz teknolojisine uygun bir enerji veya madde formlarına dönüştürülmesi gerekmektedir. Piroliz yöntemi, biyokütlenin teknolojiye uygun katı, sıvı ve gaz ürünlere dönüştürülmesini sağlar. Bu çalışmada piroliz teknolojisi ile üretilen katı ürün olan BİYOKÖMÜR'ün (biochar) özellikleri ve kullanım alanları konusu ele alınmıştır. Biyokömürün toprak ıslahında kullanımından enerji depolama ve pillerde anodik materyal olarak kullanımı, yapılarda elektromanyetik emisyon tutulumuna kadar değişen çok farklı uygulama alanları bulunmaktadır. Biyokömür, fonksiyonel gruplarca zengin karbonize materyal olarak çok farklı uygulama alanları bulabilecek bir potansiyeline sahiptir.

Anahtar Kelimeler: Biyokömür, Biyokütle, Piroliz, Uygulama

Biochar: Production and Applications

ABSTRACT: The world faces such problems that increasing world population, diminishing energy sources, increasing energy demand and the global warming which is the result of the use of fossil energy resources. Alternative energy sources could provide solutions to these problems. Biomass energy source is one of these solutions. Unlike the classical methods, biomass must be converted into energy-substance forms suitable for today's technology. The pyrolysis method allows biomass to be converted into solid, liquid and gaseous products that are appropriate technologically to use. In this study, the features and usage areas of biochar which is the solid product of pyrolysis technology are discussed. Green coal has a wide range of applications ranging from use in soil treatment, energy storage and use as anodic materials in batteries, and to electromagnetic emission capture in constructions. Green coal has a potential to find a wide range of applications as a carbonaceous material rich in functional groups.

Key Words: Applications, Biomass, Biochar, Pyrolysis

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dünya nüfusunun artışına paralel olarak insanoğlunun enerji gereksinimi giderek artmaktadır. Endüstrileşmenin başlangıcından beri dünyanın enerji ihtiyacı için ana olarak petrol, kömür ve doğal gaz gibi fosil kaynaklar kullanılmıştır. Ancak yakın gelecekte bu kaynakların dünyanın enerji gereksinimini sağlayamayacak düzeye geleceği ve tükeneceği öngörülmektedir (Abas ve diğ., 2015; Rintamäki ve diğ., 2016; Schiffer, 2008).

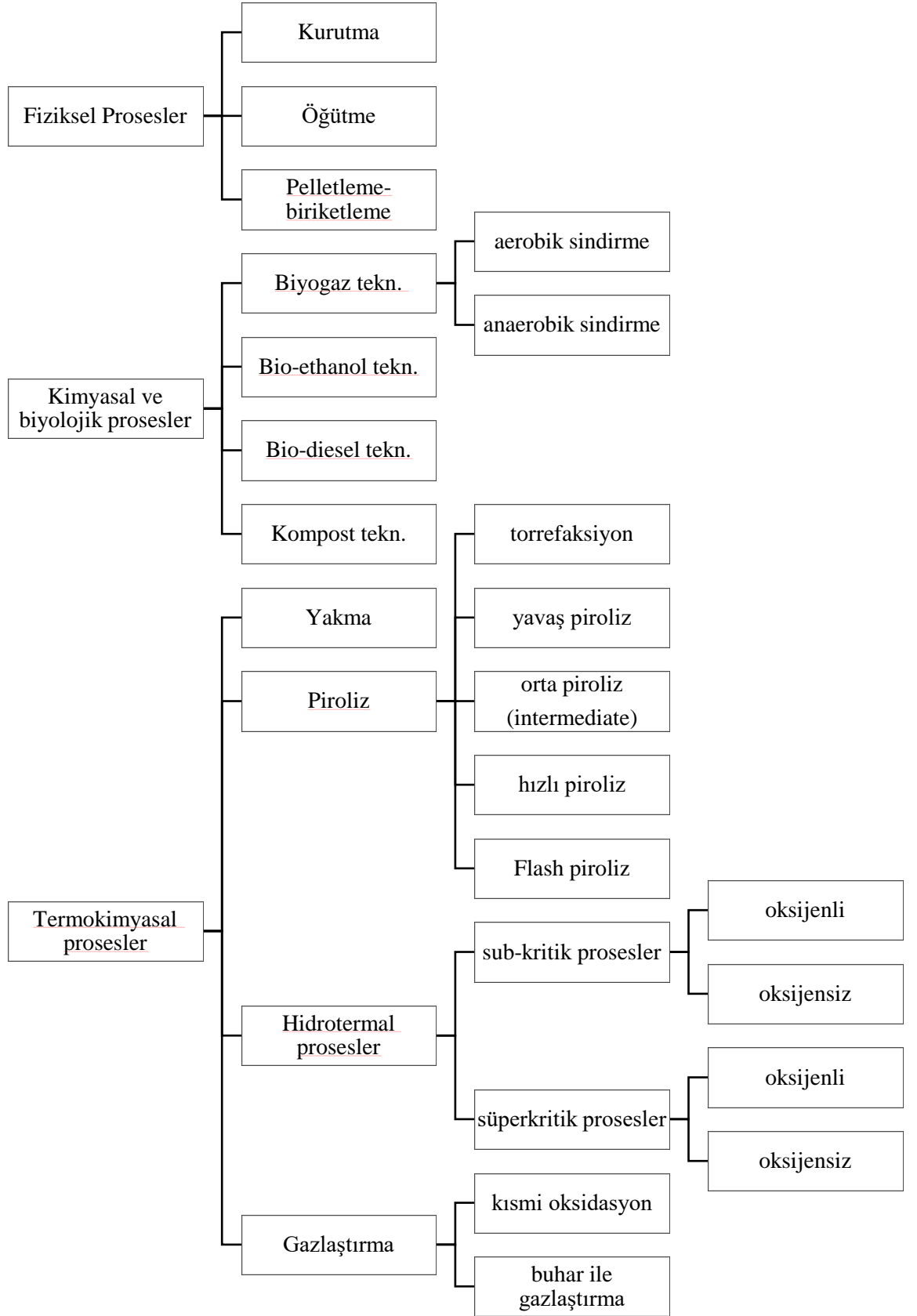
Diğer yandan enerji üretimi için fosil kaynakların kullanılması sonucunda dünya atmosferindeki karbondioksit miktarı artmıştır. Karbondioksit, dünya atmosferinde sera etkisi oluşturmakta, dünya ikliminde bir değişim ve ısınmanın ortaya çıkmasına sebep olmaktadır (Jones ve Warner, 2016).

İnsanoğlunun artan enerji ihtiyacının karşılanması gerekmektedir ancak bu yapılırken atmosfere sera gazlarının salınmaması, bu gazların olumsuz etkilerinin oluşturulmaması veya azaltılması artık bir zorunluluk haline gelmiştir. Bu da ancak çevreyi kirletmeyen, sürdürülebilir, yenilenebilir ve alternatif enerji kaynaklarının kullanılması ile mümkün olacaktır.

Yenilenebilir enerji kaynakları (YEK); güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, biyokütle enerjisi, dalga enerjisi gibi enerji kaynaklarıdır. Bu kaynaklar, tüketilme hızından daha çabuk kendini yenileyebilen kaynaklardır ve oluşumları, petrol ve kömürün oluşumu gibi milyonlarca yıl sürmez. Bir saatten birkaç yıla kadar değişen kısa sürelerde tekrar yenilenebilirler. YEK, sürdürülebilir, çevreyi kirletmeyen, fosil yakıtlar gibi belli bölgelerde lokalize olmadan dünyanın her tarafında bulunabilen kaynaklar olduğu için temiz enerji üretimi ve ulusların enerji konusunda dışa bağımlılığını azaltma konularında önemlidir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan "Biyokütle", rüzgâr, güneş gibi diğer yenilenebilir enerji kaynaklarından farklı olarak yenilenebilir tek karbon kaynağıdır. Biyokütle, çok geniş anlamda, yaşayan organizmalardan türeyen tüm maddeleri kapsar. Küçük çaptaki alglerden devasa ağaçlara kadar değişen geniş bir spektrumu vardır. Organik kökenli kentsel ve endüstriyel atıklar da biyokütledir. Biyokütle yenilenebilir ve sürdürülebilir bir enerji kaynağıdır.

Biyokütlenin enerji üretiminde kullanımı yeni bir ifade değildir. Tarih boyunca odun, ısınmada ve yemek pişirmede kullanılmıştır. Biyokütlenin, bugünün ve geleceğin teknolojisine uygun enerji kaynağı olarak kullanılabilmesi için bazı tekniklerle işlenerek petrol ürünleri gibi enerji yoğunluğunun artırılması ve uygun yakıt formuna çevrilmesi gerekir. Bunun için kullanılan bazı yöntemler Şekil 1'de verilmiştir. Görüldüğü gibi biyokütleden enerji kaynağı olarak yararlanabilmek için uygulanan çok çeşitli yöntemler mevcuttur. Elde edilen ürünler, biyokütle başlangıç maddesi ve uygulanan proseslere göre çeşitlilik göstermektedir. Kuru odunsu biyokütlenin enerji yoğunluğu fiziksel yöntemlerle pellet veya biriket halinde artırılabilirken (Cao ve diğ., 2015) su içeriği yüksek hayvansal atıklar, ana içeriği metan gazı olan biyogaza dönüştürülebilir (Jang ve diğ., 2016). Yine şeker içeriği yüksek biyokütleden fermantasyon veya ısı işlemleriyle biyoetanol üretilirken (Sindhu ve diğ., 2016), yağ içeriği yüksek biyokütle, trigliseritlerin transesterifikasyonu ile biyodizele çevrilebilir (Kiran ve diğ., 2016). Piroliz yöntemi ile elde edilen aromatik içeriği yüksek ve petrol naftası gibi işlenebilir biyo-yag, biyokütleden türetilmiş enerji kaynağıdır (Alvarez ve diğ., 2016). Hidrotermal yöntemlerle ise yandığı zaman sadece su oluşturan temiz enerji kaynağı hidrojen üretilir (Azadi ve diğ., 2012). Bu makalede yavaş ve orta hızda yapılan piroliz yöntemi ile elde edilen katı ürün BİYOKÖMÜR ürünün özellikleri ve uygulama alanları konusunda bilgiler verilecektir.



Şekil 1. Biyokütle Teknolojileri

Figure 1. Biomass Technologies

PİROLİZ (PYROLYSIS)

Termokimyasal proseslerden bir tanesi olan piroliz, aslında bitkilerin dünyada varoluşu kadar eskidir. Bitkiler havasız sıcak ortamlara maruz kaldığında piroliz meydana gelir. Petrol, kömür, doğalgaz, odunkömürü gibi enerji kaynaklarının oluşumu aslında bir tür pirolizdir.

İnsanlık, pirolizin proses olarak önemini 1800'lü yıllardan sonra anlamış ve farkına varmıştır. Bu da sanayileşme devriminin başladığı, enerji ihtiyacının çokça arttığı döneme denk gelmektedir. Endüstriyel ölçekte piroliz ve gazlaştırma, ilk defa kömür ile başlamıştır. Kömürün pirolizi ve gazlaştırılması ile elde edilen ürünler yoğunluğu fazla ve etkin enerji kaynağı olarak evlerin, sokakların aydınlatılmasında kullanılmıştır. Daha sonra petrolün çıkarılması ve yaygın olarak kullanılması ile bu proses bir köşeye bırakılmış, dünyada petrol sıkıntısının baş göstermesi ile alternatif karbon kaynakların özellikle biyokütlenin pirolizi yeniden önem kazanmaya başlamıştır.

Piroliz işlemi sırasında pirolize maruz kalan biyokütlenin kimyasal bağları oksijensiz ortamda ve yüksek sıcaklıkta termal olarak bozunur. Büyük hidrokarbon molekülleri daha basit moleküllere parçalanır veya düzenlenir. Genel olarak sıcaklık 500 °C, basınç da atmosfer basıncıdır. Piroliz ile katı, sıvı ve gaz ürünler elde edilir. Ürünlerin cinsi ve miktarı, biyokütlenin çeşidi, ısıtma hızı ve son sıcaklık gibi faktörlere bağlıdır. Piroliz; proses sırasında uygulanan zaman ve sıcaklık parametrelerine göre yavaş, ılımlı, orta, hızlı ve flash olmak üzere beş temel gruba ayrılır (Çizelge 1).

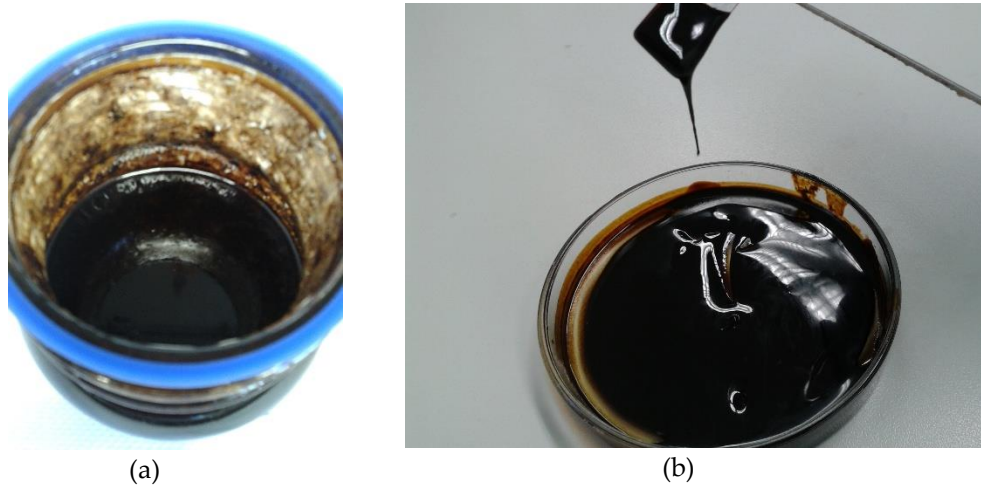
Çizelge I. Piroliz çeşitleri (Kambo ve Dutta 2015)

Table 1. Types of pyrolysis

Piroliz türü	Zaman	Isıtma hızı	Sıcaklık / °C	Sıvı Ürün %	Katı ürün %	Gaz ürün %
Yavaş piroliz "Torrefaction" (ılımlı piroliz)	Saat-gün	Çok düşük	200-600	30	35	35
	20-60 dk	Düşük	230-300	50	25	25
Orta piroliz	5-30 dk	Orta	500	40	30	30
Hızlı piroliz	<2 s	Yüksek	500-950	75	12	13
Flash piroliz	ms	Çok yüksek	1050-1300	85	5	10

En tanınmış piroliz prosesi yavaş piroliz ile odun kömürü üretimidir, degazifikasyon olarak da bilinir ve katı ürün, hedef üründür. Genel olarak, istiflenmiş odun yığınlarının üzeri toprakla kapatılır ve sınırlı hava ortamında yakma ile odun parçalarının karbonlaşması sağlanır. Odun kömürü üretimi sırasında ortaya çıkan gazlar atmosfere verilir. Ancak yoğunlaştırılarak toplanacak olursa odundan daha düşük ortalama moleküler ağırlığa sahip organik kimyasallar ile suyun karışımından oluşan bir sıvı ürün elde edilir. Bir de yoğunlaşmayan gaz ürünler oluşur, CO₂, CH₄, CO, H₂, N₂ gibi gazları içerir (Norgate ve diğ., 2012). "Torrefaction" ise ılımlı yani düşük sıcak pirolizdir. Bu yöntemle biyokütle pirolizinden çeşitli organik asitler üretilebilir (Chen ve diğ., 2015). Bu proses genellikle biyokütle numunelerinden piroliz öncesi uçucuların uzaklaştırılması ve ön-hazırlık amacıyla yapılır. Orta hız pirolizde hemen hemen yaklaşık aynı oranlarda katı-sıvı ve gaz ürünler elde edilir (Yang ve diğ., 2014). Daha fazla sıvı ürünler eldesi için hızlı piroliz tercih edilen bir prostestir. Sıvı ürün, fenol ve furfural türevlerince zengindir (Zellagui ve diğ., 2016). Son olarak flash pirolizde, 1000 °C'nin üzerinde sıcaklıklarda ve milisaniye gibi sürelerde gelişen bir pirolizdir. Yeni gelişen bir teknolojidir. Isıtma hızı yüksek, reaksiyon zamanı saniyeler kadar kısa olunca kömür oluşumu engellenir (Kan ve diğ., 2016).

Piroliz ile üretilen sıvı, petrol naftasına benzer, koyu renkli ve kıvamlı bir kondensattır (Şekil 2a-b). Genellikle asitler, alkoller, aldehitler, ketonlar, esterler, furfuralar ve fenolik bileşikler gibi bileşiklerden oluşmaktadır. Bu ürün petrol naftası gibi işleme tabi tutularak kimyasal hammadde kaynağı olarak kullanılabilir, yakılarak enerjisinden yararlanılabilir veya ileri gazlaştırılarak hidrojen üretilebilir.



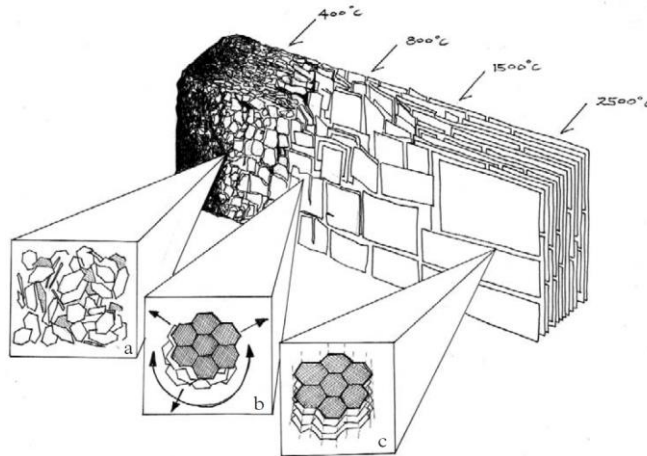
Şekil 2. Piroliz yağı (a, b)(Proje çalışmalarından alınmıştır)
Figure 2. Pyrolysis oil (a, b) (pictures are from individual research works)

Bu makalede piroliz yöntemi ile üretilen katı ürün olan biyokömürün özellikleri ve kullanım alanları üzerinde durulmuştur.

BİYOKÖMÜR (BIOCHAR)

Modern biyokömür endüstrisi kısmen yeni olsa da biyokömürün doğada oluşumu yüzyıllar boyunca kendiliğinden devam etmektedir. Bitkisel atıklar toprak altında kaldığında kendiliğinden oluşan ot yangınları ile çok uzun sürelerde karbonize olur ve biyokömür oluşur. Biyokömür (İngilizcesi "biochar"), saf karbon değildir, hidrojen ve oksijen gibi yan fonksiyonel grupları içeren organik kaynaşmış moleküllerin karışımıdır.

Amazon bölgesinde bulunan "Terra preta" (çernezyum) olarak bilinen verimli siyah toprakların biyokömürce zengin olduğu ve bu karbon içeriğinin toprakta binlerce yıl kaldığı bulunmuştur (Lehmann and Joseph, 2009). Sentetik olarak biyokömür, biyokütlenin termokimyasal piroliz yöntemi ile organik yapısının karbonlaştırılması ile üretilir. Bunun için biyokütle oksijensiz veya çok az oksijen içeren ortamda yavaş veya orta pirolize tabi tutulur. 200°C' den yüksek sıcaklıklarda (<700 °C) kimyasal bağlar bozunur, büyük hidrokarbon molekülleri daha basit moleküllere parçalanır veya düzenlenir (Şekil 3).



Şekil 3. Biyokömür yapısının sıcaklıkla değişimi (Lehmann and Joseph 2009)
Figure 3. Biochar structure development

En bilinen biyokömür üretimi odun kömürü üretimidir. Özellikle meşe ağaçlarından mangal kömürü üretimi oldukça yaygındır ve Türkiye’de daha çok klasik yöntemlerle üretilmektedir. Bunun için düzgün şekilde istiflenen odunlarla torluklar kurulur ve odunlar üzeri toprakla kaplanarak kısmi yakma ile karbonlaştırılır. Endüstriyel üretim için birçok farklı tipte reaktörler geliştirilmiştir (Meyer ve diğ., 2011; Tripathi ve diğ., 2016; Yang ve diğ., 2014; Agirre ve diğ., 2013). Üretim, sürekli veya kesikli bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Dünyada biyokömür çalışmaları yoğunlukla Amerika, Avrupa ve Çin’de yapılmaktadır (www.biochar-international.org). Bu firmalardan bazıları 3R Environmental Technology Group (İsveç) (<http://www.3ragrocarbon.com/>), Acclaim Technology Services India Private Limited (Hindistan) (<http://www.acclaimcleanenergy.com/>), Sonoma Biochar (Amerika) (<http://www.sonomacompost.com/biochar.shtml>) gibi firmalardır (<http://cost.european-biochar.org/en/ct/16-Biochar-Producers>). Şekil 4, dünyada biyokömür ile ilgili en çok çalışma yapılan ülkeleri göstermektedir

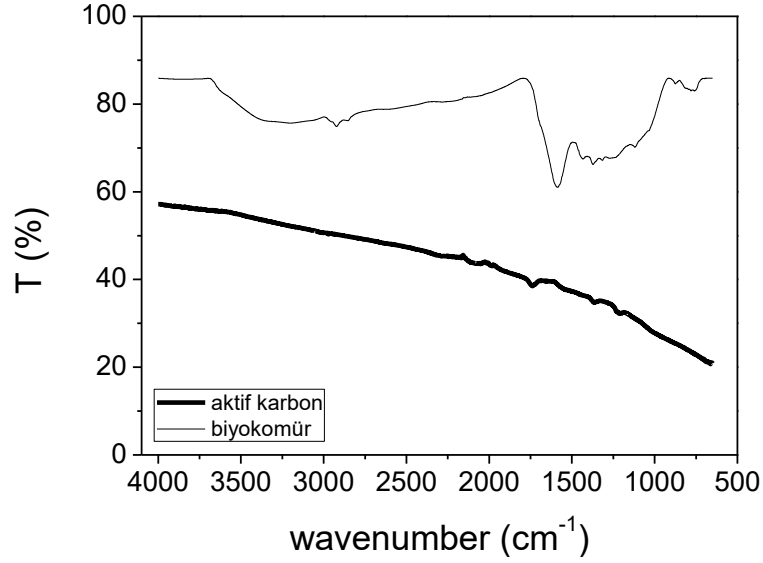


Şekil 4. Biyokömür çalışmalarının gerçekleştiği bölgeler (www.biochar-international.org)

Figure 4. Biochar research locations in the world

Biyokömür, gözenekli yapıdadırlar, yüzey alanı büyüktür ($\sim 500 \text{ m}^2/\text{g}$), su tutma ve katyon değişim kapasiteleri yüksektir. Bu tür özellikleri nedeni ile topraktaki katyonik faaliyetleri artırır ve böylece toprak; kalsiyum, magnezyum ve potasyum gibi besinleri tutar. Aromatik ve humik maddelerce zengindirler (Lorenz ve Lal 2014). Enerji yoğunlukları aynı miktardaki biyokütleyle göre daha yüksektir (Alhashimi ve Aktas 2017). Genel olarak biyokömür, toprak iyileştirilmesi, bitki gübresi olarak, toprakta karbon depolanması, agrokimyasalların bağlanarak toprak veriminin artırılması, iklim değişikliğinin azaltılması (CO_2 ve CH_4 salınımlarının azaltılması), atık yönetiminde çevre kirliliğine neden olan atıkların bertarafı ve materyal akım yönetim maliyetlerinin düşürülmesi ve enerji üretiminde kullanılması gibi motivasyonlara sahiptir (Lorenz ve Lal 2014). Diğer yandan biyokömürlerin topraktan ve atık sulardan organik ve inorganik kirlilikleri uzaklaştırma amacı ile kullanılması yönünde son yıllarda araştırmalar da önem kazanmıştır (Tan ve diğ., 2015; Zhang ve diğ., 2013). Tüm bu faktörler son yıllarda modern biyokömür endüstrisinin gelişiminde etkili olmuştur.

Biyokömür aktif karbondan farklı bir materyaldir. Aktif karbon üretiminde uygulanan sıcaklıklar, biyokömür üretiminde uygulanan sıcaklıklara göre daha yüksektir. Dolayısıyla aktif karbon üretiminde biyokütle, barındırdığı fonksiyonel gruplarını çoğunlukla kaybeder ve yüksek oranda karbonlaşır. Karbonlaşan yüzeyin aktivasyonunu sağlamak ve gözenekliliğini artırmak için ise ayrıca buhar veya kimyasallarla işleme tabi tutulur. Biyokömür üretiminde ise, tüm bunlara gerek kalmadan biyokütle daha düşük sıcaklıklarda karbonlaştırılarak yüzey fonksiyonel grupları yok edilmeden ve hatta etkinleştirilerek farklı uygulamalar için uygun bir madde haline dönüştürülür (Şekil 5).



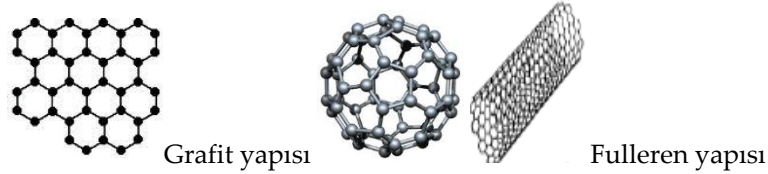
Şekil 5. Biyokömür (çay atığından 400 °C’de türetilmiştir) ve aktif kömürün (carbomix) FTIR spektrumları (RTEÜ-BAP. 2014.109.04.01 raporu)

Figure 5. FTIR analyses of biochar and activated carbon

Biyokömür yüksek oksijen içeriğine sahiptir. Dolayısıyla yüksek yüzey asit-baz fonksiyonel faaliyetleri yürütürler. Ayrıca topraktan fosfor ve azot gibi elementlerin bitkiler tarafından daha kolay alınabilmesini sağlayarak toprak için iyi birer besin maddesi olur (Glaser ve diğ., 2014).

Biyokömür jenerik bir terimdir ve karakteristikleri üretildikleri biyokütlenin cinsine ve piroliz koşullarına göre çok değişmektedir (Mcbeath ve diğ., 2015). Biyokütle genel olarak selüloz, hemiselüloz, lignin ve az miktarda uçuculardan oluşur ve bunların oranları biyokütleden biyokütlede değişim gösterdiği için çeşitli biyokütleden üretilen biyokömürler aynı karbon oranına sahip olsalar bile yüzey özellikleri, yüzey alanları veya gözeneklilik gibi önemli fizikokimyasal özellikleri de farklılık gösterir (Lei ve Zhang 2013; Xie ve diğ., 2014). Örneğin Lignin miktarı yüksek olan ağacimsi biyokütlenin biyokömüre dönüşme reaktivitesinin, selüloz miktarı fazla olan otsul biyokütlede göre daha az olduğu gösterilmiştir (Burhenne ve diğ., 2013).

Biyokütleden üretilen kömürün yapısı henüz tam olarak aydınlığa kavuşturulamamış olmasına rağmen, normal kömür gibi tek düzeyde uzun grafit yapısından ziyade daha çok fulleren tipi konsantre halkalar, kısa grafit yapılar veya yarı küresel yapıları içerdiği görülmüştür (Şekil 6) (Ho ve diğ., 2012). Biyokütlede uygulanan sıcaklık değeri arttıkça, moleküllerin parçalanması artar, daha küçük ve aromatik formlara dönüşürler. Çok daha yüksek sıcaklıklarda biyoküttele gazlaşma meydana gelir.



Şekil 6. Grafit ve fulleren yapıları

Figure 6. Graphite and fullerene structures

Kullanım Alanları (Application areas)

Toprak iyileştiricisi ve organik gübre olarak kullanılması (Soil amending and organic fertilizer)

Biyokömür toprakta kendi ağırlığının 6 katı kadar su tutar, topraktan fosfor ve azot gibi elementlerin bitkiler tarafından daha kolay alınabilmesini sağlayarak toprak için iyi birer besin maddesi olur (Glaser ve diğ., 2014). Bu yetenekler özellikle çöl topraklarında tarım konusunda bir avantaj sağlamaktadır. Biyokömür yüzeyindeki fonksiyonel gruplar, topraktaki katyonik faaliyetleri artırır ve böylece toprak; kalsiyum, magnezyum ve potasyum gibi besinleri tutar. Tarımsal üretim verimini artırır. Ayrıca biyokömürler genel olarak bazik karakter gösterdikleri için toprağa eklendiğinde özellikle asitli toprakların pH değerlerini artırarak toprak pH'ını düzenlerler (Ippolito ve diğ., 2016).



Şekil 7. Biyokömür toprak uygulamaları
Figure 7. Biochar-soil applications

Hayvan çiftliklerinde kullanımı (Animal feed)

Biyokömür hayvan yemi ajanı, silaj ek maddesi olarak da kullanılabilir. İneklerde süt verimini midelerindeki mikro-flora etkilemektedir. Ortaya çıkabilecek toksit faaliyetlerin biyokömürce

inhibe edildiği ve süt veriminin arttığı araştırmalar sonucu ortaya çıkmıştır (<http://www.ithaka-journal.net/pflanzenkohle-in-der-rinderhaltung?lang=en>).



Şekil 8. Biyokömür hayvan yemi uygulamaları
Figure 8. Biochar-forage applications

Gazların tutulumu (Adsorption of gases)

Biyokömürün özellikle hidrojen sülfür (H_2S) gibi gazları tutma yeteneğinin olduğu araştırmalarda gösterilmiştir (Shang ve diğ., 2013; Xu ve diğ., 2014). H_2S , anaerobik faaliyetler sonucunda atık sularda, çöp toplama alanlarında, biyogaz oluşumu sırasında ortaya çıkan bir gazdır. Volkanik-jeolojik kaynaklardan ortaya çıkan H_2S 'e daha az rastlanmaktadır. Bunun dışında petrol arıtım tesislerinde doğal gaz ve kömür gazlaştırma proseslerinde yan ürün olarak açığa çıkmaktadır.

Hidrojen sülfür gazı çok zehirli, uçucu, renksiz ve yanıcı bir maddedir. Proses ekipmanları için korozif ve insan sağlığı için tehlikelidir. Ayrıca asit yağmurlarına neden olabilen bu gazın çevreye vereceği zararları önlemek için bulunduğu prosesden güvenilir bir şekilde uzaklaştırılması gerekmektedir.

H_2S gazını uzaklaştırmada oksitlemenin yanı sıra aktif karbon da kullanılmaktadır (Balsamo ve diğ., 2016). Buradaki temel parametre, aktif karbonun sahip olduğu yüksek yüzey alanı ve mikro boyuttaki gözeneklere gazın hapsedilebilmesidir. Aktif karbonun alkalinitesi artırılarak veya tuzlarla muamele edilerek, asidik H_2S gazının aktif karbona işlenmesi de artırılmaktadır. Hatta aktif karbonların H_2S adsorpsiyonunda etkili bir şekilde kullanılabilmesi için bazlarla muamelesi mutlaka gerekmektedir. Bu tür aktif karbonlara "emprenye (impregnated) karbon" da denilmektedir. Ancak baz muamelesi yapılmış aktif karbonlarda kendi kendine yanma sıcaklığı düşmekte ve yapı çökerek gözenekler Na, K gibi bazdan gelen iyonlar tarafından bloke edilmektedir. Bu olumsuzluklar H_2S 'in aktif karbonlarca uzaklaştırılması uygulamalarını zorlaştırmaktadır.

Diğer yandan biyokömür, aktif karbonlar yerine kullanılacak ümit veren malzemeler olarak ortaya çıkmaktadır. Çoğu biyokömür bazık-doğal bir yapıya sahiptir ve NaOH veya KOH ile alkalinitesinin artırılmasına gerek yoktur. Biyokömür üretilmesi sırasında in-sitü bir bazlık oluşmaktadır. Diğer yandan bazı biyokömür numunelerinin gözeneklilik ve yüzey alanı, aktif karbonlarla karşılaştırılabilir düzeydedir veya aktivasyon yöntemleri ile artırılabilir.

H_2S 'in biyokömür tarafından adsorpsiyon ile ilgili sınırlı sayıda çalışma mevcuttur (Shang ve diğ., 2016; Nowicki ve diğ., 2014). Kamfor, pirinç kabuğu, bambu atıkları, kahve endüstri atıkları biyokömüre dönüştürülmüştür. Aktif karbona göre daha fazla oksijen içeren fonksiyonel grupların varlığı ve yüksek pH, biyokömürün yüzey alanları aktif karbona göre çok küçük olduğu halde H_2S 'i daha etkili bir şekilde uzaklaştırmıştır. Ayrıca H_2S 'in alkali biyokömür yüzeyinde SO_4^{2-} 'ye okside olup minerallerle immobilize olup biyokömür gözeneklerinde elemental kükürte dönüşebildiği de gösterilmiştir (Xu ve diğ., 2014).

Biyokömür H₂S dışında zehirli Hg, NH₃ ve CO₂ gibi sera gazlarının uzaklaştırılmasında da etkili ve yeni bir gaz uzaklaştırıcı materyaldir (Bhandari ve diğ., 2014; Lomax ve diğ., 2015; Nguyen ve Lee 2016; Niu ve diğ., 2017; Yang ve diğ., 2016).

Enerji depolamada kullanımı (Energy storage)

Enerjiyi kullanma ve depolama ihtiyacı, enerji kaynaklarının farklı şekillerde kullanıma hazır hale getirilmesine ve dizayn edilmesine yol açmaktadır. Enerji depolamada genellikle kimyasal piller ve özellikle de ağır metalleri içeren kuru piller kullanılmaktadır. Biyokömür karbonu elektrokimyasal enerji depolama araçlarında da kullanılmaktadır (Kalyani ve Anitha 2013).

Süperkapasitörler, bu teknolojiler arasında en fazla gelecek vaat eden elektrokimyasal enerji depolama teknolojisidir (Jin ve diğ., 2013). Mobil araçlardan devasa boyutlu elektrikli araçlara kadar geniş ölçekte uygulama alanı bulmaktadır (fren sistemleri, kaldıraçlar, soğuk depolu araçlar, voltaj stabilizörleri, data merkezleri, sürdürülebilir enerji uygulamaları, uçak kapıları...). Süperkapasitörler yüksek güç yoğunluğu, hızlı şarj ve deşarj özellikleri olan enerji depolama araçlarıdır. Pil ve bataryalara göre daha fazla şarj/deşarj döngüsü, yüksek ve hızlı güç yoğunluğu, geniş çalışma sıcaklığı, düşük iç direnç gibi özellikler gösterirler.



Şekil 9. Süperkapasitör uygulama alanları (şematik)

Figure 9. Supercapacitor application areas (schematic)

Biyokömürün sahip olduğu amorf yapıdaki karbon materyali son zamanlarda lityum-iyon pili uygulamalarında dikkat çekmeye başlamıştır, çünkü bu materyal yüksek lityum emilimi yapabilir, geri dönüştürülebilir ve yapısı; organik biyokütlenin çeşidi, uygulanan piroliz sıcaklığı ve piroliz süresi gibi parametrelerle çeşitlendirilebilir (Gu ve diğ., 2014; Ryu ve diğ., 2015; Zhang ve diğ., 2014). Biyokömür karbonu düzenli kristal yapısı olmayan, çoğunlukla planar hegzagonal yapılar içeren bir karbondur ve hala yapıda hidrojen içerir. Bu hidrojen içeriği lityum-iyon pillerinde yüksek lityum kapasitesi oluşturulmasında etkilidir. Diğer yandan biyokömürün yüzey fonksiyonel grupları özellikle oksijen içeren asidik karboksil ve fenol grupları, tersinir redoks reaksiyonlarının oluşumu ile spesifik kapasitansı artırır. Karbon materyali yüksek iyon kapasitesi de sağlamaktadır. Ayrıca H₃PO₄, ZnCl₂, ve KOH gibi kimyasallarla aktivasyon, karbon materyalinin kapasite performansını artırmaktadır.

Katalizör olarak kullanımı (Catalyst)

Biyokömür, çok çeşitli reaksiyonlar için katalizör olarak kullanılabilir. Örneğin fenton reaksiyonu olarak bilinen zehirli ve istenmeyen poliaromatik hidrokarbon olan fenantren bileşiğinin bozunmasında biyokömür katalizör olarak kullanılabilmektedir (Gu ve diğ., 2013; Gu ve diğ., 2013).

Biyokömürün katalizör olarak kullanıldığı bir diğer uygulama biyodizel üretimidir. Yağ asitlerinin esterifikasyonunda ve bitkisel yağların transesterifikasyonunda karbon bazlı katı-heterojen katalizörlerin kullanımı dikkate değer ölçüde araştırılmıştır (Konwar ve diğ., 2014). Karbon esaslı katalizörlerin reaksiyon sonunda bozunmadan kalması, yeniden kullanılabilmesi, katalizör destek malzemesi olması, yenilenebilir ve ucuz olması gibi özellikleri vardır. En güncel karbon esaslı katalizör, biyokömürdür (Hidayat ve diğ., 2015; Li ve diğ., 2014; Kastner ve diğ., 2012).

Yapılarda kullanımı (Cement material)

Biyokömür, binalarda elektromanyetik radyasyonun emilimi veya yalıtım amaçlı yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır (Guan ve diğ., 2006; Makoviny ve Makovinyová 2011; Naeem ve diğ., 2017). Düşük ısı iletkenliği olduğu için binalarda yalıtımı sağlayabilir. Yüksek pH değeri ve yüksek su tutma özelliği ile çimento harcında kireç yerine kullanılabilir, hem yalıtım sağlar hem de oda içerisinde nem sürdürülebilir. Gaz tutulumu iyi olduğu için kötü koku ve duman olabilecek yerlerde kullanımı avantajlıdır. Elektronik cihazlardan yayılan elektromanyetik ışınımın zararları da biyokömürün yapı malzemesinde kullanımı ile azaltılabilir.

Adorbent olarak kullanılması (Adsorbent)

Sulardaki ağır metal ve organik kirleticiler, insan sağlığına zarar vermekte, çevreyi kirletmekte ve su canlılarının yaşam koşullarını kötü etkilemektedir. Daha çok insan faaliyetleri ile ortaya çıkan bu kirlilikler biyokömür kullanılarak giderilebilmektedir (Han ve diğ., 2016; Jung ve diğ., 2015; Ding ve diğ., 2016; Ding ve diğ., 2015). Biyokömürün gözenekliliği ve yüzey fonksiyonel grupları, topraktaki ve sudaki ağır metallerin ve fenolik bileşiklerin uzaklaştırılmasında uygun bir adsorbent olacağını göstermiştir. Bir aktif kömür öncü maddesi olarak biyokömür, aktif kömürün kullanıldığı alanlarda kullanılarak hem yerel kaynakların değerlendirilmesi hem de aktif karbona nazaran daha düşük maliyetlerde üretilmesi bakımından avantajlar sunmaktadır (Alhashimi ve Aktas 2017; Ahmed ve diğ., 2016).

Diğer kullanım alanları (Other applications)

Biyokömürün yukarıda bahsedilen özelliklerine dayanarak çok daha fazla ve farklı kullanım alanları mevcuttur. Örneğin tekstil sanayiinde fonksiyonel giysilerin üretiminde, karbonize materyalden grafen oksit üretiminde, ilaç endüstrisinde, çelik endüstrisinde yüksek kalite kömür yerine, aktif karbon üretiminde kullanımı gibi daha farklı uygulama alanları ile ilgili çalışmalara literatürde rastlanabilir (Nanda ve diğ., 2016; Qian ve diğ., 2015; Sun ve diğ., 2016; Park ve diğ., 2013; Norgate ve diğ., 2012). Yeni kullanım alanları ile ilgili çalışmalar devam etmekte ve daha da gelişecek gibi görünmektedir.

SONUÇ (CONCLUSION)

Biyokütle enerji kaynağı biyokömüre dönüştürülerek toprak ıslahı, enerji depolama, çevreyi kirleten organik ve inorganik kirleticilerin giderilmesi gibi pek çok alanda çok yönlü ve avantajlı bir materyal olarak kullanılabilir. Biyokütle enerjisinin kullanımında en önemli nokta, insan beslenmesinde kullanılan gıdaların hammadde olarak kullanılmamasıdır. Bunun yerine atıkların kullanılması gerekmektedir. Çoğunlukla çürümeye terk edilen biyokütle atıklarının değerlendirilmesi ve katma değeri yüksek ürünlere dönüştürülmesi, çevre kirliliğine sebep olan atıkların ortadan kaldırılmasına da katkıda bulunmaktadır. Ayrıca karbondioksit sera gazı salınımını ve parçacık salınımını da azaltacaktır (Meyer ve diğ., 2011).

KAYNAKÇA (REFERENCES)

- Abas, N., Kalair, A., Khan, N., 2015, "Review of Fossil Fuels and Future Energy Technologies", *Futures*, Vol. 69, pp. 31–49.
- Agirre, I., Griessacher, T., Rösler, G., Antrekowitsch, J., 2013, "Production of Charcoal as an Alternative Reducing Agent from Agricultural Residues using A Semi-Continuous Semi-Pilot Scale Pyrolysis Screw Reactor", *Fuel Processing Technology*, Vol. 106, pp. 114–121.
- Ahmed, M. B., Zhou, J. L., Ngo, H. H., Guo, W., 2016, "Biomass and Bioenergy Insight into Biochar

- Properties and Its Cost Analysis", *Biomass and Bioenergy*, 84, 76–86.
- Alhashimi, H. A., Aktas, C. B., 2017, "Life Cycle Environmental and Economic Performance of Biochar Compared with activated Carbon: A Meta-analysis", *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 118, pp. 13–26.
- Alvarez, J., Lopez, G., Amutio, M., Artetxe, M., Barbarias, I., Arregi, A., Olazar, M., 2016, "Characterization of the Bio-Oil Obtained by Fast Pyrolysis of Sewage Sludge in a conical Spouted Bed Reactor", *Fuel Processing Technology*, Vol. 149, pp. 169–175.
- Azadi, P., Khan, S., Strobel, F., Azadi, F., Farnood, R., 2012, "Hydrogen Production from Cellulose , Lignin , Bark and Model Carbohydrates in Supercritical Water Using Nickel and ruthenium Catalysts", *Applied Catalysis B, Environmental*, Vol. 117–118, pp. 330–338.
- Balsamo, M., Cimino, S., de Falco, G., Erto, A., Lisi, L., 2016, "ZnO-CuO Supported on Activated Carbon for H₂S Removal at Room Temperature", *Chemical Engineering Journal*, Vol. 304, pp.399–407.
- Bhandari, P. N., Kumar, A., Huhnke, R. L., 2014, "Simultaneous Removal of Toluene (model tar), NH₃, and H₂S, from Biomass-Generated Producer Gas Using Biochar-Based and Mixed-Metal Oxide Catalysts", *Energy and Fuels*, Vol. 28(3), pp. 1918–1925.
- Burhenne, L., Messmer, J., Aicher, T. Laborie, M. P., 2013, "The Effect of the Biomass Components Lignin, Cellulose and Hemicellulose on TGA and Fixed Bed Pyrolysis", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Vol. 101, pp. 177–184.
- Cao, L., Yuan, X., Li, H., Li, C., Xiao, Z., Jiang, L., Zeng, G. 2015, "Complementary Effects of Torrefaction and Co-Pelletization: Energy Consumption and Characteristics of Pellets", *Bioresource Technology*, Vol. 185, pp. 254–262.
- Chen, D., Zheng, Z., Fu, K., Zeng, Z., Wang, J., Lu, M., 2015, "Torrefaction of Biomass Stalk and Its Effect on the Yield and Quality of Pyrolysis Products", *Fuel*, Vol. 159, pp. 27–32.
- Ding, G., Wang, B., Chen, L., Zhao, S., 2016, "Simultaneous Adsorption of Methyl Red and Methylene Blue onto Biochar and an Equilibrium Modeling at High Concentration", *Chemosphere*, Vol. 163, pp. 283–289.
- Ding, Z., Wan, Y., Hu, X., Wang, S., Zimmerman, A. R., Gao, B., 2015, "Sorptions of Lead and Methylene Blue onto Hickory Biochars from Different Pyrolysis Temperatures: Importance of Physicochemical Properties", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 37, pp. 261–267.
- Glaser, B., Wiedner, K., Seelig, S., 2014, "Biochar Organic Fertilizers from Natural Resources as Substitute for Mineral Fertilizers", *Agron. Sustain. Dev.* Vol. 35, pp. 667–678.
- Gu, L., Huang, S., Zhu, N., Zhang, D., Yuan, H., Lou, Z., 2013, "Influence of Generated Intermediates' Interaction On Heterogeneous Fenton's Degradation of an azo dye 1-diazo-2-naphthol-4-sulfonic acid by using Sludge Based Carbon as Catalyst", *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 263, pp. 450–457.
- Gu, L., Wang, Y., Zhu, N., Zhang, D., Huang, S., Yuan, H., Wang, M., 2013, "Bioresource Technology Preparation of Sewage Sludge Based Activated Carbon by using Fenton ' s Reagent and Their use in 2-Naphthol Adsorption", *Bioresource Technology*, Vol. 146, pp. 779–784.
- Gu, X., Wang, Y., Lai, C., Qiu, J., Li, S., Hou, Y., Zhang, S., 2014, "Microporous Bamboo Biochar for Lithium-sulfur Batteries", *Nano Research*, Vol. 8(1), pp. 129–139.
- Guan, H., Liu, S., Duan, Y., Cheng, J., 2006, "Cement Based Electromagnetic Shielding and absorbing Building Materials", *Cement & Concrete Composites*, Vol. 28, pp. 468–474.
- Han, S., Zhou, X., Tang, Y., He, M., Zhang, X., Shi, H., Xiang, Y., 2016, "Practical, Highly Sensitive, and regenerable Evanescent-wave Biosensor for Detection of Hg²⁺ and Pb²⁺ in Water", *Biosensors and Bioelectronics*, Vol. 80, pp. 265–272.
- Hidayat, A., Rochmadi, Wijaya, K., Nurdiawati, A., Kurniawan, W., Hinode, H., Budiman, A., 2015, "Esterification of Palm Fatty Acid Distillate with High Amount of Free Fatty Acids Using Coconut Shell Char Based Catalyst", *Energy Procedia*, Vol. 75, pp. 969–974.
- Ho, K., Kim, J., Cho, T., Weon, J., 2012, "Influence of Pyrolysis Temperature on Physicochemical

- Properties of Biochar Obtained from the Fast Pyrolysis of Pitch Pine (*Pinus rigida*)", *Bioresource Technology*, Vol. 118, pp. 158–162.
- Ippolito, J. A., Ducey, T. F., Cantrell, K. B., Novak, J. M., Lentz, R. D., 2016, "Designer, Acidic Biochar Influences Calcareous Soil Characteristics", *Chemosphere*, Vol. 142, pp.184–191.
- Jang, H. M., Ha, J. H., Kim, M.-S., Kim, J.-O., Kim, Y. M., Park, J. M.,2016, "Effect of Increased Load of High-strength Food Wastewater in Thermophilic and Mesophilic Anaerobic Co-digestion of Waste Activated Sludge on Bacterial Community Structure", *Water Research*, Vol. 99, pp. 140–148.
- Jin, H., Wang, X., Gu, Z., Polin, J., 2013, "Carbon Materials from High Ash Biochar for Supercapacitor and Improvement of Capacitance with HNO₃ Surface Oxidation", *Journal of Power Sources*, Vol. 236, pp. 285–292.
- Jones, G. A., Warner, K. J., 2016, "The 21st century Population-Energy-Climate Nexus", *Energy Policy*, Vol. 93, pp. 206–212.
- Jung, C., Oh, J., Yoon, Y., 2015, "Removal of Acetaminophen and Naproxen by Combined Coagulation and Adsorption Using Biochar: Influence of Combined Sewer Overflow Components", *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 22(13), pp. 10058–10069.
- Kalyani, P., Anitha, A., 2013, "Biomass Carbon & Its Prospects in Electrochemical Energy Systems", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 38(10), pp. 4034–4045.
- Kambo, H. S., Dutta, A., 2015, "A Comparative Review of Biochar and Hydrochar in Terms of Production , Physico-Chemical Properties and Applications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 45, pp. 359–378.
- Kan, T., Strezov, V., Evans, T. J., 2016, "Lignocellulosic Biomass Pyrolysis: A Review of Product Properties and Effects of Pyrolysis Parameters", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 57, pp. 126–1140.
- Kastner, J. R., Miller, J., Geller, D. P., Locklin, J., Keith, L. H., Johnson, T., 2012, "Catalytic Esterification of Fatty Acids Using Solid Acid Catalysts Generated from Biochar and Activated Carbon", *Catalysis Today*, Vol. 190(1), pp. 122–132.
- Kiran, B., Pathak, K., Kumar, R., Deshmukh, D., 2016, "Statistical Optimization using Central Composite Design for Biomass and Lipid Productivity of Microalga: A Step Towards Enhanced Biodiesel Production", *Ecological Engineering*, Vol. 92, pp. 73–81.
- Konwar, L. J., Boro, J., Deka, D., 2014, "Review on Latest Developments in Biodiesel Production Using Carbon-Based Catalysts", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 29, pp. 546–564.
- Lehmann, J., Joseph, S., 2009, *Biochar Environmental Management*, ISBN: 978-1-84407-658-1, Earthscan Yayıncılık, 2. Bölüm, sayfa 18.
- Lei, O., Zhang, R., 2013, "Effects of Biochars Derived from Different Feedstocks and pyrolysis Temperatures on Soil Physical and Hydraulic Properties", *Journal of Soils and Sediments*, Vol. 13(9), pp. 1561–1572.
- Li, M., Zheng, Y., Chen, Y., Zhu, X., 2014, "Biodiesel Production from Waste Cooking Oil Using a Heterogeneous Catalyst from pyrolyzed Rice Husk", *Bioresource Technology*, Vol. 154, pp.345–348.
- Lomax, G., Workman, M., Lenton, T., Shah, N., 2015, "Reframing the Policy Approach to Greenhouse Gas Removal Technologies", *Energy Policy*, Vol. 78, pp. 125–136.
- Lorenz, K., Lal, R., 2014, "Biochar Application to Soil for Climate Change Mitigation by Soil Organic Carbon Sequestration", *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, Vol. 177, pp. 651–670.
- Makovíny, I., Makovínyiová, K., 2011, "Shielding of electromagnetic Radiation by Using Wood-Cement Boards Modified with Carbon in Microwave Frequency Band", *Eur. J. Wood Prod.* Vol. 69, pp.671–673.
- Mcbeath, A. V., Wurster, C. M., Bird, M. I., 2015, "ScienceDirect Influence of Feedstock Properties and Pyrolysis Conditions on Biochar Carbon Stability as Determined by Hydrogen Pyrolysis" *Biomass and Bioenergy*, Vol. 73, pp.155–173.

- Meyer, S., Glaser, B., Quicker, P., 2011, "Technical, Economical and Climate Related Aspects of Biochar Production Technologies: A Literature Review", *Environmental Science & Technology*, Vol. 45, pp. 9473–9483.
- Naeem, S., Baheti, V., Tunakova, V., Militky, J. Karthik, D., 2017, "Development of Porous and Electrically Conductive Activated Carbon Web for effective EMI Shielding Applications", *Carbon*, Vol. 111, pp. 439–447.
- Nanda, S., Dalai, A. K., Berruti, F., Kozinski, J. A., 2016, "Biochar as an Exceptional Bioresource for Energy , Agronomy , Carbon Sequestration , Activated Carbon and Specialty Materials", *Waste and Biomass Valorization*, Vol. 7(2), pp. 201–235.
- Nguyen, M. V., Lee, B. K., 2016, "A Novel Removal of CO₂ Using Nitrogen Doped Biochar Beads as a Green Adsorbent", *Process Safety and Environmental Protection*, Vol. 104, pp.490–498.
- Niu, Q., Luo, J., Xia, Y., Sun, S., Chen, Q., 2017, "Surface Modification of Bio-char by Dielectric Barrier Discharge Plasma for Hg₀ Removal", *Fuel Processing Technology*, Vol. 156, pp. 310–316.
- Norgate, T., Haque, N., Somerville, M., Jahanshahi, S., 2012, "Biomass as a Source of Renewable Carbon for Iron and Steelmaking", *ISIJ International*, Vol. 52(8), pp. 1472–1481.
- Nowicki, P., Skibiszewska, P., Pietrzak, R., 2014, "Hydrogen Sulphide Removal on carbonaceous Adsorbents Prepared from Coffee Industry Waste Materials", *Chemical Engineering Journal*, Vol. 248, pp. 208–215.
- Park, J., Hung, I., Gan, Z., Rojas, O. J., Lim, K. H., Park, S., 2013, "Activated Carbon from Biochar: Influence of Its Physicochemical Properties on the Sorption Characteristics of Phenanthrene", *Bioresource Technology*, Vol. 149, pp. 383–389.
- Qian, K., Kumar, A., Zhang, H., Bellmer, D., Huhnke, R., 2015, "Recent Advances in Utilization of Biochar", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 42, pp. 1055–1064.
- Rintamäki, H., Rikkonen, P., Tapio, P., 2016, "Carrot or Stick: Impacts of Alternative Climate and Energy Policy Scenarios on Agriculture", *Futures*, Vol. 83, pp. 64–74.
- Ryu, D. J., Oh, R. G., Seo, Y. D., Oh, S. Y., Ryu, K. S., 2015, "Recovery and Electrochemical Performance in Lithium Secondary Batteries of Biochar Derived from Rice Straw" *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 22(14), pp. 10405–10412.
- Schiffer, H. W., 2008, "WEC Energy Policy Scenarios to 2050", *Energy Policy*, Vol. 36(7), pp. 2464–2470.
- Shang, G., Li, Q., Liu, L., Chen, P., Huang, X., 2016, "Adsorption of Hydrogen Sulfide by Biochars Derived from Pyrolysis of Different Agricultural / Forestry Wastes", *Journal of the Air & Waste Management Association*, Vol. 66(1), pp. 8–16.
- Shang, G., Shen, G., Liu, L., Chen, Q., Xu, Z., 2013, "Kinetics and Mechanisms of Hydrogen Sulfide Adsorption by Biochars", *Bioresource Technology*, Vol. 133, pp. 495–499.
- Sindhu, R., Binod, P., Pandey, A., 2016, "A novel Sono-assisted Acid Pretreatment of Chili Post Harvest Residue for Bioethanol Production", *Bioresource Technology*, Vol. 213, pp. 58–63.
- Sun, J., Hoon, S., Jung, S., Ryu, C., Jeon, J., Shin, M., Park, Y., 2016, "Journal of Industrial and Engineering Chemistry Production and Utilization of Biochar : A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 40, pp. 1–15.
- Tan, X., Liu, Y., Zeng, G., Wang, X., Hu, X., Gu, Y., Yang, Z., 2015, "Application of Biochar for the Removal of Pollutants from Aqueous Solutions" *Chemosphere*, Vol. 125, pp. 70–85.
- Tripathi, M., Sahu, J. N., Ganesan, P., 2016, "Effect of Process Parameters on Production of Biochar from Biomass Waste Through Pyrolysis : A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 55, pp. 467–481.
- Xie, T., Reddy, K. R., Wang, C., Yargicoglu, E., Spokas, K., 2014, "Characteristics and Applications of Biochar for Environmental Remediation: A Review", *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, pp.. 45, 939–969.
- Xu, X., Cao, X., Zhao, L., Sun, T., 2014, "Comparison of Sewage Sludge- and Pig Manure-derived Biochars for Hydrogen Sulfide Removal", *Chemosphere*, Vol. 111, pp. 296–303.
- Yang, J., Zhao, Y., Ma, S., Zhu, B., Zhang, J., Zheng, C., 2016, "Mercury Removal by Magnetic Biochar

- Derived from Simultaneous Activation and Magnetization of Sawdust", *Environmental Science and Technology*, Vol. 50(21), pp. 12040–12047.
- Yang, Y., Brammer, J. G., Mahmood, A. S. N., Hornung, A., 2014, "Intermediate Pyrolysis of Biomass Energy Pellets for Producing Sustainable Liquid, Gaseous and Solid Fuels", *Bioresource Technology*, Vol. 169, pp. 794–799.
- Zellagui, S., Schönnenbeck, C., Zouaoui-Mahzoul, N., Leyssens, G., Authier, O., Thunin, E., Brillhac, J. F., 2016, "Pyrolysis of Coal and Woody Biomass under N₂ and CO₂ Atmospheres using a Drop Tube Furnace - Experimental Study and Kinetic Modeling", *Fuel Processing Technology*, Vol. 148, pp. 99–109.
- Zhang, L., Jiang, J., Holm, N., Chen, F., 2014, "Mini-chunk Biochar Supercapacitors", *Journal of Applied Electrochemistry*, Vol. 44(10), pp. 1145–1151.
- Zhang, W., Mao, S., Chen, H., Huang, L., Qiu, R., 2013, "Pb(II) and Cr(VI) Sorption by Biochars Pyrolyzed from the Municipal Wastewater Sludge under Different Heating Conditions", *Bioresource Technology*, Vol. 147, pp.545–552.



COLLAPSE OF BASE SOIL AND ITS CONSEQUENCES DURING A CEMENT PLANT CONSTRUCTION

¹Volkan KALPAKCI

¹*Civil Engineering Department, Hasan Kalyoncu University, Gaziantep, Turkey*
volkan.kalpakci@hku.edu.tr

(Geliş/Received: 21.03.2017; Kabul/Accepted in Revised Form: 14.04.2017)

ABSTRACT: Collapsible soils are subjected to rapid changes in their volume when inundated with water. Collapse of such a soil deposit during construction of a cement plant in north Azerbaijan resulted in significant settlement and tilting of structures causing a 2 years delay in the construction. The investor had to bear the huge costs of delay and remediation works. The collapse susceptibility of the soil could not be identified during initial site investigations. After first indications of the collapse problem (tilting, cracking of structures) the settlements were measured at different locations for a long time and a new site investigation was executed. The results of these studies were utilized to determine the collapse potential of the soil. Interestingly, some of the indirect methods were not capable of determining the collapse potential. It was seen that, indirect methods may mislead the engineers in such soils and it is more reliable to perform direct tests to determine collapse potential in similar soil deposits. In this study, it is aimed to discuss the experience gained in this project about determining the collapse potential and apprise the professionals as well as academicians about possible problems which may be faced during such studies in similar soils.

Key Words: Collapse, Settlement, Tilt

Bir Çimento Fabrikası İnşaatı Sırasında Gözlemlenen Zemin Çökmeleri ve Sonuçları

ÖZ: Çökebilir zeminler suya maruz kaldıklarında hacimsel olarak hızlı değişimler gösterirler. Kuzey Azerbaycan'daki bir çimento fabrikası inşaatı sırasında meydana gelen bu tarz bir zemin çökmesi, yapıların kayda değer miktarda oturmasına ve eğilmesine sebep olmuş ve inşaatın yaklaşık 2 yıl kadar gecikmesine sebebiyet vermiştir. Yatırımcı, tamirat işleri ve gecikmeler sebebiyle oluşan ciddi maliyetleri karşılamak zorunda kalmıştır. Zeminin çökme potansiyeli yapılan ilk saha etütlerinde belirlenememiştir. Eğilme ve/veya yapılardaki çatlaklar gibi çökmeden kaynaklı ilk belirtilerden sonra, çeşitli noktalarda uzun süreli oturma ölçümleri alınmış ve yeni, daha detaylı arazi etütleri planlanmıştır. Bu çalışmaların sonuçları, zeminin çökme potansiyelini belirlemek için kullanılmıştır. Literatürde belirtilen dolaylı metotların bazıları ilginç bir şekilde çökme potansiyelini belirleyememiştir. Yapılan araştırma sonucunda, bu tip zeminlerde bazı metotların mühendisleri yanlış sonuçlara yönlendirebileceği; benzer zeminlerde çökme potansiyelini direk metotlarla belirlemenin daha güvenilir bir yöntem olduğu görülmüştür. Bu çalışmanın amacı, projede sırasında bu tip zeminlerin çökme potansiyelinin belirlenmesi konusunda kazanılmış tecrübeleri tartışmak ve hem akademisyenleri hem de bu alandaki profesyonel kişileri benzer zeminlerde, bu tarz çalışmalar sırasında oluşabilecek sorunlar hakkında bilgilendirmektir.

Anahtar Kelimeler: Çökme, Eğilme, Oturma

INTRODUCTION

The rapid decrease in total volume of a soil due to wetting-induced breakdown of its structure under constant total vertical stress is commonly referred to "collapse" of that soil. Factors affecting the collapse potential of a soil deposit may be listed as the mineralogy, gradation, in situ density and moisture content of the soil as well as the nature of cementing agents, pore fluid chemistry and the degree of inundation with water. In general, it can be said that soils with water soluble contents (salt, gypsum, etc.) and low dry density have a collapse potential that should be investigated before the construction. The properties of collapsible soils and the potential methods for prediction of the collapse susceptibility of a soil were previously studied by many different researchers some of which may be listed as Priklonski (1952), Larionov (1965), Gibbs and Bara (1967), Handy (1973), Lin and Liyang (1982), Houston et al. (1988), Lawton et al. (1992). A more recent method was suggested to determine the collapse potential by Ayadat and Hanna (2007). In Ayadat and Hanna (2007), an empirical model was developed for predicting soil collapse in terms of the initial dry unit weight, initial water content and the soil gradation. Collapse potential of loess soils were investigated by Hormdee (2008). In this study, it was stated that these soils are found in arid regions and goes under significant volume loss when saturated resulting in severe damages to structures due to differential settlements, just as seen in this case.

Collapse of base soils were responsible for significant damages in constructed facilities. A real scale foundation was constructed on a collapsible soil and the settlements were observed in El-Ehwany and Houston (1990), while damage at highway infrastructure due to collapsible soils was discussed in Houston et al. (2002). The collapse potential of approach pavements in 74 bridges in Iowa, USA was investigated in White et al. (2007). The collapse of base soil and its consequences in Abu Mena historical site in Egypt, was discussed in Benedini and Cleere (2005) and Herle et al. (2010). In Volgodonsk city of Russia, having similar soil characteristics with the presented case, settlements up to 30cm and 90cm were reported beneath structures resting on mat and piled foundations respectively by Grigoryan (1991).

Collapsible soils are frequently observed in countries around Black Sea and Middle Asia. These soils are typically loamy and clayey loess deposits having gypsum, salt and mica contents which are highly soluble when subjected to water. Such soils seem to be very stiff during dry seasons but they lose their integrity and stiffness very rapidly when inundated with rains resulting in excessive settlements.

Extensive settlements due to collapse of such a soil deposit during construction of a cement plant in north Azerbaijan (Fig.1) and its consequences are discussed in this study. The cement plant consists of several structural units including towers and heavy foundations covering an area of 1450mx850m. The collapsible soils were not emphasized during the geotechnical design. Structures were built on 16m deep piled foundations which were designed by conventional bearing capacity calculation methods. Large settlements and tilting of structures were observed at the early stages of the construction. The structural damage due to soil collapse led to a delay of approximately 2 years in the construction. Moreover, the investor had to bear the huge costs of this delay together with the costs for repair of the existing parts and soil improvement for further construction.

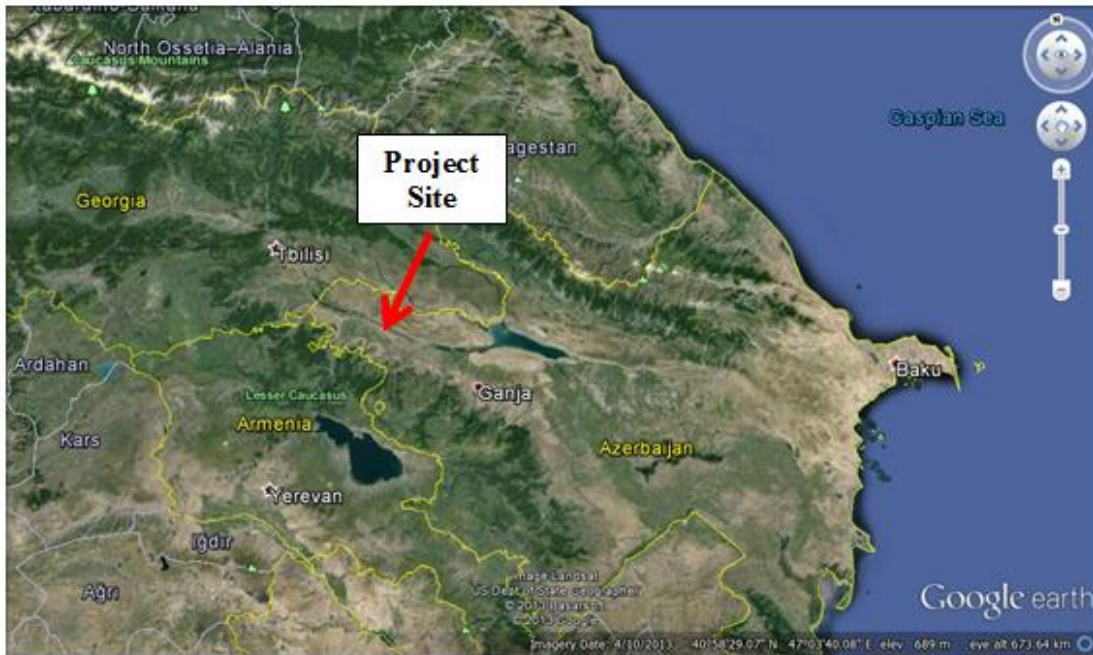


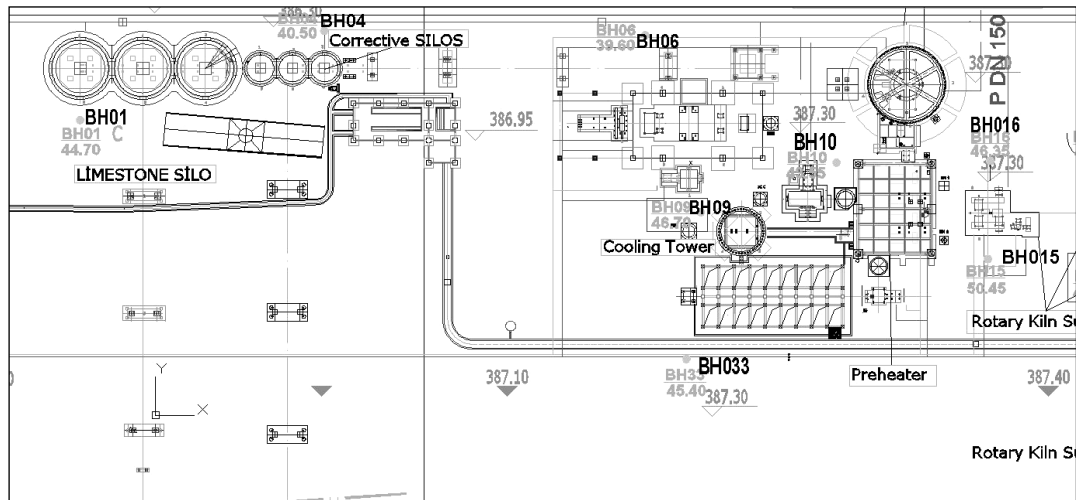
Figure 1. Location of the project site

After tiny cracks and tiltings were observed on the built structures as an indicator of a severe settlement problem, a detailed investigation program was started based on time dependent settlement measurements recorded at different points of the site. The measurements revealed that the rate of settlements were very high during rainy seasons while it was almost flat during dry seasons indicating a very obvious collapse behavior.

SITE INVESTIGATIONS

The author was informed that, prior to the construction of cement plant, a company drilled 184 boreholes which were 15 to 25 meters long. The investigated area is located at a rural part of the North Azerbaijan where most of the remaining structures are single-storey houses. Consequently, there was no former information, investigation or a case history about the collapse potential of the soil in the region. As a result, care was not given to collapse potential but rather to bearing capacity issues and no experiments were carried out to investigate the collapse potential. Using the information obtained from this investigation, a design company designed the foundations and suggested 16m long piles to carry the structures to be built. Another investigation was conducted by a local company containing 10 CPT (Cone Penetration Test) tests in 45m deep boreholes and 7 CPT tests in 16-24m deep boreholes to check the design calculations.

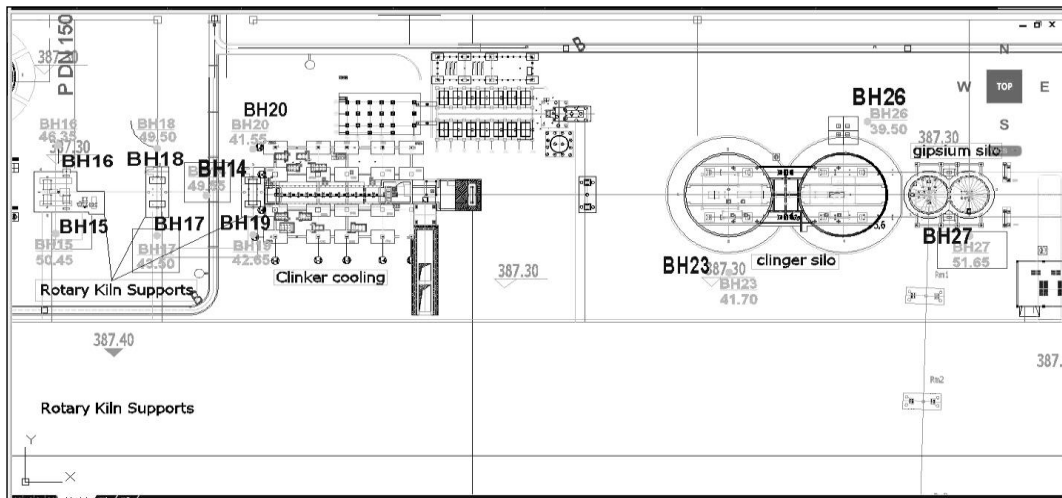
The collapse susceptibility of the base soil could not be identified despite the abovementioned site investigations and more than 1400 conventionally designed friction piles (16m in length, each designed to carry a vertical load of 1000kN) were constructed at the site. The construction had started in dry season and large settlements were observed at pile heads in a very short time at the beginning of the wet season, even before making any construction on the piles at some locations. After these observations, the construction was immediately halted and another company was assigned to conduct a new investigation program in order to determine the physical and mechanical characteristics of the base soil. A total of 34 boreholes with depths varying from 39.5m to 49.55m were drilled for this purpose. General view of the plant during construction and layouts of the boreholes are shown in Fig.2 and Fig.3. Since the last mentioned investigation was the most detailed, reliable, up-to-date and the only complete one among others, the results of this investigation were used together with the measurements for the evaluations presented in this study.



(a) Borehole locations on the west side of the construction area



(b) A view during construction from west side of the plant
Figure 2. West side of the construction area ($\approx 850\text{m} \times 900\text{m}$)



(a) Borehole locations on the east side of the construction area



b) A view during construction from east side of the plant

Figure 3. East side of the construction area (≈850mx550m)

DISCUSSIONS

According to the last soil investigation, the soil formation of the area is of Quaternary origin and composed of alluvial-dealluvial-proalluvial complex. Lithologically it consists of soft cohesive clayey soils (clay, clay loam, loamy sand). In the composition of these soils various sized rolled soil fragments, different salts, gypsum mixtures and mica are present. These soils are carbonated and often dusty, sometimes loess-like. In some places of the area, at different depths, coarse limestone pieces are found. An examination of borehole logs shows that SPT (Standard Penetration Test) blow counts can be as low as N=7-12 in the first 18m (at maximum) from ground surface and increases below this depth. The representative physical and mechanical characteristics of the base soil within this depth obtained from the experiments conducted on samples are summarized below in Table 1.

Table 1. Summary of representative physical and mechanical properties of the soil

ρ (g/cm ³)	ρ_{dry} (g/cm ³)	G_s	C_u	w_n (%)	LL (%)	PI (%)	e (%)	n (%)	c (kPa)	Φ (°)
1.95	1.60	2.72	15	22	39	21	74	42.5	34	20

According to the site observations, the soil which was evaluated as a loose soil deposit according to the SPT test results was seen to be stiff enough and cemented in dry condition. The method suggested by Das (2015) was used initially to evaluate the collapse susceptibility of the soil based on the data obtained from the tested soil samples. In this method, a line representing the equation given in Eq.1 separates the collapsing and non-collapsing soils. The obtained dry unit weight and liquid limit is plotted on the graph for each sample and if the point is above the line, the sample is classified as non-collapsible while it is classified as collapsible if it falls below this line. When dry unit weight was plotted against the liquid limit for the tested samples, only two out of thirty samples were located on this line while only one sample fell below this line. All of the other points (90% of the tested samples) fell to the non-collapsing region (Fig.4). Also, many other methods suitable to be utilized with the available data, to estimate the collapse potential (CP) of the soil have been investigated. The soil was evaluated as collapsible by some of the methods while other methods were classifying the soil as non-collapsible or in the transition zone. Only the method suggested by Ayadat and Hanna (2007) indicated the collapse potential clearly. All of these evaluations are summarized in Table 2.

$$\frac{G_s \gamma_w}{1 + (LL)G_s} \quad (1)$$

Table 2. Evaluation of collapse potential by different methods

Method	Reference	Calculation	Evaluation
Collapsible if: $n > 40\%$	Feda (1966)	$n = 42.5\%$	Collapsible but close to limit value
Collapsible if: $n > 40\% \ \& \ w_n < 30\%$	Minkov (1977)	$n = 42.5\%$ $w_n = 22\%$	Collapsible but close to limit value
$C_u \leq 4 \rightarrow$ Non-Collapsible $4 < C_u < 12 \rightarrow$ Transition Interval (Collapse may occur) $C_u \geq 12 \rightarrow$ Collapsible	Ayadat and Belouahri (1996)	$C_u = 10$	Transition Interval
Collapsible if: $PI < 20\% \ \& \ 15 < w_n < 35$	Ayadat and Ouali (1999)	$PI = 21,$ $w_n = 22\%$	Non-Collapsible but close to limit value
$CP = a(\gamma_{dry} - 15.27) + b w_n + 17$ $a = -0.036 C_u - 1.379$ $b = 0.0006 C_u^2 - 0.089 C_u + 1.3$ Collapsible if $CP > 1$	Ayadat and Hanna (2007)	$C_u = 10$ $\gamma_{dry} = 15.7 \text{ kN/m}^3$ $w_n = 22\%$ $So, CP = 26.6$	Collapsible
Collapsible if: $x < \frac{G_s \gamma_w}{1 + (LL)G_s}$ Non-Collapsible if: $x > \frac{G_s \gamma_w}{1 + (LL)G_s}$	Das (2015)	Data plotted in Fig.4	90% Non-Collapsible

As mentioned above, the collapse potential of the soil could not be identified clearly by most of the methods which were suitable to be used with the available data. However, the appearance and behavior

of the soil completely changes when it is subjected to water. As it can be seen in Fig.5, a stiff soil block starts to disintegrate rapidly when inundated with water and turns in to mud just in a few minutes. The complete disintegration of an approximately 10x10cm sample took around seven minutes during this observational experiment.

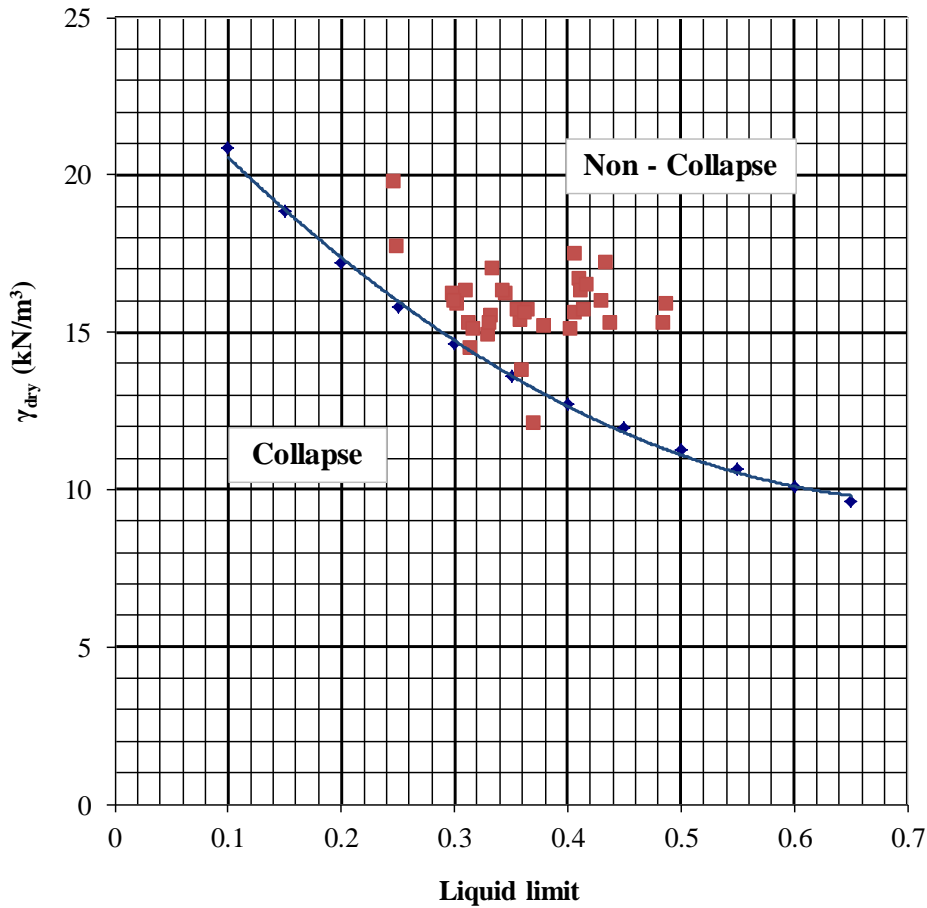


Figure 4. Collapse susceptibility of soil samples of the construction area (Das, 2015)

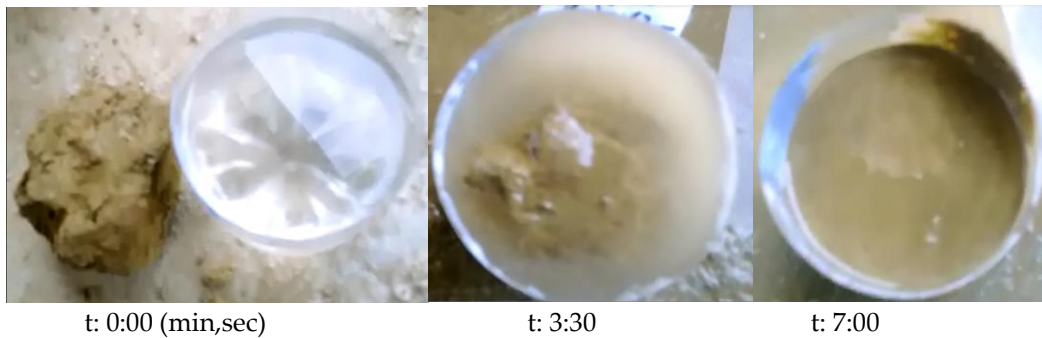


Figure 5. Change of soil state when subjected to water

The collapse of the subsoil was most clearly observed under clinker silo. As it can be seen from settlement measurements under clinker silo (Fig.6), the rate of settlements increased during rainy seasons while they almost stabilized during dry seasons. The total collapse at this location was on the order of 120 mm which resulted in significant tilting of the structure (Fig.7).

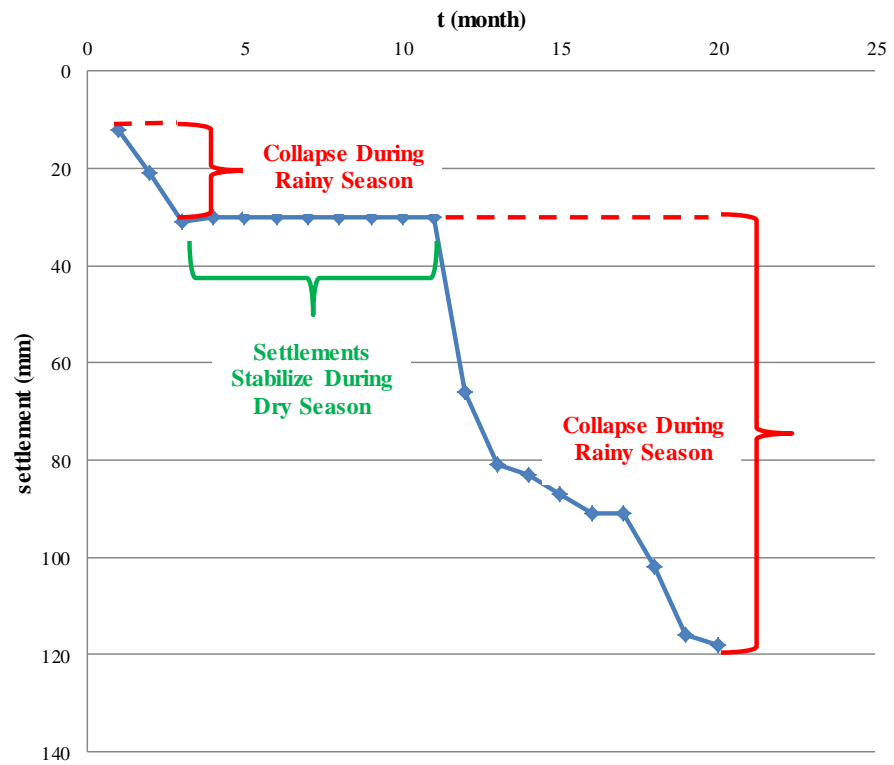


Figure 6. Time-Settlement plot for clinker silo



Figure 7. Tilting of clinker silo

The reinforced concrete foundations were cracked due to collapse of base soil even before the construction of the structures which they were planned to carry. The settlements beneath the foundation

of the raw mill fan of the cement plant were measured at four corners and it was seen that the foundation had collapsed on the order of 80 mm (Fig. 8) which led to cracking of the foundation at different points (Fig. 9). Similar behavior and extensive settlements were measured at almost all important parts of the cement plant construction. The construction had been stopped for almost 2 years during which extensive site investigations were executed. The cost of underestimating the collapse probability of the base soil was tremendous since the opening of the plant was delayed for 2 years and some of the constructed facilities had to be demolished and reconstructed after soil improvement. Also 1400 piles constructed at the beginning of the project were completely sunk in to the soil and could not be used to support the structures any more resulting in another significant financial loss.

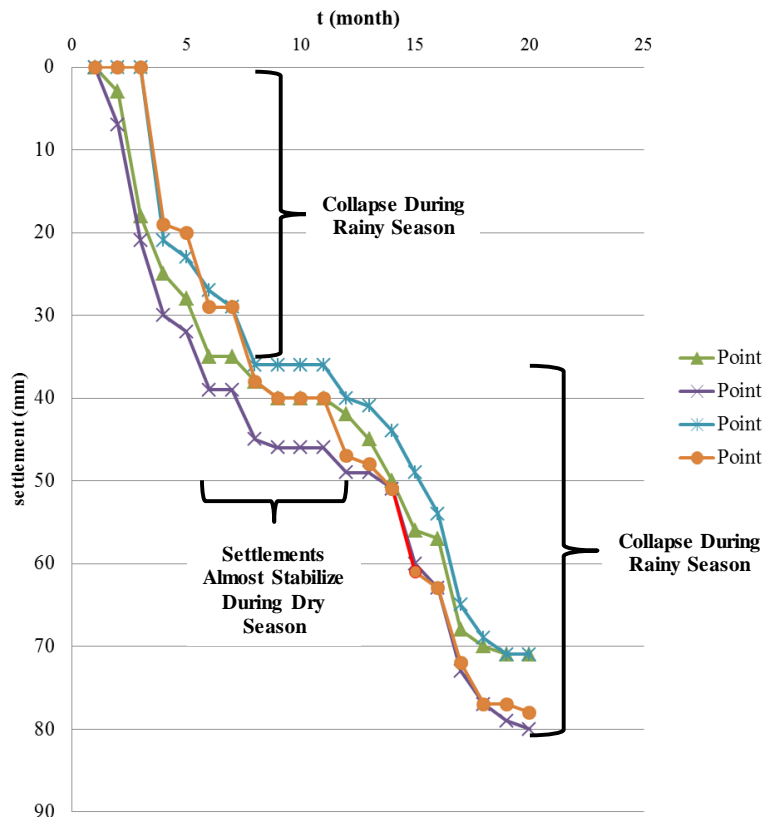


Figure 8. Settlement measurement beneath raw mill fan foundation



Figure 9. Concrete cracking in foundations due to collapse settlements

CONCLUSIONS

In this study, the excessive settlements of collapsible soils observed at a cement plant construction site in north Azerbaijan and its effects on the constructed facilities were discussed. The soil appears to be very hard and highly cemented in dry condition but turns into mud in a few minutes when subjected to water. Sudden collapses occur in rainy seasons and rate of settlements decrease during dry periods.

During the initial site investigations, no studies were carried out about the collapse potential of the base soil but the investigations were focused on bearing capacity calculations. The foundations were designed with 16m long friction piles based on the conventional bearing capacity and settlement calculations. This mistake resulted in waste of huge investment and time. The constructed facilities have tilted and settled. The construction had been stopped for almost 2 years and most of the constructed parts of the cement plant had to be either reconstructed or repaired.

The construction area is rural but will be subject to a very fast urbanization in a short time due to new industrial investments. All above mentioned facts reveal that the practice for site investigations should be modified for the region. Tests and observations should be carried out on collapse potential as well as the bearing capacity and settlement issues, not to skip the risk for the other construction activities as done in this case. Although the soil properties were investigated in detail in the latest site investigation, still the collapse potential could not be determined clearly by most of the indirect methods. These methods are giving different results since the data sets used in developing these methods were obtained from samples taken from different locations of the world. However, the soil properties of the investigated region are not fully compatible with most of the presented methods. The important lesson learned from this case is that the geotechnical engineer should not only always rely on the indirect methods based on soil properties like dry density, liquid limit, plasticity index, void ratio and etc. to determine the collapse susceptibility of a soil especially when the parameters utilized to check the collapse potential are close to the limiting values given in these methods. It is strongly recommended to investigate the collapse potential experimentally in such situations. Otherwise, the engineer may skip the potential problems which may result in significant damage of structures and huge costs as seen in this case.

NOTATION LIST

The following symbols are used in this paper:

c = cohesion;

C_u : coefficient of uniformity

e = void ratio;

G_s = specific gravity;

LL = liquid limit;

n = porosity;

PI = plasticity index;

w_n = natural water content;

γ_{dry} = dry unit weight of soil;

γ_w = unit weight of water;

ρ = in-situ soil density;

ρ_{dry} = dry soil density; and

Φ = angle of internal friction.

ACKNOWLEDGMENTS

Prof. Dr. M. Yener Özkan is sincerely acknowledged for his continuous support and encouragement. The engineers and investors involved in the construction of the discussed cement plant are also acknowledged for their cooperation during the study of the author.

REFERENCES

- Ayadat, T., Belouahri, B., 1996, "Influence du coefficient d'uniformité sur l'amplitude et le taux de l'affaissement des sols", *Revue française de géotechnique*, Vol. 76, pp. 25-34.
- Ayadat, T., Hanna, A., 2007, "Prediction of Collapse Behaviour in Soil", *Revue Européenne de Génie Civil*, Vol. 11, No. 5, pp. 603-619.
- Ayadat, T., Ouali, S., 1999, "Identification des sols affaissables basée sur les limites d'Atterberg", *Revue française de géotechnique*, Vol. 86, pp. 53-56.
- Benedini, M., Cleere H., 2005, "Report of the UNESCO-ICOMOS Monitoring Mission to ABU MENA (Egypt)"
- Das, B., 2015, *Principles of Foundation Engineering*, Cengage Learning, Boston, USA.
- El-Ehwany, M., Houston, S., 1990, "Settlement and Moisture Movement in Collapsible Soils", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 116, No. 10, pp. 1521-1535.
- Feda, J., 1966, "Structural Stability of Subsiding Loess from Prahadejvice", *Engineering Geology*, Vol. 1, pp. 201-219.
- Gibbs, H. J., Bara, J. P., 1967, "Stability Problems of Collapsing Soil", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 93, pp. 577-594.
- Grigoryan, A. A., 1991, "Construction on Loess Soils", *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 28, No. 1, pp. 44-49.
- Handy, R. L., 1973, "Collapsible Loess in Iowa", *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 37, No. 2, pp. 281-284.
- Herle, I., Herbstová, V., Kupka, M., Kolymbas, D., 2010, "Geotechnical Problems of Cultural Heritage due to Floods", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, Vol. 24, SPECIAL ISSUE: Flood Impact to Heritage Structures, pp. 446-451.
- Hormdee, D., 2008, "Investigation on Collapse Potential of Loess Soil", *Eighteenth International Offshore and Engineering Conference*, Vancouver, 579-581, 6-11 July 2008.
- Houston, S., Houston, W., Lawrence, C., 2002, "Collapsible Soil Engineering in Highway Infrastructure Development", *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 128, No. 3, pp. 295-300
- Houston, S., Houston, W., Spadola, D., 1988, "Prediction of Field Collapse of Soils Due to Wetting", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 114, No. 1, pp. 40-58.
- Larionov, A.K., 1965, "Structural Characteristics of Loess Soils for Evaluating their Constructional properties", *6th international Conference on SMFE*, Montreal, Vol. 1, 64-68, 8-15 September 1965.
- Lawton, E., Fragaszy, R., Hetherington, M., 1992, "Review of Wetting-Induced Collapse in Compacted Soil", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 118, No. 9, pp. 1376-1394.
- Lin, Z., Liang, W., 1982, "Engineering Properties and Zoning of Loess and Loess-like Soils in China", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 19, No. 1, pp. 76-91.
- Minkov, M., 1977, "Deformation Properties of Bulgarian Loess Soils", *9th International Conference on SMFE*, Tokyo, Vol. 1, 215-218, 11-15 July 1977.
- Prikloński, V.A., 1952, "Gruntoredenia-Vtoraid chest. Gosgeolzdat", Moscow, U.S.S.R.
- White, D., Mekkawy, M., Sritharan, S., Suleiman, M., 2007, "Underlying Causes for Settlement of Bridge Approach Pavement Systems", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, Vol. 21, No. 4, pp. 273-282.

İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI: TARİHÇESİ, TANIMI, DÜNYADA VE TÜRKİYE'DEKİ YASAL DURUMU

¹Muzaffer KAHVECİ, Nazlı CAN²

¹ Selçuk Üniversitesi, Müh.Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Selçuklu - Konya

² Can Hukuk Bürosu, Faruk Ayanoğlu Cad., Can Apt. Kat: 1 No: 17/6 Feneryolu, Kadıköy-İstanbul

¹muzaffer.kahveci@hotmail.com, ²nzl_can@yahoo.com

(Geliş/Received: 05.04.2017; Kabul/Accepted in Revised Form: 09.08.2017)

ÖZ: İnsansız Hava Aracı (İHA); içinde pilotu ve yolcusu olmayan, sadece amaca uygun ekipman (video kamera, fotoğraf makinesi, GNSS, lazer tarama cihazı, vb.) taşıyan, uzaktan kumandalı ve/veya otomatik olarak görevini icra edebilen bir çeşit uçaktır. İHA'ların askeri, sivil (hobi ve ticari) ve bilimsel amaçlı profesyonel kullanımları ülkemizde ve tüm dünyada hızla artmakta, bu nedenle önümüzdeki yıllarda bu konunun daha fazla gündem oluşturacağı değerlendirilmektedir. Gün geçtikçe artan bu yoğun kullanımın temel nedenleri olarak; özellikle sivil amaçlı İHA'ların çok geniş kullanım alanlarının olması, birçok mesleki (örn. harita yapım amaçlı) kullanımlarda yüksek doğruluk, zaman ve maliyet tasarrufu sağlaması sayılabilir.

İHA'ların gerek profesyonel mesleki; gerekse hobi amaçlı olarak günlük yaşantımıza bu kadar çok girmiş olması bazı yasal sorunları da beraberinde getirmektedir. Henüz birçok ülkede bu konuda gerekli mevzuat ya hiç yoktur veya taslak halinde sürekli geliştirilmektedir. Diğer taraftan, İHA'ların kullanımındaki bazı potansiyel olumsuzluklardan dolayı, özellikle ABD Ulaştırma Bakanlığına bağlı Federal Havacılık Kurulu (FAA: Federal Aviation Administration), Birleşmiş Milletler'e bağlı Uluslararası Sivil Havacılık Organizasyonu (ICAO: International Civil Aviation Organization) ve Avrupa Hava Seyrüsefer Güvenliği Örgütü (EUROCONTROL) tarafından İHA kullanımının yasal çerçevesi konusunda kapsamlı çalışmalar yapılmaktadır. Türkiye'de ise bu konularla ilgili olarak Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı'na bağlı Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü tarafından bazı çalışmalar yürütülmektedir.

Bu makalenin amacı, İHA'ların sivil kullanım alanları, amaçları ile Türkiye ve Dünya'daki mevzuata ilişkin durum tespiti yaparak, önerilerde bulunmaktır. Askeri amaçlı İHA tanımı ve kullanımına ilişkin konular makale kapsamı dışında bırakılmıştır.

Anahtar Kelimeler: EUROCONTROL, FAA, GNSS, ICAO, İHA, SHGM

Unmanned Aerial Vehicles: History, Definition, Legal Status in Turkey and in the World

ABSTRACT: Unmanned Aerial Vehicle/System (UAV/UAS or drone) is a kind of plane which has neither a pilot nor passengers on board and only carries fit-for-purpose equipment such as video camera, camera, GNSS receiver, laser scanner, etc. UAV can be used either remotely controlled or autonomously. Military, civil (hobby and commercial) and scientific uses of UAVs have rapidly increased both in Turkey and in the world. Thus, it is anticipated that in near future this issue will be more frequently in the World's agenda. High accuracy, economy in time, cost and personnel in professional uses of UAVs such as in surveying can be considered to be some basic reasons of this increasing demand for UAV.

On the other hand, it is a fact that the intensive uses of UAVs in our daily life both for professional applications and hobby purposes have given rise to some legal issues together. Today, in many countries, there are either no regulations or some have been improved/updated as draft versions continuously. Due to

this fact, some comprehensive studies are being achieved related to the legal frames of using UAVs/drones by FAA (Federal Aviation Administration), ICAO (International Civil Aviation Organization) and EUROCONTROL. In Turkey, some preparations are being developed about UAV/drone issues by the Directorate General of Civil Aviation under the Ministry of Maritime, Transportation and Communication.

The main purpose of this paper is to give some brief information related to the civil uses of UAV/UAS/drones and their fields of use. And also to provide a comprehensive information on the current status of the legal frames and regulations in Turkey and in the World and accordingly to make some suggestions following the determination of the state of legal issues in many countries. On the other hand, military uses and regulations of UAV/UAS/drones have been excluded in this study.

Key Words: EUROCONTROL, FAA, GNSS, ICAO, UAV/UAS, SHGM

İNSANSIZ HAVA ARACI TANIMI, KULLANIM ALANLARI VE AMAÇLARI (DEFINITION OF UAVs, THEIR PURPOSES AND USES)

Küresel Hava Trafik Yönetimi Operasyonel Konsepti (The Global Air Traffic Management Operational Concept) Doc. 9854 uyarınca insansız hava aracı Şikago Konvansiyonu'nun 8. maddesinde düzenlenmiş olan ve içerisinde pilotu bulunmayan araçlar olarak tanımlanmaktadır. Başka bir ifadeyle ve en yalın tanımıyla İHA (UAV: Unmanned Aerial Vehicle); içinde pilot olmaksızın, GPS kontrollü ve otomatik olarak gidebilen hava aracı olarak tanımlanmaktadır (Dictionary.com, 2016). Günümüzde İHA'lar, yerde bulunan bir pilot tarafından gönderilerek uzaktan kumanda ile görev icra ettirilen veya önceden yapılan uçuş programı yüklenerek otomatik olarak uçurulan hava araçlarıdır. Bunlar için çok genel olarak; teknik özelliklerine göre (ağırlıklarına göre, yakıt/enerji kaynağına göre, kanat yapısına göre, otomatik veya uzaktan kumandalı olmasına göre, vb.) ve kullanım amaçlarına göre (askeri amaçlı (keşif, silah, saldırı vb.) ve sivil (hobi, bilimsel ve ticari)) iki ana sınıflandırma yapmak olanaklıdır. ICAO genelgesinde ise İHA'lar; otomatik ve uzaktan kumandalı olarak iki ana sınıfa ayrılmaktadır, (ICAO, 2011).

Uzaktan kumandalı hava araçlarının tarihsel geçmişi oldukça eskiye dayanmaktadır. 22 Ağustos 1849 yılında Avusturyalıların, içinde zaman fitilli bombalar bulunan 200 pilotsuz balonu Venedik (İtalya) şehrine göndermesi, hava saldırısında ilk İHA kullanımı olarak kabul edilmektedir. Gerçekte, bu bombalı balonların bir kısmı hedefler üzerinde patlarken, bir kısmının da rüzgârın etkisiyle geri dönüp Avusturya hatlarında patladığı da ifade edilmektedir. Diğer taraftan, insansız balonların askeri amaçlı kullanımı Amerika'da 1793 yılına dayanmakta olup, bu balonlar iç savaşta sadece keşif amaçlı olarak kullanılmışlardır, (Monash University, 2003). 1908 yılında Nisan ve Kasım ayları arasında en az yarısı Alman olan 25'ten fazla havacıyı taşıyan yaklaşık 10 Alman balonunun Fransa sınırını geçtiği ve Fransa'ya iniş yaptığı kaydedilmiştir. Bütün bu olayların etkisiyle 1910 yılında Paris Konferansı'nın düzenlenmesi yoluna gidilmiştir. Konferans somut adımların atılmamasına karşın hava hukukunun uluslararası platformda düzenlenmesine yönelik olarak ilk diplomatik çaba olması dolayısıyla tarihe geçmiştir, (Can, 2014).

İnsansız ilk uçak (Ruston Proctor Aerial Target) ise Birinci Dünya Savaşı'nın sonlarında (1916) tasarlanmış olup, ilk insansız kullanımı ise "uçan bombalar" olarak bilinen "Hewitt-Sperry" jiroskop kontrollü otomatik uçak ile gerçekleştirilmiştir. Daha sonra Kasım 1917 tarihinde "otomatik uçan uçak" ABD Silahlı Kuvvetleri'nin resmi uçağı olmuş, ilk uçuşunu 1918 yılında gerçekleştirmiş ancak Birinci Dünya Savaşı'nda kullanımı olanaklı olmamıştır, (Wikipedia.org, 2016).

İHA'larla ilgili çalışmalar İkinci Dünya Savaşı ve sonrasında da devam etmiş, Vietnam, Afganistan ve Irak Savaşları dahil günümüze kadar birçok askeri operasyonda kullanılmış ve halen de kullanılmaya devam etmektedirler. Özellikle İkinci Dünya Savaşı'ndan sonraki yoğun çalışmalar, "Cruise", "Harpoon" ve "Tomahawk" gibi füzelerin geliştirilmesinde önemli rol oynamıştır, (Keane ve diğ., 2013). Başka bir ifadeyle,

askeri amaçlı İHA pazarı hızla gelişmiş ve son yıllardaki birçok anlaşmazlıklarda İHA kullanımı çok başarılı sonuçlar vermiş ve diğer alanlarda kullanımlar için de güven kazanmıştır. Bunun sonucu olarak, sivil amaçlı uygulamalarda İHA kullanımı günlük yaşantımıza girmiştir ve bu alandaki gelişmeler her geçen gün artmaktadır. İHA'ların sivil amaçlı kullanım alanlarına örnek olarak; haritacılık (ortofoto ve sayısal yükseklik modeli oluşturma, hacim ve alan hesapları vb.), arama-kurtarma faaliyetleri, istihbarat ve güvenlik amaçlı kullanım, çevresel gözlemler, kirlilik tespiti, hava durumu izleme, yangın izleme, kıyı ve sahil şeridinin gözlenmesi, altyapıların (boru hatları, havaalanları, yollar, nehirler, barajlar vb.) gözlenmesi, tarımsal uygulamalar (hassas tarım uygulamaları ve ürün rekolte takibi), havadan suç mahali keşfi, kentsel dönüşüm çalışmaları, doğal afetlerin izlenmesi, arkeolojik çalışmalar, 3 boyutlu şehir modellerinin oluşturulması, vb. alanlar sayılabilir.

Bu kadar çok kullanım alanı olmasına karşın sivil amaçlı İHA pazarı henüz gelişmesini tamamlamamış olup, özellikle bununla ilgili sertifikalandırma ve mevzuat konuları ile sivil havacılık hava trafik yönetimindeki yerinin tanımlanarak olgunlaştırılıp, standart hale getirilmesiyle bu alanda çok daha önemli gelişmeler olacağı açıktır. Örneğin, dünyanın önemli sosyal medya platformlarından birisi olan "Facebook"da kısa bir süre önce dünyadaki internet erişiminin geliştirilebilmesi amacıyla Boeing 737 büyüklüğünde helyum balonları ile fırlatılacak olan İHA üzerinde çalıştıklarını açıklamıştır. Aquila adı verilen İHA'nın test uçuşlarına başlanıldığı haberleri basında yer almıştır, (USA Today, 2016).

Bilindiği gibi, devletler, endüstri sektörü ve vatandaşların her birisi coğrafi bilginin sağlayıcıları ve kullanıcılarıdır. Bunlar, coğrafi bilgiyi genelde eşzamanlı toplar, kullanır ve paylaşırlar. Bu nedenle, sadece bir sektöre yönelik olarak yapılacak yasal düzenleme veya politikaların diğer tüm mekansal ekosistemdeki etkisi düzenleme yapılan sektöre göre birkaç kat olabilir. AB Verilerin Korunması Mevzuatında (GDPR: General Data Protection Regulation), coğrafi konum bilgileri koruma altına alınmıştır. ABD Federal Ticaret Komisyonu ise karşı tarafın rızası olmadan şirketler tarafından elde edilen coğrafi konum bilgilerinin kullanımına karşı yasal yaptırımlar başlatmıştır. Bu bağlamda, tüm dünyada ülkelerin neredeyse tamamında İHA'larla veri toplanması konusunda farklı seviyelerde yasal düzenlemeler yapılmıştır, (EU Regulation, 2016).

İHA'lar uluslararası literatürde "drone" veya "UAV/UAS (Unmanned Aerial Vehicle/Systems)" olarak tanımlanmakta olup, belirli teknik özellikler dışında gerçekte aynı anlama gelmektedirler. Diğer taraftan, ilk versiyonları "drone" olarak bilinen ve bugünkü kadar yüksek teknik özelliklere sahip olmayan insansız hava araçları günümüze kadar genelde askeri amaçlı ve silah olarak kullanıldıklarından ve bu bağlamda toplumların hafızasında olumsuz bir imaja sahip olduklarından, günümüzde sivil sektörde daha çok UAV/UAS (İHA) isimleri kullanılmaktadır. Aradaki farklılığa teknik açıdan bakıldığında ise, "drone"; otomatik olarak gidebilen insansız hava veya deniz araçlarını ifade ederken, "UAV" ise insansız olarak uçabilen, motoru olan, kontrol edilebilen ve kendisi, "cruise" füzesi gibi bir silah olmayan uçağı ifade etmektedir. Bu tanım FAA tarafından biraz daha genişletilerek, UAS (Unmanned Aircraft/Aerial Systems) kısaltması kullanılmaya başlanmıştır. UAS tanımı, 25 kg altındaki pilotsuz olarak kullanılabilen küçük uçak ve ilgili bileşenlerini (yer kontrol istasyonu ve iletişim hattını) kapsamaktadır, (FAA DoT, 2015). Yukarıdaki tanımlardan da anlaşılacağı gibi "Drone" ile "UAV/UAS" aynı kavramları işaret etmektedir. Bu bağlamda "UAV/UAS" tanımı ise kendi içinde iki farklı sınıfa ayrılmaktadır. Bunlar; RPAS (Remotely Piloted Aircraft Systems/Uzaktan Kumandalı Uçak Sistemleri) ile "Autonomous (Otomatik) UAS". Bunlardan "RPAS" tanımında, yerdeki pilotun (operatör) uzaktan kumanda ile uçağı kontrol etmesi söz konusudur. RPAS kavramı içerisinde fırlatma rampası, komuta&kontrol bağlantıları gibi yardımcı ekipmanlar da dahildir. "Otomatik UAS" tanımında ise pilot müdahalesi söz konusu olmayıp, tamamen bilgisayar kontrollü tam otomatik kullanım söz konusudur. Netice olarak; "Drone", "UAV/UAS" ve "RPAS" terimleri kullanıcılar tarafından büyük oranda eş anlamlı kullanılmakta ve uluslararası kullanımda aralarında kesin çizgiler bulunmamaktadır. Bununla birlikte, mevzuat söz konusu olduğunda, "Otomatik UAS" kullanımı AB dahil hemen hemen tüm ülkelerde yasak olduğu için İHA tanımı dışında tutulmaktadır. Günümüzde bu konuda

herhangi bir mevzuat çalışması da bulunmamaktadır.

İHA denilince sadece havada uçan uçak anlaşılmalıdır. Bu bağlamda İHA'lar temel olarak üç bileşenden oluşmakta olup bunlar; uçağın kendisi, uçaktaki faydalı yük (payload) ve yer kontrol istasyonudur. Uçağın kendisi; uçak gövdesi, uçak motoru (elektrikli veya yakıtlı), uçuş planlama ve kontrol sistemi (PC), navigasyon sistemi (GNSS) ve çarpışma güvenlik sisteminden oluşmaktadır. Uçak faydalı yükü olarak; kameralar, fotoğraf makineleri ve lazer tarayıcılar, termal görüntüleme sistemleri, radarlar, meteorolojik sensörler ve silah sistemleri olabilmektedir.

Sonuç olarak, İHA'lar özellikle son yıllarda tüm sektörlerde büyük ilgi görmüş olup, kullanım alanları her geçen gün artmaktadır. Yapılan araştırmalara göre tüm dünyada 2015-2025 yılları arası için tahmin edilen İHA'ların toplam pazar payı yaklaşık 90 milyar dolardır, (SDI, 2015). Bu da yıllık olarak yaklaşık 10 milyar dolarlık bir pazar anlamına gelmektedir. Ancak, bu kadar büyük bir pazara rağmen konuya ilişkin mevzuat çalışmaları ihtiyaçlara cevap verecek seviyede henüz tamamlanmış değildir.

DÜNYADA VE TÜRKİYE'DE YASAL DURUM (LEGAL STATUS IN TURKEY AND IN THE WORLD)

Amerika Birleşik Devletleri'nde Durum (Status in USA)

ABD'nin "Hava sahasının kullanımı ve egemenlik hakkı" konulu mevzuatına göre (GPO, 2011), ABD hava sahası ABD Hükümeti egemenliğindedir ve ABD vatandaşları uçakları açık hava sahasını kullanma hakkına sahiptirler. Uçakların açık hava sahasındaki trafiğin kontrolü ile hava sahasında uçan uçakların kullanım ve güvenliğine ilişkin mevzuat yapma yetkisi ise ABD Ulaştırma Bakanlığı'na bağlı Federal Havacılık Kurulu (FAA: Federal Aviation Administration)'na verilmiştir. Bu bağlamda, küçük İHA'ların kullanımı ve sertifikalandırılması işlemleri 2012 tarihli "FAA Modernizasyon ve Reform Kanunu"nda tanımlanmıştır, (GPO1, 2012). Bu Kanunun ilgili maddelerine göre Ulaştırma Bakanlığı, belirli İHA'ların ulusal hava sahasında güvenli bir şekilde kullanılıp kullanılmayacağını belirleme yetkisine sahiptir.

İHA mevzuatıyla ilgili olarak ABD'de zaman içerisinde çok sayıda güncellemeler yapılmıştır. Bu arada da eyaletler ve yerel mahkemeler tarafından bu konularda çok sayıda kısıtlamalar getirilmeye başlanmıştır. 2015 yılında yaklaşık 45 eyalet tarafından İHA'lar konusunda kısıtlamalara gidilmiştir. Bu bağlamda; uçuş güvenliğinin sağlanması, insanların ve mülklerinin güvenliği için İHA konusunda mevzuat yapma ve uygulama yetkisine sahip olan FAA tarafından 17 Aralık 2015 tarihli "İHA'lara İlişkin Ülke ve Yerel Mevzuat" belgesi yayımlanmıştır, (FAA, 2015). Yukarıda bahsedilen söz konusu mahkeme kararlarına bazı örnekler aşağıda kısaca verilmiştir:

a. 26 Temmuz 2015 tarihinde yerden yaklaşık 200 feet (61 m) yukarıda G sınıfı hava sahasında üzerinde kamera vb. teçhizatı bulunan İHA'yı uçuran bir kişinin insansız hava aracı William H. Merideth tarafından vurulmuştur. Bunun üzerine söz konusu İHA sahibi zararlarının tazmini amacıyla bu kişiye karşı dava açmıştır ve zarar gören İHA'sı için 1500 ABD Dolarlık bir tazminat talep etmiştir. Davalı İHA'nın kendisine ait bir mülkün üzerinde uçtuğunu iddia ederek vurduğu için tazminat talebinin reddini talep etmiştir. Yerel mahkeme davalının evinin yakınında uçuş yapan İHA'nın vurulması ile ilgili olarak davacının taleplerini reddetmiştir. Gerekçe olarak ise birden fazla kez bir başkasına ait alanın üzerinden geçiş yapan İHA'nın özel hayatın gizliliğine müdahale etmesi olduğu gösterilmiş ve bu nedenle de davalının söz konusu İHA'yı vurma hakkı olduğu yönünde hüküm tesis edilmiştir, (The Verge, 2015).

b. Ağustos 2000'de kayıp insanların bulunması amacıyla gönüllüler tarafından oluşturulmuş olan Texas EquuSearch arama kurtarma grubu (Bundan böyle "Equus" olarak anılacaktır.) aramalar için İHA kullanması dolayısıyla FAA tarafından e-posta ile uyarılmıştır ve İHA kullanımlarının sonlandırılması istenilmiştir. Equus FAA'ya karşı Nisan 2014'te dava açmıştır. Federal mahkeme Temmuz ayında e-posta ile

gönderilmiş olan İHA kullanımının sonlandırılması yönündeki ihtarin FAA'nın söz konusu topluluğun kural ihlali yaptığına müteallik nihai kararı telakki edilebilecek bir resmi yazı olmadığı dolayısıyla FAA aleyhine karar vermiştir, (Dronelife.com1, 2015).

c. Raphael Pirker isimli ticari İHA videografikeri 2011 yılında bir reklam ajansı ile Virginia Üniversitesi'nin kampüsünü çekmek üzere anlaşmıştır. FAA 2011 bunun üzerine üniversite kampüsü üzerinden İHA ile uçan ve görüntü kaydeden Pirker'a "yerdeki kişileri tehlikeye attığı" ve söz konusu eylemin de dikkatsiz operasyonlarla ilgili FAR bölüm 91.3. altında yer aldığı gerekçesiyle 10.000 ABD Doları tutarında para cezası vermiştir. Pirker söz konusu idari para cezasına itiraz etmiştir. Mart 2014'de idari mahkeme Pirker'in uçurduğu Ritewing Zephyr tipi model uçaklar için uygulanabilecek herhangi bir FAA kuralı olmadığına karar vermiştir. FAA ise karara karşı Amerikan Ulusal Ulaştırma Emniyet Dairesi'ne (NTSB) mahkemenin kararının hatalı olduğu ve FAA'nın model uçaklar dahil tüm uçak tipleri ile ilgili olarak düzenleme yapma yetkisinin olduğu iddiası ile başvurmuştur. FAA; hobi amaçlı model uçak uçuranların 400 feetin altındaki uçuşları ile ilgili düzenlemelerinin olduğunu ancak Pirker'inki gibi ticari uçuşlarda daha kapsamlı kurallar oluşturuluncaya kadar bunların yasak olduğunu iddia etmiştir, (USA Today, 2014). Kasım 2014'te ilk derece mahkemesinin kararı bozulmuştur. Şöyle ki; ilgili düzenlemenin (Bölüm 61) FAA'ya havada uçmak için tasarlanmış olan veya kullanılan (uçurtma, model uçak veya Gulfstream 650 olması fark etmeksizin) tüm araçlarla ilgili yetki verdiği bunda da hava aracının insanlı ya da insansız olmasının gözetilmediği değerlendirilmesi yapılmıştır. Nihayetinde FAA'nın talebi uygun görülerek ilk derece mahkemesinin kararının bozulmasına ve Pirker'e 10.000 ABD Doları tutarında para cezası verilmesine karar verilmiştir. Ocak 2015'te Pirker ve FAA 1000 ABD Dolarlık bir ödeme yapılmasında uzlaşmışlardır. Tarafların vardığı mutabakata göre FAA Pirker hakkındaki talep ve iddialarından vazgeçecektir ve işbu 1000 ABD Dolarlık ödeme de Pirker'in aleyhindeki iddiaların kabulü anlamına gelmeyecektir, (Esler, 2015).

d. Temmuz 2014'te George Washington köprüsü üzerinde New York Polis Departmanı'na ait helikopter ile çarpışmak üzere olan İHA'ların sahipleri hakkında dava açılmıştır. Saat 12.15 sıralarında devriye gezen havacılık birimi helikopteri polisin iddialarına göre küçük İHA'nın kendi üzerlerine gelmesi dolayısıyla çarpışmamak için manevra yapmak zorunda kalmıştır. Bunun üzerine İHA'nın sahipleri olan 23 yaşındaki Remy Castro ve 34 yaşındaki Wilkins Mendoza yakalanmıştır, (Nypost.com1, 2014), (Ancak daha sonradan hava trafik kontrol kayıtlarından polislerin özellikle İHA'ya doğru uçtukları çıkmıştır.) Haklarında New York Polis Departmanı helikopterine çok yakın uçtukları gerekçesiyle ihmalle tehlike yarattıkları iddiasıyla cezai takibat başlatılan şüpheliler hakkında Manhattan savcılarını takipsizlik kararı vermiştir. Olayla ilgili idari bir yaptırım olup olmamasına ayrıca karar verilecektir, (Nypost.com2, 2014).

Küçük İHA'ların Kullanımı ve Sertifikalandırılması işlemlerine ilişkin FAA tarafından 2015 yılında hazırlanmış olan son mevzuat güncellemelerine (FAA, 2015) göre, ağırlığı 25 kg.ın altındaki İHA'lar "Küçük İHA" olarak tanımlanmakta ve bunların olası kullanım alanları şu şekilde sıralanmaktadır: tarımsal ürün izleme ve inceleme, araştırma-geliştirme faaliyetleri, eğitim amaçlı kullanımlar, dağlık arazide boru hattı veya yüksek gerilim hattı incelemeleri, anten kurulum yeri incelemeleri, çığ düşmesi sonucu kurtarma hareketlerine yardımcı olmak üzere mağdurların yerlerini belirlenmesi, köprü incelemeleri, hava fotoğrafı çekimi, vb.

Küçük İHA'ların ulusal hava sahası içerisinde sivil amaçlı kullanımına ilişkin düzenlemeleri içeren ve FAA tarafından 14 numaralı Federal Mevzuata (14 CFR) yeni ilave olarak eklenmiş 107 numaralı bölümde küçük İHA kullanımına getirilmiş bazı önemli kısıtlamalar aşağıda sıralanmıştır:

- Ağırlığı 25 kg.ı geçmeyecek,
- İHA'yı kullanan pilotun görüş alanı içerisinde olacak ve bu sınır geçilmeyecek,
- İHA, cihazı kullananlar dışında doğrudan ilgisi olmayan hiçbir insan üzerinde uçurulmayacak,

- d. Sadece gündüz saatlerinde kullanılacak (resmi güneş doğuş ve batış saatleri arasında),
- e. İnsanlı veya insansız diğer uçaklara yol hakkı verecek,
- f. Havadaki azami hızı 160 km/saat'i (87 knots) geçmeyecek,
- g. Yerden olan azami yüksekliği 152 metreyi geçmeyecek,
- h. Yer kontrol istasyonundan olan azami uzaklık 5 km'yi geçmeyecektir.

Aynı mevzuatta pilot sertifikasına ilişkin olarak; başlangıçta FAA-onaylı bir merkezde havacılık test sınavından geçmiş olması, Ulaştırma Güvenlik İdaresi tarafından muayene edilmiş olması, küçük İHA pilot sertifikası alması, her 24 ayda bir havacılık bilgisi testine tabi tutulması, en az 17 yaşında olması, kaza sonrası herhangi bir yaralanma ve zarar durumunu 10 gün içinde FAA'ya raporlaması vb. zorunluluklar getirilmiştir.

Diğer taraftan, ilgili kanunun 336'ncı bölümünde yazılı kriterleri sağlaması durumunda yukarıda (107 numaralı bölüm) yazılı kısıtlamaların model uçaklar için geçerli olmayacağı da ifade edilmiştir, (GPO2, 2012). Çünkü model uçak, ilgili kanunda "kullanıcının görüş mesafesinde, hobi ve eğlence amaçlı uçurulan uçak" olarak tanımlanmaktadır. Bununla birlikte model uçaklar da 25 kg ağırlığın altında olduğundan gerçekte doğrudan (section 336 of Public Law 112-95) kapsamına girmektedir. Bunun önüne geçmek için söz konusu kanunda model uçaklarla ilgili olarak FAA kurallarının geçerli olmasını engelleyici aşağıdaki kısıtlamalar konmuştur:

- a. Model uçak sadece hobi ve eğlence amaçlı uçurulacaktır,
- b. Model uçak, ülke çapında toplum tabanlı organizasyon tarafından oluşturulmuş program kapsamında ve toplum tabanlı güvenlik tedbirlerine uygun olarak uçurulacaktır,
- c. Model uçak, 25 kg.ın altında ağırlığa sahip olacaktır,
- d. Model uçak, insanlı hava araçlarına zarar vermeyecek ve onları engellemeyecek durumda kullanılmalıdır,
- e. Herhangi bir hava alanına 8 km yakın alan içerisinde uçuş yapılacaksa, havaalanı yetkilileri ve uçuş kontrol kulesi yetkilileri önceden bilgilendirilecektir.

Küçük İHA'ların kullanımına ilave olarak, ABD'de, Kanada Ulaştırma Bakanlığı tarafından uygulanan İHA mevzuatında yer alan "mikro İHA" tanım ve kısıtlamalarını da ilgili mevzuata eklenmiştir. Buna göre; küçük ve mikro İHA'larla ilgili Kanada ve ABD FAA tarafından uygulanan bazı örnek kısıtlamalar Tablo-1'de verilmiştir.

14 Aralık 2015 tarihinde kamuoyuna duyurulan FAA düzenlemesi kapsamında yeni İHA kayıt koşulları açıklanmış olup, buna göre hobi amaçlı olmayan yaklaşık 250 gr.dan ağır ve 25 kg.dan hafif tüm İHA'ların üzerlerindeki kamera gibi faydalı yükler dahil kayıt zorunluluğu getirilmiştir, (Federal Register, 2015). Söz konusu kayıt işlemi yasal bir zorunluluk olup, bu işlemlerin yapılması kanun yürürlük tarihinden önce İHA sahibi olanları da kapsamaktadır ve 3 yılda bir yenilenmelidir. Kanada'da ise 2 kg. altındaki İHA'lar için kayıt zorunluluğu bulunmamaktadır. Ayrıca, küçük ve mikro İHA'lar için sadece gündüz ve görüş mesafesindeki kullanım zorunluluğuna ilave olarak yukarıdaki tablodan da görüleceği gibi uçuş yüksekliği sınırlamaları, pilot sertifika zorunluluğu, İHA kaydı gibi kısıtlamalar devam etmektedir. Ancak, bu kısıtlamalar hobi amaçlı kullanılan model İHA'lar için geçerli olmamakla birlikte, bu tür İHA kullananlar 112-95 sayılı Kanunun 336 numaralı bölümünde (Sec. 336 of PublicLaw 112-95)yazılı tüm kriterleri sağlamakla yükümlüdürler.

Tablo 1. ABD ve Kanada İHA mevzuatı tanım ve kısıtlamaları*Table 1. Definitions and limitations of UAV regulations in USA and Canada*

Kısıtlama Adı	Kanada Mevzuatı	ABD Küçük İHA	ABD Mikro İHA
Ağırlık	2 kg.a kadar	25 kg.a kadar	2 kg.a kadar
Yerden azami uçuş yüksekliği	91 m.	152 m.	122 m.
İnsanlardan ve binalardan uzaklık	30 metre (yatay doğrultuda)	Uçuşla ilgili olmayan insanlara yaklaşmak yasak.	Uçuşla ilgili olmayan insanlara yaklaşmak yasak.
Otomatik kullanım izni	Hayır	Evet	Hayır
Havacılık bilgisi gereksinimi	Evet (Okul eğitimi)	Evet (sınav)	Evet (kendi sorumluluğunda)
Pilot eğitimi zorunluluğu	Evet (Okul)	Hayır	Hayır
Pilot sertifikası zorunluluğu	Hayır	Evet	Evet
Sorumluluk sigortası	Evet (100.000 Kanada Doları)	Hayır	Hayır
Sadece gündüz kullanım izni	Evet	Evet	Evet
Kırılabilir malzeme kullanımı	Hayır	Hayır	Evet (kağıt, tahta, köpük, kırılabilir plastik olabilir)

Diğer taraftan, İHA teknolojilerindeki hızlı gelişmeler ve kullanıcılardan gelen yoğun mevzuat değişiklik talepleri sonucu FAA konuyla ilgili mevcut mevzuatı gözden geçirme ihtiyacı hissetmiş ve bu bağlamda "Mikro İHA"larla ilgili bir rapor yayımlamıştır, (ARC, 2016). Söz konusu raporda, insanlar üzerinde uçurulan İHA'ların sınıflandırılmasında performansa dayalı tavsiyelerde bulunmaktadır. Buna göre: kategori 1'de yer alan İHA'lar, üzerindeki tüm yükler (aksesuar/faydalı yük, fotoğraf makinesi vb.) dahil 250 gr.1 geçmiyorsa insanlar üzerinde hiçbir kısıtlama olmaksızın uçurulabilecektir. Kategoriler 2,3 ve 4 içinde değerlendirilen İHA'lar için eğer üretici firma bunların her bir kategori için belirlenmiş olan çarpma enerjisi (impact energy) eşik değerini geçmediğini genel kabul görmüş endüstriyel test yöntemleriyle FAA'ya belgelemesi durumunda, bu İHA'lar insanlar üzerinde bazı kısıtlamalar dahilinde uçurulabileceklerdir. Örneğin, kategori 2 içinde yer alan ve 250 gr.dan ağır olan İHA'ların insanlar üzerinde kullanılabilmesi için bunların insanların en az 20 feet (6 m) üzerinde veya yatay olarak insanlardan en az 10 feet (3 m) uzaklıkta uçurulması gerekmektedir.

Söz konusu kısıtlamalar ve kurallar özellikle ticari amaçlı İHA kullanımında sıkıntılara yol açtığından, son FAA çalışmaları ve raporları sonrasında ABD hava sahasında ticari amaçlı kullanılmakta olan "küçük UAS" kavramı mevcut FAA kısıtlamaları kapsamında farklı uygulamalara tabi olmaya başlamıştır. Bu farklılıklardan en önemlisi ticari amaçlı "küçük İHA" pilotları için artık FAA Pilot Sertifikası yerine "İHA Pilot Sertifikası (UAS Operator's Certificate)" aranacaktır. Tüm bu çalışmalar sonucunda ortaya çıkan yeni kuralların dikkat çekici olan bazıları aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

İHA Pilotları açısından:

- En az 17 yaşında olmalı,
- FAA onaylı bir test merkezinde yapılacak havacılık (aeronautical) testinde başarılı olunmalı ve bu her 24 ayda bir yenilenmeli,
- TSA (Transportation Security Administration) tarafından muayene edilmeli,
- Küçük İHA sınıflamasına uygun bir "İHA pilotu sertifikası" almalıdır.

İHA kullanımı açısından:

- İHA 25 kg.dan hafif olmalıdır,
- İHA'yı kullanan pilot ile İHA arasında doğrudan görüş daima muhafaza edilmeli (VLOS; Visual line of sight),
- İHA ile ilgili olmayan insanların üzerinde uçurulmamalı,
- Sadece gündüz uçuş yapılmalı,
- Azami hava hızı 160 km/h olmalı,
- Yerden azami yüksekliği 152 m olmalı,
- Kontrol noktasından olan en az görüş mesafesi 4.8. km olmalı,
- Aynı anda birden fazla İHA uçurulmamalı,
- Dikkatsiz ve hatalı kullanım olmamalı
- B, C, D ve E sınıfı hava sahalarında ATC (Air Traffic Control) izni alınmalıdır.

ABD Silahlı Kuvvetleri kullanımı için FAA tarafından özel kurallar konmuş olup, bu kurallara göre askeri İHA pilotları askeri uçuş deneyimlerine göre ve askeri bilgi sınavından geçerek sertifikalandırılmaktadırlar.

Avrupa Birliğinde Durum (Status in EU)

Avrupa Birliği'nde İHA ile ilgili hukuki düzenlemelerden bahsetmeden önce konunun AB için öneminden söz edecek olursak; Avrupa Parlamentosu Araştırma Servisi (European Parliamentary Research Service)'nin Ekim 2015 tarihli raporuna göre İHA'lar önümüzdeki 10 yıl içinde AB havacılık pazarının %10'una sahip olacaktır. Avrupa Komisyonu'na göre İHA endüstrisi AB içinde 150000 kişiye istihdam sağlayacaktır, (Juul, 2015).

Tüm dünyada olduğu gibi Avrupa'da da İHA kullanımı her geçen gün daha da artmakta, ancak düşünülen aksine bu konuda tüm Avrupa Birliği üyesi ülkeleri kapsayan standart ve ortak bir mevzuat bulunmamaktadır. Başka bir ifadeyle, fiili olarak hemen her ülke kendi hazırlamış olduğu ulusal mevzuatını kullanmaktadır. Bu konudaki boşluğu gören Avrupa Komisyonu, ilgili kurumlara İHA'ların kullanımını düzenleyen yeni standartların oluşturulması çağrısında bulunmuştur. Bu standartlar özetle; güvenlik, gizlilik, verinin korunması, sigorta ve sorumluluk konularını kapsamaktadır. Bu bağlamda, 31 Temmuz 2015 günü Avrupa Havacılık Güvenliği Ajansı (EASA: European Aviation Safety Agency) tarafından müzakere süreci başlatılmış ve buna dayalı olarak "A-NPA (Advanced Notice of Proposed Amendment 2015-10)" dokümanı oluşturulmuştur. Söz konusu müzakere süreci Eylül 2015 ayı içerisinde tamamlanmıştır ve bu sürecin somut çıktısı - aşağıda kısaca ifade edilen "Teknik Fikirler" adında tüm İHA'larla ilgili tatbik edilebilecek 27 somut teklifi içeren bir belge - olmuştur. EASA tarafından Avrupa Hava Sahası'nda İHA'ların kullanımı ile ilgili olarak, 18 Aralık 2015 tarihli "İHA'ların Çalışması için Düzenleyici Yapıya Giriş" isimli bir teknik not yayımlanmıştır, (EASA, 2015). Söz konusu teknik not, EASA üyesi ülkeler ve havacılık sektöründeki diğer Avrupalı paydaşlar (İHA üreticileri ve kullanıcıları) için İHA'ların kullanımına ilişkin olarak Avrupa Komisyonu tarafından başlatılmış, (A-NPA, 2015-10)'da verilen taslak mevzuatına bilgi

desteği sağlamaktadır. Bunların dışında, Avrupa Hava Seyrüsefer Güvenliği Örgütü'nün (EUROCONTROL) İHA konusundaki çalışmaları ICAO gibi diğer uluslararası kurum ve kuruluşlarla ortak olarak halen devam etmektedir. 22 Ağustos 2016'da da İnsansız Hava Araçlarının Operasyonları ile ilgili düzenleme taslağı EASA tarafından oluşturulmuş ve yayımlanmıştır. EASA'nın güncel görüşünü ifade etmekle beraber söz konusu düzenleme taslağı EASA ya da Avrupa Komisyonu adına herhangi bir resmi taahhüt anlamına gelmemektedir. Söz konusu taslak içerisinde İHA operasyonları ile ilgili taslak Komisyon Düzenlemesi de yer almaktadır. Taslak düzenleme uyarınca İHA operasyonları risk bazlı olarak "open-açık", "specific-özel" ve "certified – sertifikalı" olarak üç sınıfa ayrılmıştır. Bunlardan oluşabilecek risk dolayısıyla yetkili otoritelerce sertifikalandırmaya tabi olan "sertifikalı-certified" İHA operasyonları taslak düzenleme dışında tutulmuştur. Akit devletlerin İHA operasyonları ile ilgili kurumları yetkilendirmeleri, söz konusu kurumların yetki ve sorumlulukları, operasyonun türüne göre hava sahasının sınırlanması, emniyet v.b. konularda hükümler ihtiva eden taslakta güvenlik, gizlilik, veri koruması ve sigorta ile ilgili hükümler ise söz konusu konuların doğrudan doğruya AB mevzuatında veya ulusal mevzuatlarda yer alması dolayısıyla detaylı olarak tanzim edilmemiştir. Taslak düzenlemenin iki de eki bulunmaktadır.

EASA ve FAA kuralları karşılaştırıldığında birbirlerinden oldukça farklı oldukları görülmektedir. Örneğin, FAA kuralları doğrudan ve tartışmasız bir uygulamayı hedeflerken, EASA konuya daha çok usul perspektifinden yaklaşmakta ve tüm paydaşları sürece dahil etmeye çalışmaktadır. Nihai İHA kuralları FAA tarafından 2015 yılı sonunda tamamlanmış olup, bu bağlamda web-tabanlı kayıt işlemleri Aralık 2015 ayı içerisinde başlatılmıştır. Oysa, EASA'da süreç daha yavaş işlemektedir. Avrupa, İHA konusunda henüz taslak mevzuat çalışması aşamasında bulunmaktadır. Bunun en temel nedeni ise EASA'nın, teknolojik yapı ve ağırlığı ön planda tutan FAA'nın aksine risk değerlendirmesini ön planda tutmasından kaynaklanmaktadır. Tüm bunlara ilave olarak, birçok Avrupa ülkesi, uluslararası yayımlanmış diğer mevzuatlara da bakarak, kendi iç İHA mevzuatını yürürlüğe sokmuş bulunmaktadır. Dolayısıyla, tüm bu ülkelerin mevcut mevzuatlarının ortak bir AB/EASA mevzuatı çatısı altına alınması uzun bir müzakere süreci anlamına gelmektedir. Buna bazı Avrupa ülkelerinden örnekler verilecek olursa, Almanya'da 500 gr. üzerinde ağırlığı olan her İHA'ya kayıt zorunluluğu getirilmiştir. Hollanda'da pilot lisansı alma zorunluluğu mevcut olup, İspanya'da İHA Uçuş Okullarına yetki verilmiş, Fransa'da ise ülke hava sahası üzerinde uçurulacak tüm İHA'lar için "Tip Sertifika" zorunluluğu getirilmiştir.

Yukarıda belirtilen gelişmelere ilave olarak 5-6 Mart 2015'te Riga (Letonya)'da Avrupa havacılık camiası bir araya gelerek İHA'larla ilgili aşağıda verilen ilkeleri kabul etmiştir, (Europarl, 2015):

- İHA'lar yeni bir tür hava aracı olarak telakki edilmeli ve her bir operasyonun riski ile orantılı olarak mevzuat düzenlenmesi yapılmalı
- AB seviyesinde İHA'larla ilgili emniyet kuralları acilen geliştirilmeli
- AB havacılık sistemine İHA'ların entegre edilebilmesi için gerekli teknoloji ve standartlara kamu otoriteleri ile endüstri yatırım yapmalı
- İHA hizmetleri ile ilgili kamuoyu kabulü önemlidir. Gizlilik ve kişisel verilerin korunması garanti edilmelidir.
- İHA operatörü İHA'nın kullanımından sorumludur. Bu kişinin tanımı mümkün olmalıdır. (ID çipi vs. vasıtasıyla).

Netice olarak Avrupa havacılık otoriteleri bağlamında Avrupa hava sahasında İHA kullanımı kanunla belirlenmiş belirli koşullar altında kullanılabilir. Buna göre, Avrupa Ülkelerinde İHA kullanan bir kişi hava sahasının fiili kullanıcısı durumuna gelmektedir. Oysa, hava sahası kullanımı bazı kurallara tabidir. Bu nedenle, İHA kullanıcısı kendi ülkesinde yürürlükte olan İHA mevzuatına uymak zorundadır. Bu bağlamda, İHA'ların kendi ülkesi dışındaki ülkelerde de sorunsuz olarak kullanılabilmesinin önünü açmak için EUROCONTROL tarafından "İHA Pasaportu (RPAS Passport/Remotely Piloted Aircraft Systems

Passport)" oluşturulması önerilmiştir (EC, 2016). Buna göre, ülkeler arasında karşılıklı hukuksal, teknik ve operasyonel anlaşmalar yapılarak, İHA'ların farklı ülke hava sahalarında, ilgili ülkenin mevzuatına uyarak, sorunsuz olarak kullanılması hedeflenmektedir.

İHA'larla ilgili AB'de verilmiş bazı emsal kararlara bakılacak olursa; A.B.D.'deki kadar çok örnek olmamakla beraber İHA'larla ilgili olarak özellikle özel hayatın gizliliği kaygısı ile verilmiş emsal kararlar mevcuttur. Bunlara ilişkin bazı örnekler aşağıda verilmektedir:

Çek Cumhuriyeti vatandaşı olan bir gazetecinin evindeki CCTV sisteminin veri koruma direktiflerine aykırı olduğu yönünde Prag mahkemesinin vermiş olduğu karara itiraz etmesi üzerine Çek Cumhuriyeti tarafından ihtilaf Avrupa Adalet Divanı'na intikal ettirilmiştir. Neticesinde Çek vatandaşı gazetecinin kamerasının evinin dışındaki kamu alanlarını ve buradaki insanları da görüntüleyebildiği için bireylerin video kayıtlarının kısmen dahi olsa kamusal alanda olması halinde AB'nin Veri Koruma Direktifleri'ne uyumlu olması yönünde karar verilmiştir. Doğrudan doğruya İHA'larla ilgili olmamakla beraber bu karar İHA'lar için de uygulanabilecektir. Dolayısıyla medya kuruluşları, inşaat firmaları, polis İHA'larla görüntüleme yaparken A.B. Veri Koruma Direktifleri'ne uyumlu olarak hareket etmelidir, (Out-law.com, 2014).

İngiltere'de Durum (Status in UK)

İngiltere'de insansız hava araçları ile ilgili olarak küçük insansız hava araçları ile diğer araçlar arasında düzenlemeler açısından farklılıklar vardır. Küçük İHA'larla ilgili olarak Hava Seyrüsefer Düzenlemesi (Air Navigation Order) uyarınca küçük İHA balon veya uçurtma haricinde yakıtsız ve fakat üzerine yerleştirilmiş her türlü teçhizat dahil ağırlığı 20 kg.'dan daha fazla olmayan her türlü İHA'yı ifade etmektedir. Küçük İHA kullanıcıları açısından söz konusu düzenlemenin 94. maddesi uyarınca uyulması gereken kurallar şu şekildedir:

- İnsanları veya mülkleri tehlikeye atacak şekilde herhangi bir cisim veya hayvanın (paraşüte bağlı olup olmadığına bakılmaksızın) atılmasına sebebiyet veya izin verilmeyecektir.
- Küçük İHA'dan sorumlu kişi hava aracının emniyetli bir şekilde uçuş gerçekleştirebileceğine dair makul düzeyde kanaat getirirse hava aracını uçurabilir.
- Küçük İHA'dan sorumlu kişi hava aracının diğer hava araçları, kişiler, vasıtalar, gemilerle veya yapılarla ilintili olarak uçuş güzergahını çarpışmalardan kaçınabilme amacıyla gözlemleyebilmek için hava aracı ile doğrudan yardımsız görsel temas sağlamak zorundadır.
- Uçuş başlangıcı itibarıyla yakıtı hariç ancak içine kurulu veya üzerine bağlanmış her türlü parça veya teçhizat dahil ağırlığı 7 kg'dan daha ağır olan küçük İHA'dan sorumlu kişi hava aracını aşağıda yazılı durumlarda uçurmayacaktır:

- İlgili hava trafik kontrol ünitesinden alınmış bir izin olmadıkça A,C,D veya E sınıfı hava sahalarında;
- İlgili hava trafik ünitesinden alınmış herhangi bir izin yoksa; ilgili meydan trafik bölgesinde, (eğer varsa) hava trafik ünitesinin takip etme bildirimini yapıldığı saatler için tanımlanmış hava trafik kuşağında.
- Alt paragraf (a) veya (b) de tanımlanan hava sahasında ve bu hava sahasının gereklerine uygun şekilde uçuşması hali haricinde yüzeyden 400 feetin (122 m) üzerinde bir irtifada.

- Sivil havacılık otoritesinden alınmış bir izne uygun olarak gerçekleştirilmesi haricinde küçük İHA'dan sorumlu kişi hava aracını ticari operasyonlar gerçekleştirmek amacıyla uçuramaz, (UK CAA1, 2016).

Her nevi gözetleme veya veri toplama imkanına sahip küçük insansız hava araçları ise ayrıca "küçük

insansız gözetleme hava araçları” olarak tanımlanmıştır ve ayrı bir madde içerisinde düzenlenmiştir. 20 kg.'dan ağır olan insansız hava araçları ise her ne kadar sivil havacılık otoritesi tarafından bazı yükümlülüklerden muaf tutulmuşlarsa da küçük insansız hava araçlarından farklı olarak tüm İngiliz Havacılık düzenlemelerine tabidir. 150 kg.'dan ağır olan insansız hava araçları için ise EASA tarafından belirlenmiş olan ek sertifikalandırmaların yapılması gerekmektedir.

Mevcut düzenlemelerine göre İngiltere'de büyük İHA'ların ayrılmamış hava sahalarında sivil havacılık otoritesinden alınmış özel izin olmaksızın uçmaları yasaktır. Her ne kadar şu anda büyük araçların test işlemleri gerçekleştiriliyor olsa da; bu testler diğer hava sahası kullanıcılarından ayrılmış olan hava sahalarında yapılmaktadır, (UK CAA2, 2016). Nisan 2014'te Robert Knowles İHA'yı tehlikeli uçurmak dolayısıyla hüküm giyen ilk kişi olmuştur. Söz konusu kişi Walney Kanalı'nın üzerindeki Jubilee Köprüsü'nün 50 metre üzerinde ve nükleer tesis ile BAE Systems denizaltı test tesisi üzerinde İHA uçurduğu için mahkeme tarafından para cezası ile cezalandırılmıştır. Knowles'un 800 Sterlin ile cezalandırılmasına ve 3500 Sterlin'lik masrafları da ödemesine karar verilmiştir. Knowles'dan sonra da yine başkaca İHA kullanıcıları hakkında güvenliği tehlikeye attıkları gerekçesiyle verilmiş olan cezalar mevcuttur, (The Guardian, 2014).

Çin'de Durum (Status in China)

Çin'de İHA endüstrisi hızla gelişmiştir. Ülke çapında üretim ve satış rakamının önümüzdeki 10 yıl içinde 100 milyar Yen'i yani 15 milyar ABD Doları'nı geçmesi beklenen İHA'larla ilgili gelişmelerle beraber doğal olarak uygulamadan kaynaklı sorunlar da baş göstermiştir, (CriEnglish.com, 2016). Örneğin, Ocak 2016'da Sichuan'ın güneybatısındaki Deyang'da İHA'nın enerji nakil hatlarına çarpması neticesinde Sichuan'da elektrik kesintisi olmuştur ve sorun 6 saatte çözümlenebilmiştir. Yine Çin'de gerçekleşen bir diğer olayda Çin Hava Kuvvetleri Pekin'de uçuşları tehir ettirdiği ve güvenlik alarmını tetiklediği gerekçesiyle 2014'te bir İHA'yı vurmuşlardır, (Allianz, 2016).

Bu gibi olaylarla beraber İHA'ların yaygın kullanımından kaynaklı Çin vatandaşlarının özellikle emniyet, mahremiyet ve ulusal güvenlik ile ilgili kaygıları da artmıştır. Çin Halk Cumhuriyeti de İHA'larla ilgili çeşitli düzenlemeler yapma ihtiyacını hissetmiştir. 2015 yılında Çin yetkilileri; bazı gelişmiş İHA türleri ile ilgili olarak teknoloji ihracatının ulusal güvenliğin korunması amacıyla sınırlandırıldığını duyurmuştur. (Ancak neden ulusal güvenliği tehdit ettiği konusunda bir açıklama yapılmamıştır.), (Dronelife.com, 2015). Daha sonra aynı yıl içerisinde; 29 Aralık 2015 tarihi itibarıyla “ Hafif ve Küçük İnsansız Hava Araçları Operasyonları İle İlgili Hükümler (deneme uygulaması için)” (Bundan böyle “Operasyon Kuralları olarak anılacaktır) yürürlüğe girmiştir. Bu kurallarla birlikte Çin'de de artık sık sık karşılaşılan izinsiz İHA kullanımlarını sınırlandırma yönünde önemli bir adım atılmıştır. İHA'lar ağırlıklarına ve kullanımlarına göre Tablo-2'deki gibi sınıflandırılmıştır.

Tablo 2. Çin'de İHA sınıflaması

Table 2. UAV classification in China

Sınıf/Kategori/Tip	Boş Ağırlık (kg)	Kalkış Ağırlığı (kg)
I	$0 < W \leq 1.5$	$0 < W \leq 1.5$
II	$1.5 < W \leq 4$	$1.5 < W \leq 7$
III	$4 < W \leq 15$	$7 < W \leq 25$
IV	$15 < W \leq 116$	$25 < W \leq 150$
V	Bitki koruma İHA'sı (ziraat / mahsul ile ilgili)	
VI	İnsansız hava araçları	
VII	100 metrenin dışındaki görüş mesafesinin ötesinde uçurulan Tip I ve Tip II İHA'lar	

Yeni düzenleme ile beraber İHA kullanım kuralları ve bunlara uyulmaması halinde müeyyideler sarih hale getirilmiştir. Hafif ve küçük İHA'larla ilgili daha fazla serbesti varken ticari maksatlı kullanılan büyük ve ağır İHA'larla ilgili daha kısıtlayıcı düzenlemeler yapılmıştır. İHA Operasyon Kuralları ile ilgili en önemli düzenlemelerden biri de "İHA Bulut" ve "elektronik bariyer (Electronic fence)" de içeren gerçek zamanlı (online) denetim sistemidir. "Elektronik bariyer" bazı bölgelerin yasak olarak tanımlandığı ve hava aracının bu bölgelere girmesinin engellenmesi ve durdurulması için kullanılan bir yazılım ve donanım sistemidir. İHA tip 3,4,6 ve 7'ler için elektronik bariyerin kurulumu ve kullanımı ile İHA buluta bağlanması gerekmektedir. Operatörler yoğun nüfuslu bölgelerde her saniye; seyrek nüfuslu yerlerde her 30 saniyede bir raporlama yapmak mecburiyetindedir. Sistemde kaydedilmiş olan uçuş verilerinin ise en az üç ay süre ile saklanması zorunludur. İHA tip 2 ve tip 5 için kilit bölgelerde ve havaalanı güvenlik bölgelerinde (Pist Koruma Alanı ve Potansiyel Kaza Alanları) İHA buluta bağlı olarak elektronik bariyerin yüklenmiş ve kullanılıyor olması gerekmektedir ve bu tip İHA'lar için ise dakikada bir raporlama yapılacaktır. İHA bulut sistemine bağlanması gerekmeyen İHA'larla ilgili olarak da Operasyon Kuralları uyarınca takip ve tanımlama kolaylığı sağlaması için İHA'nın sahibin adı ve irtibat bilgilerinin İHA'da bulunması zorunluluğu vardır. İHA bulut sisteminin İHA operasyonları ile ilgili önemi dolayısıyla Operasyon Kuralları'nda İHA bulut sağlayıcıları ile ilgili düzenlemeler de yer almıştır. Buna göre yetkili İHA bulut sağlayıcısının Çin Halk Cumhuriyeti Sivil Havacılık Otoritesi'nden onay alması ve yerel otoriteler ile silahlı kuvvetlerinin belirli ihtiyaçlarını sağlaması gerekmektedir. Operasyon Kuralları uyarınca ayrıca yerde üçüncü kişilere verilecek olan zararlarla ilgili olarak sorumluluğun kapsanabilmesi için sigorta yükümlülüğü de getirilmiştir. 30 Aralık 2015'te de Çin Halk Cumhuriyeti Sivil Havacılık Otoritesi taslak olarak " Sivil İnsansız Hava Aracı Sistemlerini Kullanarak Yapılan Genel Havacılık Faaliyetlerinin Yönetimine İlişkin Geçici Kurallar Taslağı" (The Draft Interim Rules on the Administration of General Aviation Business Activities Using Civil Unmanned Aircraft Systems) yayımlamıştır. Bu düzenleme de İHA'larla ilgili faaliyet gösteren işletmeler hakkındadır, (CriEnglish.com , 2016).

Japonya'da Durum (Status in Japan)

Japonya'da da diğer pek çok ülkede olduğu üzere İHA'larla ilgili yaşanan bazı vakalar dolayısıyla yasal düzenlemeler önem kazanmıştır. Almanya Korsan Partisi'nin İHA denetimlerini protesto maksadıyla gerçekleştirdiği saldırıda 2013 yılında Almanya Şansölyesi Angela Merkel'e Dresden'deki kampanya çalışmaları sırasında İHA ile yaklaşılmış ve en sonunda da İHA Merkel'in hemen yanına düşmüştür. Merkel örneğinde olduğu gibi Japonya'da da politik bir eylemde İHA kullanılmıştır. Yasua Yamamoto isimli bir şahıs 9 Nisan 2015'te içinde radyoaktif toprak da bulunan bir İHA'yı kasten Japonya Başbakanı Shinzo Abe'nin Tokyo'daki ofisinin bulunduğu binanın çatısına indirmiştir. Söz konusu İHA 22 Nisan 2015'te fark edilmiştir. Nükleer enerji ile ilgili Abe'nin politikasını protesto etme maksadıyla söz konusu eylemi yaptığını söyleyen kişi hapis cezasına çarptırılmıştır, (Japantimes, 2016). Bunun üzerine aynı yıl İHA'larla ilgili yeni düzenlemeler yapılmıştır. 10 Aralık 2015'te yürürlüğe giren Havacılık Yasası'ndaki düzenlemelerden özetle bahsedecek olursak; İHA'nın kullanım amacına, ağırlığına, büyüklüğüne bakılmaksızın; yoğun nüfuslu yerleşim alanlarında veya havaalanı yakınlarında izinsiz İHA uçurmak yasaktır. Gece vakti ve bir etkinlik sırasında da yine İHA uçurulması yasaklanmıştır. Serbest alanlarda ise 150 metrenin (492 feet) altından uçulması ve insanlar, binalar ve araçlarla arada en az 30 metre (98 feet) boşluk bırakılması zorunludur. İhlal halinde ise 500.000 Yen'lik para cezası ödeneceği düzenlenmiştir, (Dronelawjapan.com, 2015).

Rusya'da Durum (Status in Russia)

Rusya Federasyonu Yasama Meclisi Duma (Devlet Duması) İHA'larla ilgili düzenlemeyi 10 Ocak 2015 tarihinde Rusya Havacılık mevzuatında yasa değişikliği yaparak gerçekleştirmiş ve web sayfasında

yayınlanmıştır, (Bill, 2016). Buna göre, tüm İHA'lar ve sistemleri hava aracı olarak kabul edilecek ve bu nedenle sivil havacılık sertifika konusu olacaklardır. Bu bağlamda, Mart 2016 tarihinde yürürlüğe giren son değişiklikle 250 gr.ı geçen İHA'lar için kayıt zorunluluğu getirilmiştir, (Kelsey, 2016). Bununla birlikte, İHA'larla ilgili düzenlemelerin yapılmasından önce Rusya'da İHA'larla ilgili alınmış bir emsal karar bulunmaktadır. Rusya Federasyonu içinde yer alan Komi Cumhuriyeti'nin başkenti Syktyvkarsk'ta Haziran 2014'te bir pizza dükkanı müşterilerine İHA ile siparişlerini teslim etmeye başlamıştır, (Russon, 2014). Daha sonra yerel mahkeme söz konusu işlem dolayısıyla firmaya ceza vermiştir. Tescil edilmemiş bir hava aracını kullanarak hava sahasını ihlal ettiği iddia edilen firma kendisini Rus mevzuatında ticari İHA kullanımı ile ilgili herhangi bir düzenleme olmaması dolayısıyla şahsi amaçlarla kullanılan İHA'nın hava aracı olarak sayılamayacağını iddia ederek kararı temyiz etmiştir ve ceza tutarını düşürmüştür, (LoC, 2015). Rusya ve diğer bazı başka ülkelerde İHA'ların suç işleme maksatlı kullanıldığının örneklerine de rastlamak olanaklıdır. Örneğin, uzaktan kumandalı helikopter vasıtasıyla Moskova'nın güneyindeki Tula bölgesindeki hapisaneyeye 2011 yılında 700 gram eroin gönderilmiştir. Benzer şekilde; Brezilya'da da Sao Paulo'da bulunan hapisane duvarlarından İHA vasıtasıyla 250 gram kokain içeren bir paket atılmıştır. Meksiko'daki Santa Fe bölgesinde "narko-drone" fabrikası bulunmuştur. Amerikan, Avrupa ve İsrail tasarımlarından yararlanılarak yapılan İHA'lar oldukça hafif, katlanabilir kanatlı ve de alçak irtifadan uçuş ve radara yakalanmama kabiliyetine sahip oldukları için uyuşturucu trafiğinde kullanılmıştır. 2012 yılından beri en az 150 bu gibi narko-drone operasyonu vasıtasıyla tonlarca kokain taşındığı tahmin edilmektedir.

Hindistan'da Durum (Status in India)

Hindistan Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü 7 Ekim 2014'de sivillerin İHA Kullanımı ile ilgili bir bildiri yayınlamıştır. Söz konusu bildiri de Hindistan üzerindeki hava sahasında yoğun bir İHA trafiğinin olduğu ve bunun sadece emniyet açısından değil güvenlik açısından da tehdit oluşturduğuna vurgu yapılmıştır. Bu nedenle de sivil İHA operasyonları ile ilgili olarak sadece Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü değil diğer çok sayıda sair otoriteden de izin alınmasının gerekli olacağı ifade edilmiştir. Aynı bildiri de sivil havacılık genel müdürlüğünün düzenleme yapma hazırlığında olduğundan da söz edilmiştir ve bu düzenlemelerin yapılmasına kadar Hindistan sivil hava sahasında hiçbir gerekçe ile İHA uçurulamayacağı duyurulmuştur, (GoI, 2014). Haziran 2015'te "housing.com" gayrimenkul sitesinin iki çalışanı Chembur yakınlarında İHA uçurdıkları için yakalanmışlardır. Mumbai polisi söz konusu İHA'nın kamera ile donatıldığını ve yakınlardaki binaların websitesi için fotoğraflarının çekildiğini iddia etmiştir. Mumbai'de bu gibi cihazlarla fotoğraf çekilmesinin yasak olmasının yanı sıra İHA'larla ilgili olarak yukarıda anlatılan Ekim 2014'teki yasak dolayısıyla da ihlal olduğu açıktır. Buna karşılık internet kaynaklarındaki verilere göre Ekim 2014'teki sivil havacılık genel müdürlüğünün İHA'ların genel olarak yasaklanmasına müteallik duyurusuna rağmen İHA satışları hızla devam etmiştir, (Indianexpress, 2015). Takip eden zamanda da yine söz konusu yasağa aykırı davranışları için haklarında işlem başlatılan başka kişiler de mevcuttur.

İHA'larla ilgili sorunların çözümü için düzenleme yapma ihtiyacının doğması dolayısıyla 2016 yılının başında bir taslak oluşturulmuştur. 21.04.2016'daki taslak düzenlemede ICAO'nun 328 numaralı sirkülerine; 10019/AN/507 sayılı Uzaktan Pilot Kontrollü Uçak Sistemleri (RPAS) Yönergesi'ne de atıfta bulunulmuştur. Taslak düzenleme uyarınca Hindistan'da kullanılacak olan tüm İHA'larla ilgili olarak sivil havacılık genel müdürlüğü tarafından kimlik numarası (unique identification number) verilecektir. Dolayısıyla İHA'ların kayıtlı hale getirilmesi amaçlanmaktadır. Taslak uyarınca İHA uçurmak isteyen herkesin izin alması gerekmektedir. 200 feet (61 m)'nin altında uçulacak olması halinde yerel yönetimden 200 feet'ten yukarıda uçulacak olması halinde sivil havacılık genel müdürlüğünden izin alınması gerekmektedir. Söz konusu izin için uçuştan asgari 90 gün önce müracaat etmek gerekmektedir. İHA'ların kontrollü hava sahalarında uçuşu yasaktır. İHA'ların bakım ve onarımları üretici onaylı prosedürlere uygun olarak gerçekleştirilecektir. Kontrolsüz hava sahasındaki İHA faaliyetleri ile ilgili sınırlamalar mevcuttur ve İHA'ların üçüncü kişilere

verebilecekleri olası zararlarla ilgili sigorta yükümlülüğü de tanzim edilmiştir. İHA'ların uluslararası operasyonu ve/veya su üzerinde kullanımı da yasaklanmıştır. Ayrıca Delhi üzerinde uçuş ve uluslararası sınırların 50 km yakınında uçmak ya da hassas bölgelerin üzerinde (nükleer istasyonlar, askeri bölgeler, stratejik bölgeler) uçmak da yasaklanmıştır, (DGCA, 2016).

Malezya'da Durum (Status in Malaysia)

Malezya'da İHA'lar 2008 yılından bu yana bazı kısıtlamalarla kullanılabilir. Malezya'da İHA'larla ilgili sorumlu kuruluş Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü olup, 15 Nisan 2016 tarihinde resmi gazetede yayımlanarak yürürlüğe giren kanuna göre ilgili bazı maddeler aşağıdaki gibidir, (Dato' Sri, 2016):

- a. Madde 140: A, B, C ve G hava sahalarında, hava trafiği olan bölgede ve 400 feet (122 m) üzerindeki yüksekliklerde hiçbir İHA uçurulmayacaktır.
- b. Madde 141: Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü'nün izni olmadan hiçbir İHA havadan veri toplama amaçlı kullanılmayacaktır.
- c. Madde 142: Küçük İHA kullanan kişi, eğer uçuş için yeterli güvenliğin olduğuna kanaat getirirse, uçağını uçurabilir. Ancak, bu durumda, kullanıcı (operatör/pilot) ile İHA arasındaki doğrudan görüş mesafesi aşılmayacak ve böylece muhtemel diğer hava araçlarına, binalara, üçüncü şahıslara çarpmasına engel olunacaktır.
- d. Madde 143: Küçük İHA'ların kullanılmasında, özel izin alınmadığı durumlarda aşağıdaki kurallar geçerlidir:
 - (a) Özel mülkiyet alanlarının 150 metre civarında uçulmayacak,
 - (b) 1000 ve daha fazla insanın toplu olarak bulunduğu alanlar üzerinde uçulmayacak,
 - (c) 1000 ve daha fazla insanın toplu olarak bulunduğu alanların 150 metreden daha az mesafede uçulmayacak,
 - (d) herhangi bir araca, taşıta veya binaya 50 metreden daha yakın mesafede uçulmayacak,
 - (e) Herhangi bir insana 50 metreden daha yakın mesafede uçulmayacak,
 - (f) İHA'nın kalkışı ve inişi esnasında herhangi bir insana 30 metreden daha yakın mesafede olunmayacak.
- e. Madde 144: Yakıtsız ağırlığı 20 kg.dan fazla olan hiçbir İHA Genel Müdürlük izni olmaksızın uçurulmayacaktır,
- f. Madde 206 Bölüm B: Yukarıda yazılı maddelerden 142'nin ihlali durumunda; (a) eğer ihlali yapan gerçek kişi ise, 25000 Ringgit para cezası ve/veya 1 yıla kadar hapis cezası ile cezalandırılmaktadır; (b) eğer ihlali yapan kişi bir şirket elemanı ise 80000 Ringgit para cezası uygulanmaktadır.
- g. Madde 206 Bölüm C: Yukarıda yazılı maddelerden 140, 141, 143 ve 144'ün ihlali durumunda; (a) eğer ihlali yapan gerçek kişi ise, 50000 Ringgit para cezası ve/veya 3 yıla kadar hapis cezası ile cezalandırılmaktadır; (b) eğer ihlali yapan kişi bir şirket elemanı ise 100000 Ringgit para cezası uygulanmaktadır.

Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (ICAO) Mevzuatı (ICAO Regulations)

3 Ekim 1919'da Paris Konvansiyonu ile beraber uluslararası sivil havacılıkla ilgili hukuki çerçevenin hazırlıklarına başlanılmıştır. Paris Konvansiyonu'nu tadil eden 15 Haziran 1929 tarihli protokolün 15. maddesinde pilotsuz hava aracı şu şekilde tanımlanmıştır : "Akit devletlerin pilotsuz uçuş kabiliyetine sahip hava araçları; özel bir yetki olmadığı takdirde diğer akit devletin toprakları üzerinde pilotsuz olarak

uçamaz.” (ICAO, 2015).

2. Dünya Savaşı'nın sona ermesinden önce gelecekteki sivil hava ulaşımının şeklinin tayini ile ilgili olarak Amerika'nın daveti üzerine 1944'te Şikago Konferansı düzenlenmiştir. Bu konferans ve neticesinde imzalanmış olan Uluslararası Sivil Havacılık Konvansiyonu ya da daha bilinen adı ile Şikago Konvansiyonu hava taşımacılığının en önemli düzenlemelerinden biri olarak kabul edilmektedir. Konvansiyon'da sivil havacılık ile ilgili çok sayıda konuda düzenleme yapılmış ve yine aynı Konvansiyon ile beraber Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (Bundan böyle ICAO olarak anılacaktır) kurulmuştur. Ekim 1947'den itibaren Birleşmiş Milletler'e bağlı olarak faaliyetlerini sürdüren ICAO'nun temel amacı uluslararası hava seyrüseferi ile ilgili olarak uluslararası sivil hava trafiğinin tüm dünyada emniyetli ve düzenli bir şekilde gelişmesini sağlamak, hava aracı tasarımlarının ve operasyonlarının barışçıl suretle olmasını teşvik etmek ve rekabetten kaynaklı gereksiz ekonomik israfın önlenmesi şeklinde düzenlenmiştir. 1944 yılında imzalanmış olan Şikago Konvansiyonu'nun 8'nci maddesinde “pilotsuz olarak uçma yeteneğine sahip hiçbir uçak, bu Konvansiyona taraf olan ülkenin özel izni olmaksızın o ülke hava sahası içinde uçurulamaz. Konvansiyona taraf her ülke kendi sivil hava sahasında uçacak pilotsuz her uçak için, diğer uçaklara tehlike yaratmayacak şekilde tedbirleri almakla yükümlüdür” şartı bulunmaktadır, (ICAO, 1944).

22 Eylül – 3 Ekim 2003 tarihleri arasında gerçekleştirilmiş olan 11. Hava Seyrüsefer Konferansı'nda küresel kava trafik yönetimi operasyonel konseptinin (global air traffic management operational concept) İHA'larla ilgili olarak Şikago Konvansiyonu'nun 8. maddesini de kapsayacak şekilde tanımı yapılmıştır. Bu tanım takip eden dönemde ICAO Genel Kurulu'nun 2004'teki 35. oturumunda da desteklenmiştir. 12 Nisan 2005'te Hava Seyrüsefer Komisyonu 196. oturumunun ilk toplantısında Genel Sekreter'den seçilmiş olan devletlere ve uluslararası kurumlara; sivil hava sahasında mevcut ve olası İHA aktiviteleri ile ilgili olarak sivil hava araçlarına yaratacağı tehdidin önlenmesi prosedürleri hakkında danışılmasını talep etmiştir. Takiben Montreal'de 23-24 Mayıs 2006 tarihinde İHA'larla ilgili düzenlemelere ilişkin olarak ICAO'nun potansiyel rolüne ilişkin bir toplantı yapılmıştır. Toplantıda çok sayıda teknik ve performans özelliklerine ilişkin standartlar olacak olmasına karşın bunların sadece bir kısmının ICAO SARP (standart ve tavsiyeler) olarak tanziminin gerekeceğine karar verilmiştir. İkinci informal ICAO toplantısı ise 11-12 Ocak 2007 tarihlerinde gerçekleştirilmiştir. Toplantıda henüz ICAO SARP oluşturulması için erken bir aşamada olduğuna karar verilmiştir. Ancak kavramlar, terimler vs. ile ilgili bir düzenleme yapılması gerekliliği kabul edilmiştir. Toplantıda düzenlemelerle ilgili gelişmelerde yol gösterici olunabilmesi için ICAO'nun stratejik yönerge dokümanının gelişimini koordine etmesinin gerekli olduğuna karar verilmiştir. Bağlayıcı olmamakla beraber yönerge devletlerin ve kurumların düzenlemeleri oluşturması esnasında temel olarak kullanılabilir. Hava Seyrüsefer Komisyonu 19 Nisan 2007'de gerçekleştirilmiş olan 175. oturumunun ikinci toplantısında “İnsansız Hava Aracı Sistemleri Çalışma Grubu (İHSÇG /Unmanned Aircraft Systems Study Group)”nu oluşturmuştur. İHSÇG, İnsansız Hava Aracı Sistemleri (Cir328)'ni oluşturmuştur, (ICAO, 2015). Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü'nün (ICAO) Mart 2011 yılında yayımlanmış olan işbu genelgesinde İHA, içinde pilot olmaksızın çalıştırılan uçak, “İHA Sistemi” ise söz konusu uçak ile bunun yardımcı bileşenlerinin tamamı olarak tanımlanmaktadır, (ICAO, 2011). Uluslararası Sivil Havacılık Operasyonel Hava Trafik Yönetim Sistemi (ATM) kavramında İHA, pilot olmaksızın uzaktan kumanda ile tamamen başka bir yerden (yer, başka bir uçaktan, uzaydan) kontrol edilebilen veya önceden programlanarak tamamen otomatik olarak kullanılan pilotsuz bir uçak olarak tanımlanmaktadır, (ICAO, 2005).

ICAO mevzuatı yukarıda yazılı olan tanımlara dayalı olarak şekillendirilmektedir. Bu nedenle, ister uzaktan kumandalı olsun, ister tamamen otomatik veya bunların bir kombinasyonu olsun, tüm İHA'lar Şikago Konvansiyonu'nun 8'nci maddesi kapsamında değerlendirilmektedir. Bu bağlamda, yakın gelecekte yalnızca uzaktan kumandalı İHA'ların uluslararası sivil havacılık sistemine entegre olabileceği öngörülmektedir. Çünkü, hava trafik yönetim sistemi içerisinde ve diğer sivil uçaklarla olacak etkileşimde İHA'nın güvenli ve öngörülebilir hareketleri uzaktan kumanda eden pilotun sorumluluğu ve yönetimi altındadır. Oysa, tam otomatik İHA'lar veya insansız balonlar uçuş esnasında gerçek zamanlı olarak komuta

edilemediğinden bu kapsamda değerlendirilmemektedir. İHA tanımı, hiçbir şekilde model uçak ile normal uçak arasındaki farkı değiştirmemektedir. Model uçak, genel olarak, yalnızca hobi amaçlı olarak kullanılan uçaklar şeklinde kabul edilmekte, bu nedenle Şikago Konvansiyonu 8'nci maddesi kapsamı dışında kalmakta ve böylece ilgili ülkenin ulusal mevzuatına konu teşkil etmektedir, (ICAO, 2011).

ICAO sivil havacılık mevzuatının ana amacı sürekli ve standart güvenliğin azami seviyede sağlanmasıdır. Dolayısıyla, İHA'ların asgari seviyedeki riskle sivil havacılık kurallarına entegrasyonu söz konusu olduğu için yerdeki insanların, mülklerin ve havadaki diğer araçların da güvenliği bu kapsamda ele alınmaktadır. Diğer taraftan, günümüzde İHA'lar sivil hava sahasını kullanmakta ve bu konuda gerek mevzuat gerekse standartların yetersiz/eksik oluşu nedeniyle söz konusu entegrasyon henüz sağlanamamaktadır. ICAO'ya göre gerekli olan bu entegrasyonun asgari risk ile güvenli bir şekilde sağlanabilmesi İHA'ların da ortak hava sahasında aynen pilotlu uçakların tabi olduğu kurallara göre hareket etmesiyle olanaklıdır. Bu ise İHA'yı uzaktan kumanda ile kullanan pilotun hava trafik kontrolü (ATC: Air Traffic Control) ile iletişimde olmasını ve ATC talimatlarına zamanında uyabilmesini gerektirmektedir. Sonuç olarak, İHA kullanıcısı pilot ile insanlı hava aracı kullanan pilot aynı seviyede sorumluluğa sahip olup, uçuşla ilgili tüm işlemleri yapabilme ve havacılık kurallarını bilme zorunlulukları bulunmaktadır. Bunun sağlanabilmesi için de her iki pilot tipinin de sertifikalı olması gerekmektedir, (Model ICAO, 2016). İHA pilotları, insanlı hava araçları için geçerli olan aynı ICAO kurallarına tabidirler. Bu nedenle, ortak hava sahasının kullanılabilmesi için İHA kullanımı bir pilot marifetiyle olmalıdır. Bu pilotlar ise uzaktan kumanda kullanabilmekle birlikte bu amaçlı teknoloji kullanımı hiçbir şekilde pilot sorumluluğunu ortadan kaldırmamaktadır. Bu nedenle, ICAO terminolojisinde bazı tip İHA'lar için uzaktan pilot kontrollü uçak (RPA: Remotely Piloted Aircraft) tanımı Şikago Konvansiyonu Ek-2'de yer almıştır. İHŞÇG Mart 2012'de uzaktan pilot kontrollü uçaklarla ilgili olarak Ek-2 ve Ek-7 ile ilgili yayınlamış olduğu ilk önemli SARP'ın ardından "Uzaktan Pilot Kontrollü Uçak Sistemleri Yönergesi (Manual on Remotely Piloted Aircraft Systems)" hazırlıklarına odaklanmıştır.

Şikago Konvansiyonu'nun başkaca eklerinde de yine İHA'larla ilgili düzenlemeler mevcuttur. Söz konusu düzenlemelerin ayrıntılarına girilmeden önce, eklerin içerikleri konusunda kısaca bilgi vermek gerekirse; ICAO'ya Konvansiyon ile beraber Konvansiyon'un 54. maddesi uyarınca uluslararası standartlar ve tavsiye niteliğindeki uygulamaları (Bundan böyle SARP- Standards and Recommended Practices- olarak anılacaktır) düzenleme yetkisi ve görevi verilmiştir. Bu çerçevede hazırlanacak olan SARP'lar tüm akit devletlere bildirilmektedir. ICAO tarafından hazırlanan SARP'lar daha sonradan Konvansiyon'a ek olarak tanzim edilmektedir. Şu anda içerisinde 10.000'in üzerinde SARP yer alan toplam 19 tane ek bulunmaktadır, (Model ICAO, 2016). İnsansız hava araçları ile ilgili olarak ise yeni bir ek tanziminden ziyade Şikago Konvansiyonu'nun mevcut düzenlemelerinin tadil edilmesi yoluna gidilmiştir. Ocak 2007'de insansız hava araçlarının durumu ile ilgili düzenlenmiş olan toplantının neticesinde ICAO'nun insansız hava araçlarına bakış açısını değerlendirmek, insanlı havacılıktan farklarını dikkate almak ve ICAO'nun insansız hava araçları ile ilgili politikasının gelişiminde devletleri teşvik etmek için 2011 yılında 328-AN/190 numaralı sirküler düzenlenmiştir. Söz konusu sirkülerde ifade edilmiş olan temel düzenlemeler (Ek-2 ve Ek- 7) şu şekildedir:

Ek-2: Şikago Konvansiyonu'nun 12. maddesinden yola çıkılarak tanzim edilmiş olan havacılık kuralları ile ilgili (Rules of Air) düzenlemeye sirkülerde atıfta bulunulmuştur. Konvansiyon'un işbu maddesi uyarınca akit devletler kendi hava sahalarında manevra yapana ya da üzerinde uçuş gerçekleştiren hava araçlarının ve de kendi ulusal işaretlerini taşıyan hava araçlarının yürürlükteki havacılık kurallarına riayet etmesini temin etmeyi taahhüt ederler. Keza uygulanan işbu kuralları ihlal edenlerin yargılanmasının yapılması da yine akit devletler tarafından taahhüt edilmektedir. Ek-2 uyarınca hava aracı kumandanı ile ilgili düzenlemelere de yer verilmiştir. Buna göre hava aracı kumandanı "işletici tarafından ya da genel havacılıkta hava aracı sahibi tarafından uçuşun emniyetli bir şekilde seyri ile ilgili görevli ve yetkili kişisini ifade eder." Hava aracı kumandanı aynı zamanda uçuşun havacılık kurallarına uygun olarak gerçekleştirilmesinden de sorumlu

olacaktır. Dolayısıyla insansız hava araçlarının da kullanıcıları işbu kurallara uymakla yükümlü olacaktır. Söz konusu hususlar daha önceden uluslararası pilotlar birliği IFALPA tarafında da değerlendirilmiş ve insansız hava araçlarını yerden kullanan kişiler ile pilotların farklı stres seviyelerine sahip olmaları dolayısıyla aralarında ayırım yapılması gerektiği ifade edilmiştir.

Ek-7 : Mürettebatın, yolcuların, yer hizmetlerinin, genel kamu güvenliğinin sağlanması; uçuş emniyetini düzenini ve etkinliğini nazara alarak akit devletlerin hukuk dışı müdahalelere karşı önlemlerin alınması ve emniyet ile ilgili alınmış kararların iç hukukta ve iç hat uçuşlarında tatbik edilmesi gibi amaçlarla tanzim edilmiş olan Ek-17'nin amaçları kapsamında İHA'ların gayri hukuki/kanunsuz müdahalelere karşı korunmasının gerektiği de şüphesizdir. Doktrinde hukuk dışı müdahalelere hakkında kullanıcılarına bilgilendirilmesi, sertifika programlarına katılımın sağlanması vs. hususları değerlendirilmektedir. İHA'larla ilgili bir diğer konuda da İHA'ların siber saldırılara açık oluşudur. Bazı kaynaklarda hava trafiğinde yaygın hale gelecek olan ve insansız hava araçlarında da kullanılmakta olan uydu bazlı ADS-B (Automatic Dependent Surveillance – Broadcast) sisteminin siber güvenlik açıklarının olduğu iddia edilmektedir. ADS yayını ile beraber uçak dünyanın neresinde olursa olsun hız, irtifa, baş açısı ve yapmak istediği manevrası ile ilgili bilgileri otomatik olarak uydu veya diğer haberleşme veri hatları vasıtasıyla hava trafik yönetim birimine ve tüm ADS-B ekipmanlı uçaklara ve yerdeki araçlara iletacaktır.

Bazı kaynaklarda GNSS'in özellikle elektronik karıştırma (jamming) ve aldatma (spoofing) tehditlerine açık olması dolayısıyla güvenlik zaafiyeti olduğu iddia edilmektedir. İnsansız hava araçlarında kullanılması beklenen sistemle ilgili olarak da söz konusu endişeler mevcuttur. "Spoofing" adı verilen siber saldırılarda saldırgan kullanıcı sistemlerine kullanıcının kendisiymiş gibi erişebilmektedir, (Investopedia.com, 2016). Teksas Üniversitesi yapmış olduğu bir deneyle başarılı bir siber saldırı gerçekleştirmiş ve de 2013'te deneyde hem 65 metrelik ve 80 milyon Amerikan Doları değerindeki yatın yönü değiştirilebilmiş hem de bir İHA'nın yere düşürülmesi sağlanmıştır. Yine bir başka İHA'ya yönelik siber saldırı örneği 2009'da gerçekleşmiştir, (Psiaki ve diğ., 2014). Sadece 26 Dolarlık bir hazır yazılım kullanılarak Amerikan askeri İHA'sı Iraklı militanlar tarafından saldırıya uğramıştır, (Gorman ve diğ., 2009). 2013 yılında ise Samy Kamkar isimli bilgisayar korsanı (hacker) kendi İHA'sının gökyüzündeki diğer İHA'ları arayıp bularak bozmasını (hacking) ve böylece bir anlamda kendisine İHA ordusu kurma olanağı sağlayan yazılım ve donanımı internette yayınlamıştır. Bu ve benzeri çok sayıda örnek vasıtasıyla da görülebilmektedir ki Ek-17'nin İHA'ların da nazara alınarak tadil edilmesi yerinde bir çalışma olmuştur.

Tadil edilen bir diğer ek ise Şikago Konvansiyonu'nun 31. maddesi uyarınca düzenlenmiş olan 8 numaralı ektir. Uçabilirlikle ilgili koşulların ihtiva edildiği işbu ek hakkında sirkülerde İHA'larla ilgili hangi koşullarda düzenleme yapılması gerektiği ve de mürettebat lisanslandırmasının ne şekilde olması gerektiği ifade edilmiştir. 2 Ağustos 2010'da Amerikan insansız helikopterin (MQ-8B Fire Scout) yazılım sorunu nedeniyle kontrol bağlantısının kaybedilmesi neticesinde saporak Washington D.C.'de Hava Savunma Tanıtma Sahası'nı ihlal etmiş olması ya da 25 Nisan 2006'da "General Atomics Predator B" İHA'sının pilot konsol sisteminin kilitletmesini takiben kullanılan yedek konsolda yanlış yakıt valfi konumuna ayarlanmış olması nedeniyle A.B.D. yakınlarındaki Nogales, AZ'de düşmesi örneklerinde olduğu gibi insansız hava araçlarının mahiyetinin özelliği dolayısıyla bu lisanslandırma ile ilgili münhasıran İHA'ların yapılarının dikkate alınmasında fayda bulunmaktadır.

Son olarak sirkülerde hava trafik hizmetlerine ilişkin Ek-11 ile hava aracı kazalarının araştırılmasına müteallik Ek-13'ün de yeniden düzenlenmesinin gerektiği ifade edilmiştir. Hava trafiğini etkilemeden insansız hava araçlarının seyrüseferini sürdürebilmelerinin önemi ortada olup, bu nedenle Ek 11'in tadil edilmesi gerektiği açıktır. Söz konusu eklerden ilk tadil edilen ek; Ek-13 olmuştur. 2010 yılında "kaza" ve "ciddi vakıa (serious incident)" tanımları değiştirilmiş ve insanlı ve insansız hava araçları ile ilgili ayırım yapılmıştır, (ICAO Ek, 2010). 328-AN/190 numaralı sirkülerden sonra üç yıllık bir hazırlık aşamasının neticesinde 2015 yılında Uzaktan Pilot Kontrollü Uçak Sistemleri Yönergesi (ICAO RPAS, 2015) yayımlanmıştır. Bu Yönerge devlet hava araçlarına, otonom insansız hava araçlarına ve bunların

operasyonlarına, uzaktan pilot kontrollü uçak sistemi tarafından aynı anda birden fazla uzaktan pilot kontrollü uçak sistemine ve model hava araçlarına tatbik edilmeyecektir, (ICAO, 2014). Netice olarak, İHA konusunda ICAO kuralları başta, Şikago Konvansiyonununun 3, 8, 12, 15, 29, 31, 32 ve 33'ncü maddelerinde yazılı kurallar olmak üzere muhtelif madde ve ek düzenlemelere dayanmaktadır.

Türkiye'de Durum (Status in Turkey)

Türkiye'de İHA'larla ilgili hususlar, Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü tarafından 22 Şubat 2016 tarihinde hazırlanıp, değişiklik yapılmış son hali 22 Nisan 2016 tarihinde yayımlanmış olan "İnsansız Hava Aracı Sistemleri Talimatı-SHT-İHA" ile düzenlenmiştir, (SHGM, 2013). Söz konusu talimat; 10/11/2005 tarihli ve 5431 sayılı Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü Teşkilat ve Görevleri Hakkında Kanunu ile 14/10/1983 tarihli 2920 sayılı Türk Sivil Havacılık Kanunu'na dayanılarak hazırlanmıştır. Söz konusu Talimat'ın kapsamı 2'nci maddesinde "Türk Hava Sahası'nda uçacak İHA'ları, ilgili sistemleri, bunları ithal edecek, satışını yapacak, işletecek ya da kullanacak gerçek ve tüzel kişileri, bu kapsamda görev alacak personeli, İHA ekibini ve hava sahası kullanımı ile verilecek hava trafik hizmetlerini kapsar" ifadesi ile belirlenmiştir. Ancak, aşağıdaki İHA sistemleri bu Talimatın kapsamı dışında tutulmaktadır:

- a. Devlet insansız hava araçları,
- b. Yalnızca kapalı alanlarda kullanılan İHA ve sistemleri,
- c. Yere veya herhangi bir platforma bağlı olan insansız balon ve benzeri sistemler,
- d. Azami kalkış ağırlığı 500 gr'dan daha az olan İHA'lar.

SHT-İHA'nın 4'ncü maddesinde ise konuyla ilgili tanımlar ve kısaltmalar verilmiş olup, buna göre İHA Sistemleri ve İHA tanımı aşağıdaki şekilde yer almaktadır:

İnsansız Hava Aracı Sistemi (İHAS): İHA ile kontrol istasyonu, komuta ve kontrol veri bağı, kalkış ve iniş sistemi gibi uçuşun sağlanması için gerekli olan, birbirinden ayrı sistem elemanlarının bütünü,

İnsansız Hava Aracı (İHA) : İHAS'ın bir bileşeni olarak işletilen, aerodinamik kuvvetler aracılığıyla sürekli uçuş yapma yeteneğinde olan, üzerinde pilot bulunmaksızın uzaktan İHA pilotu tarafından kontrol edilerek veya otonom operasyonu İHA pilotu tarafından planlanarak uçurulan ya da havada kalabilen hava aracını ifade etmektedir.

Söz konusu Talimat incelendiğinde, içinde yer alan kuralların genel olarak uluslararası olarak yürürlükte olan birçok devlet ve kurumun (örn. ABD, Kanada, ICAO, FAA, EASA, vb.) İHA mevzuatının birlikte yorumlanması ile hazırlandığı anlaşılmaktadır. Bu Talimat ile İHA'lar, kalkış ağırlıkları referans alınarak 4 farklı grupta (İHA0, İHA1, İHA2, İHA3) ele alınmaktadır. Buna göre İHA0 (500 gr - 4 kg) ve İHA1 (4 - 25 kg) kategori hava araçlarının AR-GE çalışmaları için üretildiği kabul edilmekte ve Genel Müdürlük tarafından oluşturulan internet tabanlı "Kayıt Sistemi"ne kayıt edilmesi zorunluluğu getirilmektedir. İHA0 ve İHA1 sınıfındaki hava araçları için ithalat uygunluk şartları da Madde 6'da düzenlenmiştir. Talimatın 8'nci maddesine göre İHA0 sınıfındaki hava araçları için sertifika veya uçuş izni belgesi gerekmemektedir. Oysa, İHA1 sınıfındaki hava araçları için sertifika gerekmemekle birlikte "Emniyet ve Uygunluk Beyanı" kabul edilmektedir. İHA2 (25-150 kg) ve İHA3 (150 kg ve üzeri) sınıfı hava araçları için yukarıda ifade edilmiş olan belgelerin alınması zorunludur.

SHT-İHA Talimatı'nın Üçüncü Bölümü'nde 10.-16. maddeler arasında sorumluluk, sigorta, kayıt, tescil, uçuş operasyon el kitabı ve pilot lisansları düzenlenmiş olup, bazı önemli maddeler aşağıda verilmiştir:

- a. Tüm İHA ve sistemlerinin işleticileri/sahipleri üçüncü şahıslara verecekleri zararlardan sorumludur (Md.10).
- b. 25 kg üstü İHA ile ağırlığına bakılmaksızın ticari faaliyet gerçekleştiren İHA için, 15/11/2005 tarihli

- ve 25994 sayılı Türk Hava Sahasında Uçuş Yapan Türk ve Yabancı Sivil Hava Araçlarının Yaptırması Gereken Üçüncü Şahıs Mali Mesuliyet Sigortası Yönetmeliği'ne göre sigorta yaptırılır ve sigortasız uçuş yapılmaz (Md.10).
- c. İHA0 ve İHA1 kategorisindeki hava araçlarının kayıtları Genel Müdürlük tarafından elektronik ortamda oluşturulan "Kayıt Sistemi" üzerinden yapılacaktır (Md.11).
 - d. İHA0 ve İHA1 sınıfındaki İHA'lar için tescil işlemi yapılmaz. Uzaktan kumanda edilen İHA2 ve İHA3 sınıfındaki İHA'lar, Genel Müdürlük tarafından hava aracı siciline kayıt edilerek tescil işareti atanır (Md.12).
 - e. İHA0 ve İHA1 uçuracak kişiler için Genel Müdürlükçe herhangi bir lisans düzenlenmez. Ancak söz konusu kişiler oluşturulan internet tabanlı Kayıt Sistemi'ne aşağıdaki bilgi ve belgeleri girerek kayıt olmak zorundadırlar (Md. 14).
 - (a) TC Kimlik Numarası.
 - (b) İsim-Soyisim ve ikametgah bilgileri.
 - (c) Telefon, e-posta, vb İletişim bilgileri.
 - (ç) Nüfus Cüzdanı sureti.
 - (d) 18 yaşından büyükler için arşiv kayıtlı adli sicil belgesi.
 - (e) 18 yaşından küçükler için ileride doğabilecek hukuki ve cezai sorumlulukları kabul ettiklerine dair kanuni mümessillerince noterde tanzim ve tasdik edilmiş taahhütname.
 - f. İHA0 sınıfı pilotlar en az 12 yaşında ve İHA1 sınıfı pilotlar en az 15 yaşında olmalıdır (Md. 14).
 - g. 18 yaşın altındaki İHA pilotlarının üçüncü şahıslara verdikleri zararlardan hukuki ve cezai sorumluluk kanuni mümessiline aittir (Md. 14).
 - h. İHA pilotu, uçuşun güvenli yürütülmesinden ve uçuşla ilgili idari, mali ve teknik kuralların yerine getirilmesinden sorumludur (Md. 15)
 - i. İHA pilotu, faydalı yüklerin yasal çerçevede kullanılmasından sorumludur (Md. 15)
 - j. Ticari faaliyetler dışında sportif ve amatör amaçla gerçekleştirilecek uçuşlarda, Talimatta belirtilen kurallara uyulmak kaydı ile, 18inci Maddede yeralan bölgeler hariç Genel Müdürlükten uçuş izni alınması gerekmez. Bu sınıflar için mahallin en büyük mülki idare amiri tarafından yasaklanan yer ve zamanlarda uçuş yapmak yasaktır (Md. 17a).
 - k. Meskun mahal, kalabalık veya çok kalabalık bölgeler dışında kalan bölgelerde, 18inci ve 19 uncu Maddelerde belirtilen gerekliliklere uyulması kaydıyla ticari amaçlı uçuş yapılması halinde uçuş izni alınmasına gerek yoktur Md. 17b).
 - l. İHA0 ve İHA1 sınıfındaki İHA'lar ile NOTAM alınmadan, uçuşa yasak olmayan bölgelerde ve mahallin en büyük mülki idare amiri tarafından yasaklanmayan yer ve zamanlarda uçulması durumunda (Md. 19):
 - (a) Sadece görerek meteorolojik koşulların sağlandığı durumlarda, gündeğümü-günbatımı saatleri arasında ve en az 2 km görüşe açık havalarda uçuş gerçekleştirilebilir,
 - (b) İHA, yatayda 500 metreyi geçmeyecek şekilde pilotun görüş alanında olmalıdır,
 - (c) Yerden (AGL) 400 feet (120 metre) yüksekliğin üzerine çıkılmamalıdır,
 - (ç) İnsan ve yapılardan en az 50 metre uzaklıkta uçuş gerçekleştirilmelidir.

Diğer ülkelerin mevzuatında da olduğu gibi İHA'larla ilgili sınıflandırma yapılmış olması doğaldır ancak bununla beraber bazı düzenlemelerde isabetsizlik bulunmaktadır. Örneğin; işbu düzenleme uyarınca İHA0 ve İHA1 kategorisinde "18 yaşından küçükler için ileride doğabilecek hukuki ve cezai sorumlulukları kabul ettiklerine dair kanuni mümessillerince noterde tanzim ve tasdik edilmiş taahhütname" istenileceği

düzenlenmiştir. 5237 sayılı Türk Ceza Kanunu'nun 31. ve 33. maddeleri uyarınca 12 yaşından küçük çocuklar ile 15 yaşından küçük sağır ve dilsizlerin ceza sorumluluğu bulunmamaktadır. Bu kişiler hakkında ceza kovuşturması yapılmaz; ancak, çocuklara özgü güvenlik tedbirleri uygulanabilir. 15 yaşını doldurmuş olmakla birlikte 18 yaşını doldurmamış olan çocuklar ve 18 yaşını doldurmuş ancak 21 yaşını doldurmamış sağır ve dilsizler ile ilgili olarak cezai sorumluluğun varlığı kabul edilmiş ancak cezalarında indirim yapılacağı düzenlenmiştir. 12 yaşını doldurmuş olmakla birlikte 15 yaşını doldurmamış olan çocukların ve 15 yaşını doldurmuş olmakla birlikte 18 yaşını doldurmamış olan sağır ve dilsizlerin ceza sorumluluğu ile ilgili olarak ise işlediği fiilin hukuki anlam ve sonuçlarını algılama ve bu fiille ilgili olarak davranışlarını yönlendirme yeteneğinin olup olmadığına bakılarak karar verilecektir. Ancak bu hallerde dahi kanun küçüğün kanuni mümessillerinin cezai sorumluluğunu düzenlememiştir. Aksine ceza hukukumuzun temel ilkelerinden olan ceza sorumluluğunun şahsiliği ilkesi Türk Ceza Kanunu'nun 20. maddesinde sarıh bir şekilde tanzim olunmuştur. Buna göre; "Ceza sorumluluğu şahsidir. Kimse bir başkasının fiilinden dolayı sorumlu tutulamaz." Dolayısıyla 18 yaşından küçük İHA kullanıcısının vereceği zararlarla ilgili cezai sorumluluğun üstlenilmesi olanaklı görülmemektedir.

İHA VE ÖZEL HAYATIN GİZLİLİĞİ (UAV AND PRIVACY)

Ülkeler tarafından, İHA'ların kendi egemenliklerindeki hava sahasına entegrasyonu için çok sayıda kanun çalışmaları yapılmış ve halen de yapılmaktadır. Ancak, söz konusu mevzuat hazırlık ve yapım aşamalarının hiç birisinde kamu, kişiler veya firmalar tarafından İHA kullanımının özel hayatın gizliliğine olası etkileri konusunda bir çalışma yapılmamıştır. Oysa, teknolojinin ve bilgisayar sistemlerinin (örn. Google Earth, Yandex, cep telefonları, internet, vb.) neden olduğu sorunların en başında belki de özel hayatın gizliliğini ihlal konuları gelmektedir. Diğer taraftan, bu konuda herhangi olası bir ihlal yaşandığında, mahkemelerde bu konuda nasıl bir karar verileceği de önemli bir soru işaretidir. Dünyadaki ve Türkiye'deki mevzuat(SHT-İHA Md. 18)incelendiğinde İHA'ların yerleşim yerleri ve kalabalıklar üzerinde uçurulmasının özel izne tabi olmasının, özel yaşama müdahaleyi engelleme değil, tamamen güvenlik nedeniyle olduğu görülecektir. Oysa ki İHA'ların özel hayatın gizliliğine müdahale edilecek şekilde kullanımına örnek teşkil eden çokça vaka olmuştur. 2014'ün ortalarında Seattle (A.B.D.)'de 26. katta apartman dairesinde yaşayan bir kadın yatak odasını gözlemleyen bir İHA ile karşılaşmıştır, benzer şekilde ülkemizde de Zeytinburnu'ndaki Atatürk Kız Öğrenci Yurdu'nda Kasım 2015'te İHA vasıtasıyla gözlem ve kayıt yapılmıştır. Bu ve benzeri çok sayıda örnekten de görülebileceği üzere küçük ve mikro İHA'ların günlük yaşamda kullanımına ilişkin mevzuatta "özel hayatın gizliliği (privacy)" konusunda da düzenleme yapılması ihtiyacı olduğu açıktır. Bu bağlamda mevzuata eklenmesi gereken gizlilik (privacy) tanımına, İHA'lar tarafından toplanan, depolanan, işlenen ve dağıtılan verilerin gizliliği konusunun da dahil edilmesi önemli bir husus olarak beklenmektedir. Bu da İHA kullanımında "gizlilik" etki analizi yapılmasını kaçınılmaz kılmaktadır. Diğer taraftan, söz konusu mevzuat iyileştirmesi/eklemesi yapılırken, İHA kullanımının "özel hayata" etkileri/sonuçları konusunda hangi kurum veya kuruluşun yetkili ve sorumlu olacağı da belirlenmelidir.Sivil Havaçılık Genel Müdürlüğü'nün bu konudaki sorumluluk ve rolünün, mevcut mevzuat çerçevesinde, pasif veya ikinci derecede olduğu düşünülebilir.

Kamu, özel sektör veya şahıslar tarafından İHA kullanımının inanlar üzerindeki etkilerine bakıldığında çok özet olarak şu sonuçlara ulaşmak olanaklıdır: İHA'lar belirli bir yükseklikte (50 m, 100 m, 300 m, vb.) uçarken üzerinde takılı çeşitli sensörler (kamera, GNSS, fotoğraf makinesi, lazer tarama cihazı, vb.) vasıtasıyla görüntüsünü aldıkları alanlardaki ilgili ilgisiz tüm insanlar ve mülkler hakkındaki bilgiyi (koordinatlandırılmış görüntüler) de toplamaktadırlar. Bu durum ise; insanların kendilerine ait bilgilerin izinsiz olarak başkalarının eline geçmesi ve dolayısıyla kontrolsüz bilgi anlamına gelmektedir.

Bu konuda Avrupa'daki durum şu şekilde özetlenebilir. Avrupa'da özel hayatın gizliliği ve kişisel

verilerin korunması en temel insan hakları olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle, İHA'nın eğlence amaçlı kullanımı bile başka insanların özel hayatına ve kişisel verilerine potansiyel müdahale olarak algılanmaktadır. Söz konusu İHA'ların video kamera, fotoğraf makinesi, dinleme cihazı vb. cihazlarla donatılması ve yetkili makamlardan izinsiz bir şekilde etrafta uçurulması durumunda konu hukuk bağlamında daha da hassas hale gelmektedir. Avrupa Birliği'nin Temel Haklar Şartı'nın 7. Maddesine göre herkesin özel hayatına, aile hayatına ve iletişimine saygı bekleme hakkı vardır. 95/46/EC Yönergesi uyarınca da Akit Devletler gerçek kişilerin temel hak ve özgürlüklerini ve münferit olarak mahremiyetini kişisel verileri işlerken korumakla yükümlüdür. Dolayısıyla kişisel verilerin tedariki ve kullanımı esnasında özel hayatın dokunulmazlığı ilkesinin dikkate alınması gerekmektedir. Duruma Türkiye açısından bakılacak olursa T.C. Anayasası'nın 20. Maddesinin birinci fıkrasına göre herkes özel hayatına ve aile hayatına saygı gösterilmesini isteme hakkına sahiptir. Özel hayatın ve aile hayatının gizliliğine dokunulamaz. Aynı maddenin üçüncü fıkrasına göre ise herkes kendisiyle ilgili kişisel verilerin korunmasını isteme hakkına sahiptir. Bu hak kişinin kendisiyle ilgili kişisel veriler hakkında bilgilendirilme, bu verilere erişme, bunların düzeltilmesini veya silinmesini talep etme ve amaçları doğrultusunda kullanılıp kullanılmadığını öğrenmeyi de kapsar. Türkiye ayrıca herkesin özel ve aile hayatına, konutuna ve haberleşmesine saygı gösterilmesini hükme bağlayan Avrupa İnsan Hakları Sözleşmesi'ni Kişisel Verilerin Otomatik İşleme Tabi Tutulması Karşısında Bireylerin Korunması'na İlişkin 108 sayılı Avrupa Konseyi Sözleşmesi'ni de imzalamıştır. Konunun ceza boyutuna bakıldığında ise Türk Ceza Kanunu'nun 134. maddesinde "Kişilerin özel hayatının gizliliğini ihlal eden kimsenin altı aydan iki yıla kadar hapis veya adli para cezası ile cezalandırılacağı" düzenlenmiş olduğu görülür. Aynı madde uyarınca gizliliğin görüntü veya seslerin kayda alınması suretiyle ihlal edilmesi halinde ise cezanın alt sınırı bir yıldan az olmaz. Keza söz konusu görüntü ve sesleri ifşa eden kişilerle ilgili de ceza verileceği işbu maddede düzenlenmiştir.

İHA'LARDA GÜVENLİK VE SİGORTA HUSUSLARI (SECURITY AND INSURANCE ISSUES)

Güvenlik Hususları (Security Issues)

İHA'ların kullanımı bir havacılık faaliyeti olarak kabul edildiğinden bunların; yerdeki ve/veya havadaki başka uçağa, insana, malzemeye, mülkiyete veya herhangi bir şeye zarar vermemesi için ülkelerin ulusal havacılık kurumları tarafından uyulması zorunlu güvenlik kuralları getirilmiştir. Bu gibi kurallar özellikle eğlence amaçlı uçurulan İHA'lar için konulmuştur. Bu kurallar ülkeden ülkeye değişiklik göstermekle birlikte genel olarak aşağıdaki kısıtlamaları içermektedir:

- İHA'nın belirli bir yüksekliğin altında uçurulması,
- Uçuşların insanlardan belirli bir mesafede yapılması,
- İHA ile pilotu arasındaki göz temasının asla kaybedilmemesi,
- İHA'ların ilgili kuruma kaydının yaptırılması,
- İHA'ların yasaklanmış olan alanlar (yerleşim alanları, havaalanları, stadyumlar, vb.) üzerinde ve yakınında uçurulmaması,
- İHA'ların gece uçurulmaması,
- İHA'ların kötü hava koşullarında uçurulmaması.

Yukarıda çok genel olarak verilmiş olan kurallara uyulmaması halinde meydana gelecek olumsuz durumlarda ciddi yasal yaptırımların söz konusu olacağı açıktır.

İHA'lar da Sigorta Hususları (Insurance Issues)

Tüm ülkelerdeki İHA mevzuatına göre; İHA'lar dahil havada uçan her araç bir uçak olarak kabul edilmektedir. Bu bağlamda; ağırlığına, büyüklüğüne ve hızına bakılmaksızın her İHA'nın insanlara ve çevreye ciddi zararlar vermesi olasıdır. Bu gibi zararlara sebep olunması durumunda yasal işlemler dışında karşı tarafa tazminat ödenmesi de söz konusu olmaktadır. Dolayısıyla, İHA sahiplerinin aynen araba sahiplerinde uygulandığı gibi uçaklarını olası zararlara karşı sigorta ettirmeleri yararlı olacaktır. Söz konusu sigorta kapsamının ve maliyetinin, İHA'nın kullanım amacına (eğlence amaçlı veya profesyonel ve ticari amaçlı) göre farklılıklar göstereceği açıktır. Örneğin AB ülkelerinde İHA sigortası yapılması zorunlu olup, sigorta işlemi İHA uçurulmadan önce tamamlanmış olmalıdır. Türkiye'de ise İHA'ların zorunlu sigorta yapılması hususu SHT-İHA Talimatı'nın 10'ncu maddesinde düzenlenmiştir. Söz konusu maddenin ikinci fıkrası "25 kg üstü İHA ile ağırlığına bakılmaksızın ticari faaliyet gerçekleştiren İHA için, 15/11/2005 tarihli ve 25994 sayılı Türk Hava Sahasında Uçuş Yapan Türk ve Yabancı Sivil Hava Araçlarının Yaptırması Gereken Üçüncü Şahıs Mali Mesuliyet Sigortası Yönetmeliğine göre sigorta yaptırılır ve sigortasız uçuş yapılmaz." hükmünü taşımaktadır. Diğer taraftan, 25 kg altındaki İHA'lar için çok genel ifadeler dışında açık bir hüküm bulunmamaktadır. Oysa, boyutu, ağırlığı ve hızı ne olursa olsun tüm İHA'ların üçüncü şahıslara veya araçlara zarar verebileceği dikkate alınarak farklı seviyelerde de olsa hepsi için sigorta zorunluluğu getirilmesi gerekmektedir.

SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS)

İHA'lar günümüzde günlük yaşam dahil, sivil, askeri, ticari ve profesyonel alanların tamamında yoğun olarak kullanılmaktadır. Bu durum bazı teknik, güvenlik ve hukuksal sorunları da beraberinde getirmektedir. Çünkü; boyutu, hızı, ağırlığı ne olursa olsun tüm İHA'lar hava sahasını kullanmaktadırlar ve bu nedenle buldukları ülkenin ulusal mevzuatına bağlı olarak faaliyet göstermelidirler. En temel anlamda, İHA kullanımı insanlara, kara ve hava araçlarına yönelik her türlü kaza olasılığına açıktır. Bunlara ilave olarak, söz konusu İHA'ların video kamera, fotoğraf makinesi, ses kayıt cihazları, vb. cihazlarla donatılarak kullanılması özel hayatın gizliliğinin ve kişisel verilerin korunmasının ihlali sonucunu da doğurabilmektedir. Örnek olarak; izinsiz olarak insanların evlerine, bahçelerine ve arabalarına ait ses ve görüntü kaydının yapılması suç teşkil edebilecek bir husustur. Aynı durum kamusal alandayken de kişisel bilgilerin ve özel hayatın gizliliğini ihlal anlamına geleceğinden suç teşkil edecektir. Diğer taraftan, kullanılacak İHA'da kamera, fotoğraf makinesi gibi hiçbir cihaz takılı olmasa bile, başkalarına ait özel mülkiyet alanlarında uçurulması o insanlarda tedirginlik yaratacağından özel hayata müdahale olarak algılanabilecek ve dolayısıyla bu eylem yasal sonuçlar doğurabilecektir. Ancak, tüm bu olası hukuksal sorunlara karşın İHA'ların haritacılık, afet ve risk yönetimi, keşif, güvenlik ve kontrol, arama-kurtarma gibi çok önemli ve stratejik sivil kullanım alanları olduğu da unutulmamalıdır. Örneğin; Afrika'daki kaçak gergedan ve fil avcılarının yakalanmasında, Fukushima nükleer santrali kazasının akabindeki hasar tespitinde, Haiti'deki depremi takiben yardım faaliyetlerinin sürdürülmesinde de yine İHA'lardan destek alınmıştır. Bu nedenle, konuya ilişkin sağlıklı ve uzun ömürlü bir mevzuat elde edilmek isteniyorsa; sadece tek bir açıdan bakılarak ve/veya sınırlı sayıda sektörün görüşü alınarak değil, mevcut ve yakın gelecekte olası tüm paydaşların düşünce ve önerileri alınarak veya geniş katılımlı bir komisyon kurularak mevzuat hazırlama çalışmaları yapılmalıdır. Diğer taraftan, devletlerin özel hayatın gizliliği konusundaki politikaları, günümüz teknolojilerinin geldiği uç noktalar sayesinde eski ve yetersiz kalmaktadır. Örneğin, bir kamu kurumu tarafından elde edilmiş veya edilmekte olan coğrafi konum bilgisinin nasıl ve ne oranda kullanılacağına ilişkin yeterli koruyucu yasal sınırlamalar bulunmamaktadır. Bu sınırlamaların oluşturulmasında coğrafi bilgi meslek profesyonellerinin önemli katkılar sağlayacağı açıktır.

Netice olarak, gelişmiş ülkelerde olduğu gibi Türkiye’de de konuya ilişkin mevzuat hazırlanırken, önemli hususların gözden kaçmaması ve ancak İHA kullanımının da zorlamalı yorumlarla gereksiz kısıtlanmaması için Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü himayesinde ilgili tüm sektör temsilcilerinin (İHA satıcıları, haritacılık gibi profesyonel amaçlı kullanıcılar, üniversiteler, hukukçular, konuyla ilgili danışmanlar, pilotlar, vb.) de dahil edildiği bir kurul oluşturulup karşılıklı tartışma ortamında görüşleri alındıktan sonra olası tüm tarafların desteğini alacak en uygulanabilir kuralların ortaya konması oldukça yararlı olacaktır. Ortaya çıkacak taslağın, diğer ülke çalışmaları ile de karşılaştırılarak son haline getirilmesi ülkemiz ve ilgili sektörler adına doğru ve olumlu bir gelişme olacaktır. Diğer taraftan, İHA’ların üçüncü kişilere ve eşyalarına vereceği olası zararlar için de Türk sigorta mevzuatında en ince ayrıntısına kadar gerekli çalışma ve eklemelerin bir an önce yapılması önemlidir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Allianz Global Corporate & Specialty SE. September 2016.
http://www.agcs.allianz.com/assets/PDFs/Reports/AGCS_Rise_of_the_drones_report.pdf.
- A-NPA, 2015-10, *Introduction of a Regulatory Framework for The Operation of Drones*,
<https://www.easa.europa.eu/system/files/dfu/A-NPA%202015-10.pdf>
- ARC, 2016, *Micro Unmanned Aircraft Systems Aviation Rulemaking Committee (ARC)*, ARC Recommendations Final Report. 01 April 2016.
- Bill No. 752189-6 on *Amending the Air Code of the Russian Federation*, 11 January 2016.
- Can, N., 2011,
http://can.aero/index.php?option=com_content&view=article&id=76:chicago-konvansiyonuna-kadar-devletler-aras-hava-hukuku-alanndaki-baz-duezenlemeler&catid=21:articles&Itemid=13. Haziran 2011.
- CriEnglish.com, 2016, <http://english.cri.cn/12394/2016/01/11/3781s912285.htm>
- Dato’ Sri Azharuddin Abd Rahman, 2016, Kuala Lumpur, 18 October 2016, UN-GGIM Presentation.
- DGCA, 2016; [http://dgca.nic.in/misc/draft%20circular/AT_Circular%20-%20Civil_UAS\(Draft%20April%202016\).pdf](http://dgca.nic.in/misc/draft%20circular/AT_Circular%20-%20Civil_UAS(Draft%20April%202016).pdf). 21 April 2016.
- Dictionary.com, 2016, <http://dictionary.reference.com/browse/uav?s=t>, bakılma tarihi 14 Ocak 2016.
- Dronelawjapan.com, 2015, <http://dronelawjapan.com>, 10 December 2015.
- Dronelife.com1, 2015, <http://dronelife.com/2015/01/05/drones-court-year-review/>
- Dronelife.com2, 2015, <http://dronelife.com/2015/08/03/drones-and-powerful-chips-face-china-export-limit/>
- EASA, 2015, *Introduction of a Regulatory Framework Forth Eoperation of Unmanned Air Craft*, Technical Note, Related A-NPA: 2015-10 — RMT.0230 — 18.12.2015.
- EC, 2016: European Commission, Directorate-General Humanitarian Aid and Civil Protection – Echo. Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS) workshop for Civil Protection experts Borschette Centre, Brussels - 21 – 22 January 2016, Final Report).
- Esler, D., 2015, *FAA Vs. Raphael Pirker*, <http://aviationweek.com/bca/faa-vs-raphael-pirker>, 28 December 2015.
- Europarl, 2015,
[http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2015/571305/EPRS_BRI\(2015\)571305_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2015/571305/EPRS_BRI(2015)571305_EN.pdf)
- FAA, 2015, Docket No. FAA-2015-0150; Notice No. 15-01, BillingCode 4910-13-P.
- FAA DoT, 2015, *Operation and Certification of Small Unmanned Aircraft Systems*, FAA-2015-0150: Notice No. 15-01, 2015.
- FAA, 2015, *State and Local Regulation of Unmanned Aircraft Systems (UAS)*, Fact Sheet Federal Aviation Administration Office of the Chief Counsel December 17, 2015.
- Federal Register, 2015,
<https://www.federalregister.gov/articles/2015/12/16/2015-31750/registration-and-marking-requirements-for-small-unmanned-aircraft>.

- Gorman, S., Dreazen, Y. J., Cole, A., 2009, *Insurgents Hack U.S. Drones*, The Wall Street Journal, 17 December 2009.
- GoI (Government of India), 2014: http://dgca.nic.in/public_notice/PN_UAS.pdf. 07 October 2014.
- GPO: 49 U.S. Code § 40103, 2011.
<https://www.gpo.gov/fdsys/pkg/USCODE-2011-title49/pdf/USCODE-2011-title49-subtitleVII-partA-subpartI-chap401-sec40103.pdf>, p.748, 2011.
- GPO1, 2012: U.S. Government Printing Office, FAA Modernization and Reform Act of 2012 (Public Law 112-95) Conference Report, Washington 1 February 2012.
- GPO2, 2012: Criteria specified in section 336 of Public Law 112-95. 14 February 2012.
<https://www.gpo.gov/fdsys/pkg/PLAW-112publ95/html/PLAW-112publ95.htm>
https://www.icao.int/Meetings/UAS/Documents/Circular%20328_en.pdf.
- ICAO, 2015, https://www4.icao.int/demo/pdf/rpas/10019_cons_en%20-%20Secured.pdf
- ICAO, 1944: Article 8 of the Convention on International Civil Aviation, signed at Chicago on 7 December 1944.
- ICAO, 2011, *Unmanned Aircraft Systems (UAS)*, Cir. 328, AN/190, 2011.
- ICAO, 2005, *Global Air Traffic Management Operational Concept*, First Edition 2005, DOC 9854, AN/458.
- ICAO Ek-13, 2013, *Hava Aracı Kaza ve Vaka İncelemesi*, 10. Edn., July 2010, lastly amended by Amendment No. 14 (in force since 14 November 2013), ICAO Doc. AN13/10 (Annex 13), Chapter 1, Definitions.
- ICAO RPAS, 2015, *Manual on Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS)*, DOC 10019, AN507, First edition 2015.
- ICAO, 2014: https://www4.icao.int/demo/pdf/rpas/10019_cons_en%20-%20Secured.pdf. Airworthiness Manual (Doc 9760) 3rd Edition, 2014.
- Japantimes, 2016,
<http://www.japantimes.co.jp/news/2016/02/16/national/crime-legal/man-landed-drone-roof-japanese-prime-ministers-office-gets-suspended-sentence/#.WAdI8I9OKP9>
- Indianexpress, 2015,
<http://indianexpress.com/article/technology/gadgets/why-india-needs-rules-for-flying-drones-soon/>. 09 July 2015.
- Investopedia.com, 2016, <http://www.investopedia.com/terms/s/spoofing.asp>, December 2016.
- Juul, Maria, 2015, *European Parliamentary Research Service, Civil Drones In The European Union*, October 2015.
- Keane, J.F., Stephen S. Carr, 2013, "Johns Hopkins APL Technical Digest", Vol. 32, No. 3, pp. 558-571, 2013.
- Kelsey D. Therton, 2016, <http://www.popsci.com/russias-new-drone-rules-look-lot-like-americas>.
- LoC (Library of Congress), 2015,
<http://www.loc.gov/law/foreign-news/article/russia-commercial-and-private-drones-to-be-outlawed-in-moscow/>. 25 June 2015.
- Monash University, 2003, *Remote Piloted Aerial Vehicles*
http://www.ctie.monash.edu/hargrave/rpav_home.html#Beginnings. 22 June 2003.
- Nypost.com1, 2014, <http://nypost.com/2014/07/07/two-drones-in-near-miss-with-nypd-copter-over-gwb/>.
- Nypost.com2, 2014, <http://nypost.com/2014/10/15/prosecutors-drop-charges-against-drone-hobbyists/>.
- Out-law.com, 2014,
<http://www.out-law.com/en/articles/2014/december/eu-court-ruling-means-civilian-use-of-drones-in-public-must-comply-with-data-protection-laws/>.
- Psiaki, M.L., Brady W., O'Hanlon, Steven, P., Powell, Jahshan, A., Bhatti, Todd, E., Humphreys, Andrew S., 2014, <http://gpsworld.com/gnss-lies-gnss-truth/>. 06 November 2014.
- Regulation (EU), 2016: 2016/679 of the European Parliament and of the Council of 27 April 2016, *Official Journal of the European Union*, L 119/1, 04.05.2016 (Legislative Acts).

- Russon, Marry-Ann, 2014, *Pie in the Sky: How Russian Firm DoDo Pizza Delivers Takeaways by Drone*, <http://www.ibtimes.co.uk/drone-delivery-russias-airborne-pizzas-are-height-fine-dining-1454684>.
- SDI, 2015, *Strategic Defence Intelligence*, The Global UAV Market 2015-2025. <https://store.strategicdefenceintelligence.com/report/df0060sr--the-global-uav-market-2015-2025/>. January 2015.
- SHGM, 2013, 21 Nisan 2016 tarihinde değişik 02 Şubat 2013 tarihli "*İnsansız Hava Aracı Sistemlerinin Ayrılmış Hava Sahalarındaki Operasyonlarının Usul Ve Esaslarına İlişkin Talimat*" SHT-İHA Talimatı, 2013.
- The Guardian, 2014, <https://www.theguardian.com/world/2014/apr/02/uk-first-drone-conviction>
- The Model ICAO, 2016, http://www.sim-oaci.uqam.ca/IMG/pdf/legalc_topic1.pdf, s.7, June 2016.
- The Verge, 2015, <http://www.theverge.com/2015/10/28/9625468/drone-slayer-kentucky-cleared-charges>.
- UK CAA1, 2016, UK Civil Aviation Authority, *Unmanned Aircraft and Drones*. <http://www.caa.co.uk/Commercial-industry/Aircraft/Unmanned-aircraft/Unmanned-Aircraft/>. Bakılma tarihi 25 Mart 2016.
- UK CAA2, 2016, UK Civil Aviation Authority, *Unmanned Aircraft and Drones*, <http://www.caa.co.uk/Commercial-industry/Aircraft/Unmanned-aircraft/Large-unmanned-aircraft/>. Bakılma tarihi 25 Mart 2016.
- USA Today, 2016, <http://www.usatoday.com/story/tech/news/2016/07/21/facebooks-aquila-completes-first-test-flight/87368910/>.
- USA Today, 2014, <http://www.usatoday.com/story/money/business/2014/07/02/ntsb-drones-faa-appeal-pirker/11793203/>.
- Wikipedia.org, 2016, https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_unmanned_aerial_vehicles#cite_note-2, Son bakılma tarihi 23 Şubat 2016.



SOLAR ENERGY SUPPORTED HYDROGEN PRODUCTION: A THEORETICAL CASE STUDY

¹Ali ATES, ²Sacit Zendehtel SHEKARDASHT, ³Eyüb CANLI

^{1,3}Selçuk University, Department of Mechanical Engineering, Campus, Selçuklu, Konya, TURKEY

²Selçuk University, Graduate School of Natural Sciences, Selçuklu, Konya, TURKEY

¹aates@selcuk.edu.tr, ²sajed.zendehtel@yahoo.com, ³ecanli@selcuk.edu.tr

(Geliş/Received: 20.04.2017; Kabul/Accepted in Revised Form: 19.06.2017)

ABSTRACT: Hydrogen is an important energy vector and a strong candidate for energy storage. It will be a useful tool for storing intermittent energy sources such as sun. The main objective of this work is to assess a system harnessing solar energy in electrical form and store it as hydrogen by means of an electrolyzer for small scale consumers away from the grid such as rural areas by computer simulation. Hydrogen then can be consumed in a fuel cell in order to generate electricity. The electrical energy obtained from solar energy via photovoltaic panels was used in order to charge a battery first and then hydrogen was acquired by using aforementioned energy in the electrolysis of water. In the second stage, electricity is generated in a fuel cell by using the generated hydrogen. A theoretical analysis was done via computer software by solving the constituted mathematical model. Data containing monthly average insolation values of Konya City according to years were used in this model. Electrolyzer temperature and pressure values and efficiencies of the photovoltaic panels were used as the input parameters. General system efficiency and effectiveness, generated electricity and hydrogen amounts were obtained as the output parameters. Among all, temperature was found to be the most effective parameter according to the obtained results considering the generated hydrogen amount, system effectiveness and efficiency. A wide range of electrical power between 400 W and 1800 W can be harnessed from the PV part of the system. Hydrogen production in the other hand can be attained in the range of 120-130 g/month. Power curve of the fuel cell at the start up of the system yields a 0.001 seconds reaction time. The proposed system can be utilized in rural parts of Konya and climatically similar regions in the world.

Key Words: *Electrolysis of water, Hydrogen fuel cell, Mathematical model, Photovoltaic.*

Güneş Enerjisi Destekli Hidrojen Üretimi: Teorik Bir Vaka Çalışması

ÖZ: Hidrojen önemli bir enerji taşıyıcısıdır ve enerji depolanması için güçlü bir adaydır. Güneş gibi kesikli bir enerji kaynağının depolanması için kullanışlı bir araç olacaktır. Bu çalışmanın ana amacı bir bilgisayar simülasyonu vasıtası ile kırsal kesimler gibi elektrik şebekesinden uzaktaki küçük ölçekli tüketiciler için güneş enerjisinin elektriksel formda elde edildiği ve saha sonra bir elektrolizer ile hidrojen şeklinde depolandığı bir sistemi değerlendirmektir. Hidrojen daha sonra tekrar elektrik üretmek için bir yakıt hücresinde tüketilebilir. Önce güneş enerjisinden fotovoltaiik paneller aracılığı ile elde edilen enerji ile bir akü şarj edilmiş ve bu enerji suyun elektrolizi işleminde kullanılmak suretiyle hidrojen elde edilmiştir. İkinci aşamada elde edilen hidrojen bir yakıt hücresinde kullanılarak elektrik enerjisi elde edilmiştir. Oluşturulan matematiksel model, geliştirilen bilgisayar programı vasıtası ile çözümlenerek teorik bir inceleme yapılmıştır. Bu modelde Konya iline ait güneş ışınımının yıllara göre aylık ortalama değerlerine ait veriler kullanılmıştır. Giriş parametreleri olarak elektrolizör sıcaklığı, elektroliz basınç değerleri ve fotovoltaiik panellerin verimi kullanılmıştır. Genel sistem verim ve etkenliği, üretilen elektrik ve hidrojen miktarları ise çıkış parametreleri olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, gerek üretilen hidrojen miktarı yönünden, gerekse sistemin etkenliği ve verimi yönünden, giriş parametreleri arasında en etkili bileşenin sıcaklık olduğu görülmüştür. Sistemin fotovoltaiik kısmından 400 W ile 1800 W arasından geniş bir yelpazede elektrik enerjisi elde edilebilmektedir. Diğer yandan aylık hidrojen üretimi 120-130 g/ay aralığındadır. Yakıt pilinin güç eğrisi, 0.001 saniye cevap süresi ortaya koymuştur. Önerilen sistem Konya'da ve dünyada benzer iklim özelliklerine sahip başka bölgelerde kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler: *Fotovoltaiik, Hidrojen yakıt pili, Matematik model, Suyun elektrolizi*

INTRODUCTION

Renewable energy is not only indispensable but also a new investment way for the small scale investors. In the sectors such as agriculture, mining, industry and service, off grid renewable energy systems have been emerging. For instance, photovoltaic (PV) systems are gaining more and more importance in small scale applications. A comprehensive information compilation about PV panels can be found in the report of Sayın and Koç (2011). With the existence of grid support, these systems work as they are desired. However when the grid is not accessible, storing generated or harnessed energy is very important due to two significant reasons: renewable energy sources are generally have an intermittent characteristic and system capacities can't response for instant energy demand increases.

Energy storage is a topic which has been investigated intensively for aforementioned systems where grid support is out of the question. Batteries that include chemical reactions to store and release electricity are the ones that come to mind in the first place. Storing heat by phase changing materials such as salts, thermo-chemical heat storage materials such as salt hydrates, capacitors and hydrogen as an energy vector can be listed as alternatives. Kleiner *et al.* (2017) mentioned about salt hydrates of $MgSO_4$, $ZnSO_4$ and $SrCl_2$ as promising thermo-chemical heat storage materials for later use of energy generation. They investigated the thermal conductivity of these materials in order to provide information for the optimization of this storage method. Another important point of this type of thermal storage is emphasized by the authors that these materials store thermal energy relatively much more time comparing to salt and/or water heat storage tanks. In the proposed system schematics of Amusat *et al.* (2017), three different energy storage system were mentioned; i.e., Pumped Hydro Energy Storage System, Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage system and Molten Salt Tank system. They investigated a sophisticated hybrid renewable energy generation system including these energy storage systems from the aspect of reliability of the field application. Allison (2017) studied the multi-objective control of a system containing solar energy electricity conversion system with the aid of an electrical battery unit. The author stresses the importance of complex control systems and the need of energy storage systems, in particular, batteries. Steam, water and oil are all used in a single integrated combined power system as a heat storage sub system in the paper of Hu *et al.* (2017). Chong *et al.* (2016) tried to attract attention to another important part of energy storing efforts for renewable energy systems. The life span of these aforementioned energy storage systems were reported to be short by the authors due to the irregular output of the renewable energy systems. They proposed hybrid energy storage systems and decision matrixes. An interesting report was provided by Nojavan *et al.* (2017) about utilization of electrolyzer, hydrogen and fuel cell as a renewable energy storage system. They evaluated variables such as intermittent characteristics of renewable energy sources, market prices, demand change and etc.

Hydrogen is an important material not only for energy systems but also for any industrial applications as a raw material. Hydrogen should not be regarded as an energy source because it cannot be found freely in the nature. Instead, hydrogen exists as part of other compounds. Generated energy can be used to break these bonds and released hydrogen that has a high reaction potential can be stored for later use. It can be used by combustion or by fuel cells. Another type of utilization is the bonding with carbon atoms. By this way, methane and methanol can be synthesis and carbon dioxide also can be captured in order to lower its impact on the environment. When hydrogen containing molecules are synthesized, the densities increase and therefore required pumping work decreases. It leads to desired flexibility for energy storage and transportation. The important point here is the strength of the bonds between atoms of the synthesized molecules should be relatively weaker so that oxygen can react with hydrogen when sufficient activation energy is presented. So hydrogen is generally regarded as an energy vector or in other words energy cycle fluid. Therefore it is an important candidate for energy transportation with relatively lower energy losses. Energy generated and desired to be transported in North Africa is a good example for this task. In this sense, hydrogen is particularly important than local energy storage systems such as water potential energy storage systems. Hydrogen bond to carbon can be

stored easily compared to pure hydrogen. This is due to the size of hydrogen atoms. Pure hydrogen can escape almost any storage. The only reason of pure hydrogen storage systems is their structure that slows down the movement of hydrogen atoms. Whether hydrogen is stored in its pure form or bond to carbon or other matter, there are a lot of researches going on about the topic. Four main methods for storing hydrogen can be mentioned here. The first one is the natural storing in caves and similar voids in the ground. Since diffusion of hydrogen in the ground is relatively slow and there is no hazardous effect, this is a favorable solution when short term storage is needed to damp excess or insufficient production. There is a remarkable study of Bai *et al.* (2014) about the underground storage possibilities of hydrogen. Authors summarized the opportunities and the works going on all around the world and they also give local information. They exemplify some underground depots such as depleted reservoirs, aquifers, salt caverns and excavated caverns. The second method is the pressurized depots or in other words pressurizing. This solution is for smaller systems such as vehicles or small electrolysis units. Ali *et al.* (2016) utilized Matlab Simulink software similar to the present work and considered the pressurized hydrogen storage in their model. They also made an examination for the possible leakages and concluded that their model is proper for relatively lower pressures. Fan *et al.* (2017) also considered a pressurized hydrogen tank for their hybrid renewable energy system. They operated this tank for four different modes. Their whole system exhibits similarities with the current work. There are known issues about the compressed hydrogen storage, i.e. metal fatigue due to load cycles of the storage, embrittlement of storage material due to the existence of hydrogen etc. So Guo *et al.* (2016) focused on hydrogen gas cycling tests based on multi-stage storage and self pressurizing method. Also thin films from multi-elemental sources for hydrogen storage applications are investigated and reported (Akyildiz and Öztürk, 2013). The third one is the metal hydride hydrogen storages. Hydrogen is contained in the crystal lattice structures in a stable manner in this solution. One of the mines used for metal hydrides is the boron mineral and it is abundant in Turkey. However metal hydride hydrogen storage is still expensive for certain applications. The topic is particularly attracting attention because of the quasi-infinite possibilities in material research. A solid state hydrogen storage tank based on complex hydrides and to fully integrate it with a High Temperature Proton Exchange Membrane fuel cell stack objective was asserted by Baricco *et al.* (2017). A mixed lithium amide/magnesium hydride system was used as the main storage material for the tank by the authors and it was equipped with a high temperature PEM fuel cell. It is said that the storage system cooperates with the high temperatures and can release hydrogen with relatively low temperatures, that is 170 °C. An extensive literature review was conducted by Yu *et al.* (2017) and it is very useful for this content. They look for the recent advances and remaining challenges for the hydrogen storage and consider the nano-materials in respect of the improvement. Reader can find information about metal hydrides for the hydrogen storage as well as molecular hydrogen storage and chemical hydrogen storage. Another comprehensive review was reported by Kumar *et al.* (2017) about vanadium based hydrogen storage material. They suggested that vanadium is a good alternative for the metal hydride hydrogen storage materials. Other superior properties can be given as high hydrogen solubility and diffusivity in the material at nominal temperature and pressure conditions. The last one is the chemical fuel synthesis though these produced fuels cause exhaust emissions similar to their fossil fuel counterparts. An example is to convert hydrogen with carbon dioxide to methanol and higher alcohols (Nieskens *et al.*, 2011). A fixed bed reactor was used for the conversion reaction and 3 times the H₂ is mentioned to be needed for one unit of CO₂ to reach significant levels of conversion. 470-530 K and 5-19 MPa are reported to be the convenient intervals for the conversion of hydrogen and carbon dioxide to methanol (Ostrovskii, 2002). The author focused on the problems of heterogeneous catalyst situation and investigated the mechanisms for Cu-Zn containing catalyst. As a conclusion, storing hydrogen in short term relatively cheap solutions and using it with a fuel cell seems logical. Another chemical hydrogen storage system is proposed by Zhong *et al.* (2017). Authors underline that the hydrolysis of NaBH₄ offers significant advantages for hydrogen storage in fuel cells, whereby suffers from the irreversibility. Hence they focused on a simple and low cost method for NaBH₄ regeneration from its hydrolysis byproduct. In the absence of an additional hydrogen source,

they utilized ball milling at ambient conditions and by his way they obtained the reaction of magnesium silicate and dehydrate sodium metaborate.

Hydrogen can be used as a fuel in internal and external combustion engines. An important point here is the hardening of the combustion chamber walls due to the presence of the hydrogen and therefore occurring early fatigue in long term operation. Using a fuel cell for generating electricity for hydrogen as a fuel seems to be the most efficient way to use hydrogen as an energy vector. The only drawback of this option is the initial cost of the systems. Prices are decreasing lately and efficiencies of the systems are going up. So fuel cell option becomes more favorable with passing years. Pure hydrogen as well as methanol and methane can be used directly in fuel cells. Some informative literature examples are as follows. Kivrak *et al.* (2013) investigated some elements for their direct ethanol fuel cell catalyst usage. They also included structures at nano scale in their work. A novel fuel cell design is proposed by Esquivel *et al.* (2017) which include single use papers in order to aid point of care diagnostic applications. Their proposed design utilizes capillary action for the fluid movement and an exothermic reaction which releases hydrogen as a byproduct. This design actually works as a hydrogen sensor and the amount of hydrogen gives information about the liquid dropped on to the design. "More electric aircraft" term in the recent years leded Guida and Minutillo (2017) to study the potential of a PEM fuel cell in aircrafts. The authors analyzed the feasibility, from the specific energy point of view, in using a PEM fuel cell power system as APU unit in a more electrical aircraft with respect to a battery system installation. Since fuel cells uses hydrogen as a fuel and they have relatively complex structures, feeding hydrogen is an issue and Jia *et al.* (2017) focused on this subject. They stressed that existence of hydrogen starvation for a fuel cell can detrimental effects on the unit. They investigated mitigation strategies for the hydrogen starvation. Fuel cell combined heat and power plants attract attention of the scientists due to the relatively higher temperatures experienced during electricity generation by fuel cells. The heat released from the fuel cell can be used for the benefit of facilities and this increases total efficiency of the system. Mamaghani *et al.* (2017) constituted a model for prediction of the HT-PEM unit and try to assess adaptive long term optimization. Mohamed and Kamil (2016) investigated the preheating of hydrogen by using a waste heat recovery system as an energy source and evaluate the power output improvement for an open cathode PEM fuel cell system. They suggest a potential for hydrogen preheating by using the waste heat from the fuel cell stack though only 3-6% of the waste heat can be used due to the small amount of hydrogen flowing in the system.

Fuel cells and electrolyzer units operate on the same basic principle. Fuel cells can be thought inversely working electrolyzer or vice versa. 20% of the world hydrogen generation comes from the electrolysis method. The purest hydrogen can be acquired by electrolysis. Generating hydrogen by electrolysis is not a good candidate for constituting energy vector of the future since its electricity cost is higher than the energy obtained by using hydrogen in various energy conversion methods. There are emission constraints for the hydrogen generation from coal or natural gas. Of course there are novel techniques too; for instance Lashgari *et al.* (2017) proposed a highly efficient p-n junction nanocomposite solar-energy-material for direct conversion of water molecules to hydrogen. They investigated the presence of the carbon nanotubes for their solar-energy material and found that the photo catalyst acts twice efficient. Another example is the report of Izgi *et al.* (2016) in which the effect of NaOH on hydrogen production from NaBH₄. Since Sodium hydroxide concentration in hydrogen production from sodium boron hydride is immensely important to stabilize the reaction, and boron is an important candidate for storing hydrogen, the study is important in this aspect. Electrolysis can be thought as an alternative for storing energy when grid support is out of option and electricity is generated by renewable and there is an excess of supply. Fallisch *et al.* (2017) proposes a PEM water electrolysis cell design as a candidate for highly efficient solar hydrogen generator which is needed in countries having abundant of renewable energy. Their work also contains content such as "Hydrogen Concentration", "on cell PEMs", "multi-junction Solar Cells" and etc. On the other hand, higher rates of hydrogen production can be achieved by application of microbial electrolysis cells as mentioned in the report of Guo *et al.* (2017). They proposed a low resistance reactor design and reported a high hydrogen purity as

high as >98%. They also mentioned that their reactor can operate in a stable manner up to three weeks. Anion exchange membrane electrolysis is mentioned by Vincent *et al.* (2017). They underlined the benefit of using anion exchange membrane by using with non noble metals in the catalyst layer will lead to lower initial costs. Their best electrolysis performance is reported as 500 mA cm⁻² for 1.95 V at 60 °C with 1% K₂CO₃ electrolyte. Zhang *et al.* (2017) reported a novel electrode for solid oxide electrolysis cell and found that H₂O/H₂ adsorption desorption or surface diffusion process is the main rate-limiting step for steam electrolysis reaction.

There are also modeling studies similar to this work. A study considering a solar hydrogen system was reported by Boudries (2013) in Algeria. The results indicate that concentrated solar power is more convenient for the solar hydrogen systems. Ngoh *et al.* (2014) designed and simulated a high temperature solar-hydrogen hybrid system in order to generate hydrogen. Exergy analysis and source utilization are also reported.

This study, which is a compact summary and reorganized form of a MSc thesis of Zendehtel (2016), comprises mathematical model of three systems and combines these models in to one single system model. These systems are; firstly photovoltaic electricity production system; secondly hydrogen production system and thirdly fuel cell system. The mathematical formulation of each system and the main model for the whole system are provided. System parameters are explained and system behavior as produced hydrogen and system efficiencies are illustrated. Both system model and the potential of such systems for considered case site can be regarded as the valuable outcomes of this study.

The main objective of this research is to evaluate the potential of a combined system comprising a PV system, an electrolyzer system and a fuel cell system for small scale energy consumers away from the electricity grid such as rural areas in terms of continuity and avoiding intermittent characteristics of the renewable energies.

The novel contribution to the specific literature can be stated as the local real world data used as input for the present system to be simulated. By this way, domestic potential can be assessed. A detailed literature survey alongside of the directions to the future work possibilities are also other favorable contributions to be listed. The simulation presented here can be used in order to avoid costly trial and error approaches or in other words reduce the possibilities.

MATERIAL AND METHOD

A schematic drawing of the general system is provided in Figure 1. As it can be seen from the figure, the main energy source is the sun. The energy transported through the sun rays is harnessed via PV and thermal solar collector panels in electricity and thermal heat forms. Of course some of the radiation is reflected and some of the radiation passes through the panels. Absorbed energy is converted with conversion efficiency. The heated water is fed to the electrolyzer with a manner to satisfy the thermal energy need of the electrolyzer. For the generated electricity, things are relatively complicated. A power regulator was utilized in order to regulate the electrical power. A portion of the electricity is sent to the batteries through the charge control unit and rest is sent to the electrolyzer in the supervision of the ECU. Again batteries supply the electrolyzer unit. Generated hydrogen first stored in a pressurized tank and then sent to the Proton Exchange Membrane (PEM) fuel cell. The oxygen (O₂) obtained via electrolyses are released to the atmosphere. Oxygen is supplied to the PEM by using atmospheric air. The whole system is operated by the ECU and the simulation is operated by the Matlab Simulink software.

All data about the environment and the solar radiation of Konya City were gathered from Meteorology Regional Directorate of Turkey and fed to the system mathematical model for the simulation. Block diagrams were utilized in Matlab Simulink software in order to ease the simulation process. Since numerous system components are exist, sub-systems were created and applied similarly. In the following part, diagrams of the simulation process and related equations of the mathematical model are provided respectively.

Figure 2 presents the main flow chart. Other diagrams for the sub systems refer to this main flow chart. The input parameters of the simulation system are given in Table 1. Respectfully, Figure 3 exhibits the block diagram of the energy harnessing part of the main system and related equations follow it.

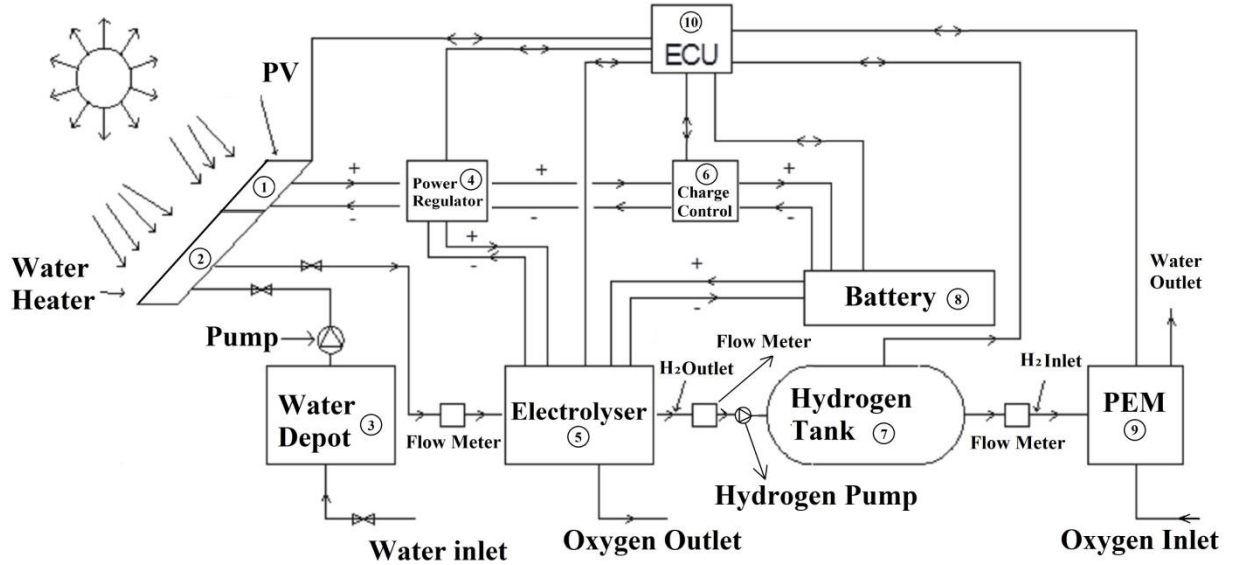


Figure 1. Schematic drawing of the simulated system

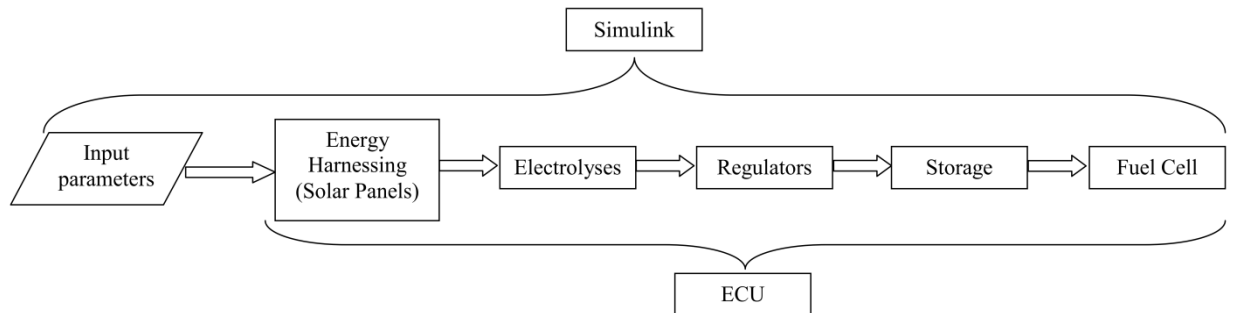


Figure 2. Main flow chart of the simulation system

Table 1. Input parameters of the system

Solar Radiation of Konya	Ambient Air Temperature	Electrolyzer Stack Temperature (K)	Electrolyzer Stack Pressure (kPa)	Electrical Conversion Efficiency of the PV System (%)
Monthly average values for 12 months (January to December)		353	100	11.5
		373	200	13.5
		393	400	17
		473		

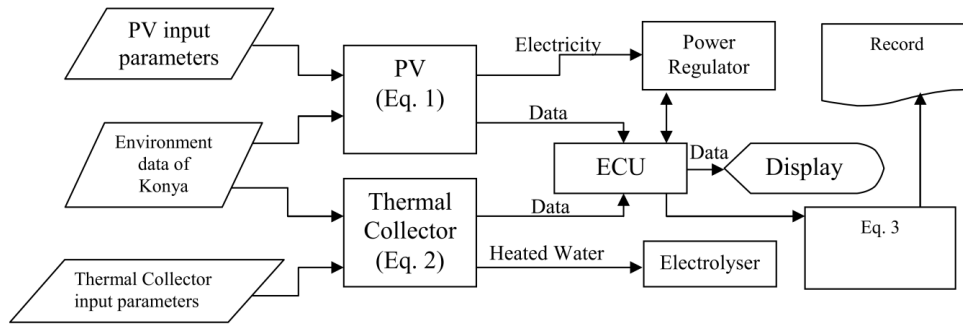


Figure 3. Energy harnessing sub system

The generated energy in the form of electricity in the PV can be expressed as following (Padin *et al.*, 2000):

$$E_{PV} = \eta_{PV} A_{PV} qC \tag{1}$$

Here E_{PV} is the generated electricity amount in Watt, η_{PV} is electricity efficiency of the solar panels, A_{PV} is the area of the PV panels, q is the heat flux in radiation form of solar energy per unit area. C is the correction factor. Generated thermal energy is as following (Padin *et al.*, 2000);

$$E_{SC} = \eta_{SC} A_{SC} qC \tag{2}$$

Again E_{SC} is the thermal energy transferred to the water in Watt, η_{SC} is thermal efficiency of the thermal solar collectors, A_{SC} is the area of the thermal solar collectors. Total solar energy harnessed by the collectors is:

$$E_{tot} = qC(\eta_{PV} A_{PV} + \eta_{SC} A_{SC}) \tag{3}$$

The second sub system is the electrolyzer sub system. Figure 4 presents this sub system and following are the related equations. Electricity is provided to the electrolyzer in two ways. The whole electricity generated from the PV system is directed to the power regulator. A portion of this energy is sent to the electrolyzer while the remaining part is sent to batteries in order to provide electricity to the electrolyzer when the generated electricity from PV system is insufficient.

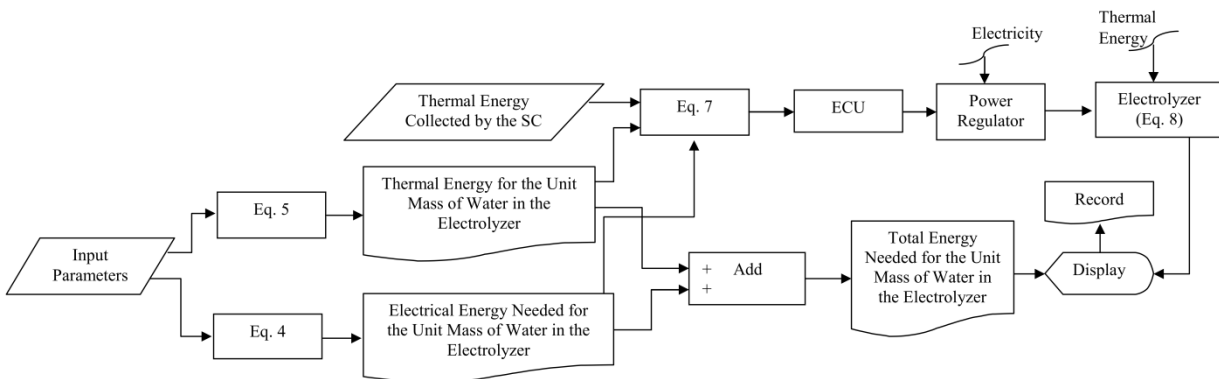


Figure 4. Electrolyzer sub system

The electrical energy electrolyzer uses for the unit mass of water can be expressed as following (Rzayeva *et al.*, 2001):

$$e_e = U/R(6.5 \times 10^{-5} T \ln(P)) \quad (4)$$

Here U is the voltage needed for the electrolyses and it is between $U = 1.233 - 1.48$ in Volts. R is the electrolyzer resistance in ohm (Ω), T stands for Temperature of the electrolyzer in Kelvin, P stands for the pressure of the electrolyzer in kPa. Thermal energy entering to the electrolyzer via solar collector for unit mass of water is (Padin *et al.*, 2000);

$$e_{th} = T\Delta s/t \quad (5)$$

Δs is the entropy difference for the electrolysis of the unit mass of water which is 116 J/kgK. t stands for time in seconds. Total energy consumption of the electrolyzer is:

$$e_{tot} = e_e + e_{th} \quad (6)$$

The electrical energy needed by the electrolyzer is calculated by:

$$E_{elec} = \left(\frac{E_{SC}}{e_{th}} \right) e_e \quad (7)$$

The hydrogen generated by the electrolyzer is:

$$\dot{m}_{H_2O} = \frac{E_{SC}}{9e_{th}} \quad (8)$$

The third sub system is the power regulator which regulates the amount of electricity sent to batteries and the electrolyzer. Figure 5 is arranged for the power regulator.

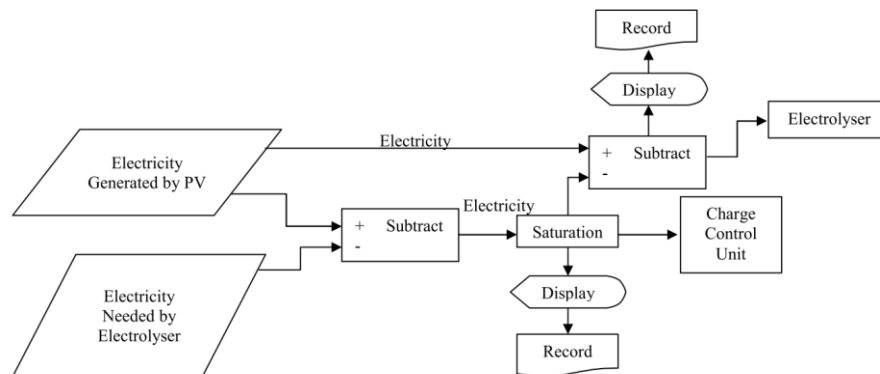


Figure 5. Power regulator sub system

The whole electricity generated from the PV system is directed to the power regulator. A portion of this energy is sent to the electrolyzer while the remaining part is sent to batteries in order to provide electricity to the electrolyzer when the generated electricity from PV system is insufficient. The extra

energy remained from the PV after the need of the electrolyzer is subtracted can be calculated by (9) and the stored electrical energy in the batteries can be calculated by the following equation.

$$E_{ex} = E_{PV} - E_{elec} \quad (9)$$

$$E_{bat} = \eta_{ch} \eta_{bat} E_{ex} \quad (10)$$

η_{ch} and η_{bat} are efficiencies of charge control unit and the battery unit respectively and 0.9 was assumed for both of them. The cell voltage of the PEM fuel cell can be found by (Ziogou *et al.*, 2011):

$$V_{cell} = E_{Nernst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (11)$$

E_{Nernst} is the voltage without load in V, V_{act} is the activation voltage drop in V, V_{ohm} is the ohmic voltage in V and V_{conc} is the excess voltage in V here. The electricity generated by the PEM is:

$$P = I \times V_{cell} \quad (12)$$

The Nernst equation is provided below (Larminie *et al.*, 2003):

$$E = E_0 - 0.85 \times 10^{-3} (T - 298.15) + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{0.5}}{P_{H_2O} P^{0.5}} \right) \quad (13)$$

Here E_0 is the reference voltage in V, R is the universal gas constant in J/molK, T stands for temperature in K, F is the Faraday constant in °C/mol and P stands for partial pressures in atm. The activation voltage can be calculated by the Tafel equation (Amphlett *et al.*, 1995).

$$V_{act} = -E_{act} = - \left[\begin{array}{l} -0.9514 + 0.00312T \\ -0.000187T(\ln I) \\ + 7.4 \times 10^{-5} T(\ln CO_2) \end{array} \right] \quad (14)$$

CO_2 here can be calculated from the following empirical formula (Amphlett *et al.*, 1995).

$$CO_2 = \frac{P_{O_2}}{5.08 \times 10^6 \exp(-498/T)} \quad (15)$$

The effect of double layer capacitance of the inter layer of electrode and electrolyte can be defines as (Larminie *et al.*, 2003):

$$\frac{dV_{act}}{dt} = \frac{I}{C_{dl}} - \frac{V_{act}}{R_{act} C_{dl}} \quad (16)$$

C_{dl} here is the double layer capacitance and R_{act} is the activation resistance in $k\Omega.cm^2$ which can be calculated by dividing V_{act} to the cell current. The voltage drop for the average current is nearly linear and ohmic in its natural state (Ceraolo *et al.*, 2003).

$$V_{ohm} = IR_{mem} \quad (17)$$

R_{mem} is the resistance of the membrane. It can be calculated by (18) (Ural, 2007).

$$R_{mem} = \frac{t_m}{\sigma} \quad (18)$$

t_m is the thickness of the membrane in cm and σ is the conductivity of the membrane. In order to define concentration of the proton (C_{H^+}), the empirical formula (19) is given and σ can be estimated by using (20) (Marr and Li, 1997).

$$\frac{dC_{H^+}}{dt} + \frac{C_{H^+}}{\tau_{H^+}} = \frac{1 + \alpha_H + I^3}{\tau_{H^+}} \quad (19)$$

$$\sigma = \frac{F^3}{RT} D_{H^+} C_{H^+} \quad (20)$$

Cell potential decreases rapidly due to mass transfer limitations at higher electrical currents. This non linear behavior is called excess voltage (Kim *et al.*, 1995) and can be calculated by using the following empirical formula:

$$\begin{aligned} V_{conc} &= a \times e^{(bt)} \\ a &= 1.1 \times 10^{-4} - 1.2 \times 10^{-6} (T - 273) \\ b &= 8 \times 10^{-3} \end{aligned} \quad (21)$$

Using conservation law, governing equations and reactant flow model together while assuming ideal gas law for the dynamic analyses, (22) can be constituted (Gemmen, 2001).

$$\frac{V}{RT} \frac{dP_g}{dt} = m_{in} - m_{out} \pm \frac{I}{nF} \quad (22)$$

V stands for volume here in m^3 and m stands for flow rate in mol. n is the number of electrons for each molecule. Equation (22) can be modified for anode and cathode as stated in (23) and (24) respectively (Gemmen and Farmouri, 2002).

$$\begin{aligned} \frac{V_a}{RT} \frac{dP_{H_2}}{dt} &= m_{H_2in} - m_{H_2out} - \frac{I}{2F} \\ m_{H_2out} &= k_a (P_{H_2} - P_{amb}) \\ m_{H_2in} &= FR_{H_2} PC_{H_2} CF_{H_2} \end{aligned} \quad (23)$$

$$\frac{V_c}{RT} \frac{dO_2}{dt} = m_{O_2in} - m_{O_2out} - \frac{I}{4F}$$

$$m_{O_2out} = k_c (P_{O_2} - P_{amb})$$

$$m_{O_2in} = FR_{O_2} PC_{O_2} CF_{O_2}$$
(24)

RESULT AND DISCUSSION

Konya is located in northern hemisphere of the world and it is above tropic of cancer. The latitudes are 36041' and 39016' while longitudes are 31014' and 34026'. Due to its geographical location, it receives favorable amount of solar radiation in respect of energy. Figure 6 gives a good idea of the PV electricity generation potential of the site and the region. Since real world data of the insolation periods and solar radiation were used for the calculations, one can see that there is an electricity generation potential for the whole year and this potential reaches to a maximum during summer months which are June, July and August. Of course the conversion efficiency of the PV system plays a crucial role for the system power output and determines the basic payback period of the system. This is particularly important for the investors. The efficiencies in Figure 6 cover a practical range and these values are long achieved by the manufacturers not only at cell level but also for the laminated panels.

For the first part of the results section, three PV efficiencies were taken into consideration. These values are 11%, 13.5% and 17%. It can be seen from Figure 6 that the maximum power harnessed from the PV setup can reach to 1800 W at peak solar insolation months while the minimum amount is about 300 W.

Four different electrolyzer temperatures were considered and these are 353 K, 373 K, 393 K and 473 K. This is particularly important since the design and material selection of such system are done accordingly. Higher temperatures were not considered because this temperature interval is appropriate for small scale systems and easy to handle for operation. Additionally three different electrolyzer pressures were used and these values are 100 kPa, 200 kPa and 400 kPa. Simulations were run for these aforementioned parameters and values. Data can be illustrated by three dimensional graphics however reading those graphics is difficult so two dimensional graphics are preferred instead. These graphics are presented for constant electrolyzer temperatures and constant electrolyzer pressures. Results indicate that thermal energy input reduces electricity need of the electrolyzer for the same amount of generated hydrogen and temperature of the electrolyzer increases the hydrogen generated.

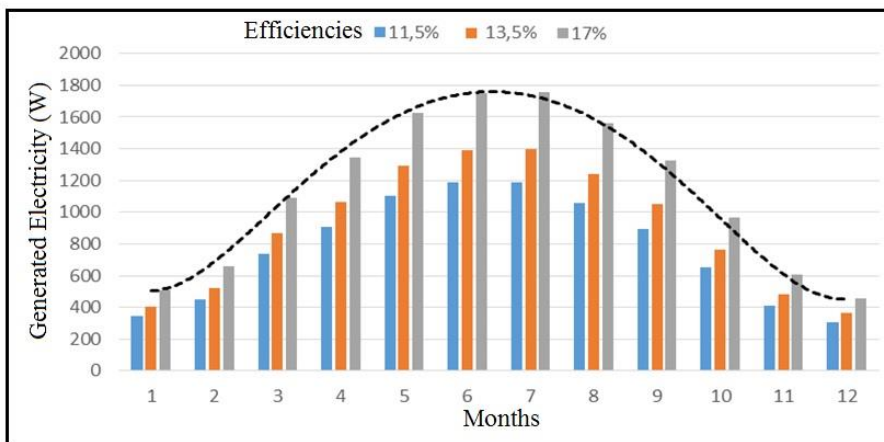


Figure 6. Electrical energy generation for different PV efficiencies versus monthly average insolation periods of KONYA

The energy required for the electrolysis is equal to the change of enthalpy (Padin *et al.*, 2000):

$$\Delta H = \Delta G + \Delta Q = 68.3 \text{ kcal/mol} \quad (25)$$

Here ΔG is Gibbs free energy and ΔQ is the change of thermal energy per mol of water. While equations (4), (5), (7) and (8) in mind, equation (25) is very useful for the evaluation of the following figures. Since total energy is constant for an amount of water to be spliced by electrolysis, the thermal energy input reduces the electrical energy input for the same amount of generated hydrogen. In other words, more hydrogen can be generated for the same amount of electricity generated from PV panels by means of increasing thermal energy input. Because of there is storage opportunity for the electricity and thermal energy obtained from the solar collectors should be used instantly, particularly for the systems away from the grid support and there is no need for the excess thermal energy, this option seems logical. A portion of electricity can be stored for the periods with no sun light. By this way, constant hydrogen generation can be attained during day and night. Hence this scenario can be observed and examined by figures 7, 8, 9 and 10. These figures should be evaluated together. A three dimensional figure can lower the number of figures however this time reading data becomes difficult.

The effect of electrolyzer temperature and pressure can be observed in used electricity in the electrolyzer and the difference in generated hydrogen considering the equation (4) and (5). Temperature and pressure affect the unit energies by affecting Gibbs free energy and the entropy difference for the thermal energy input. These effects are relatively small though, because the main determining mechanism is the energy input to the system determining the share of the electricity and the thermal energy in the electrolysis process.

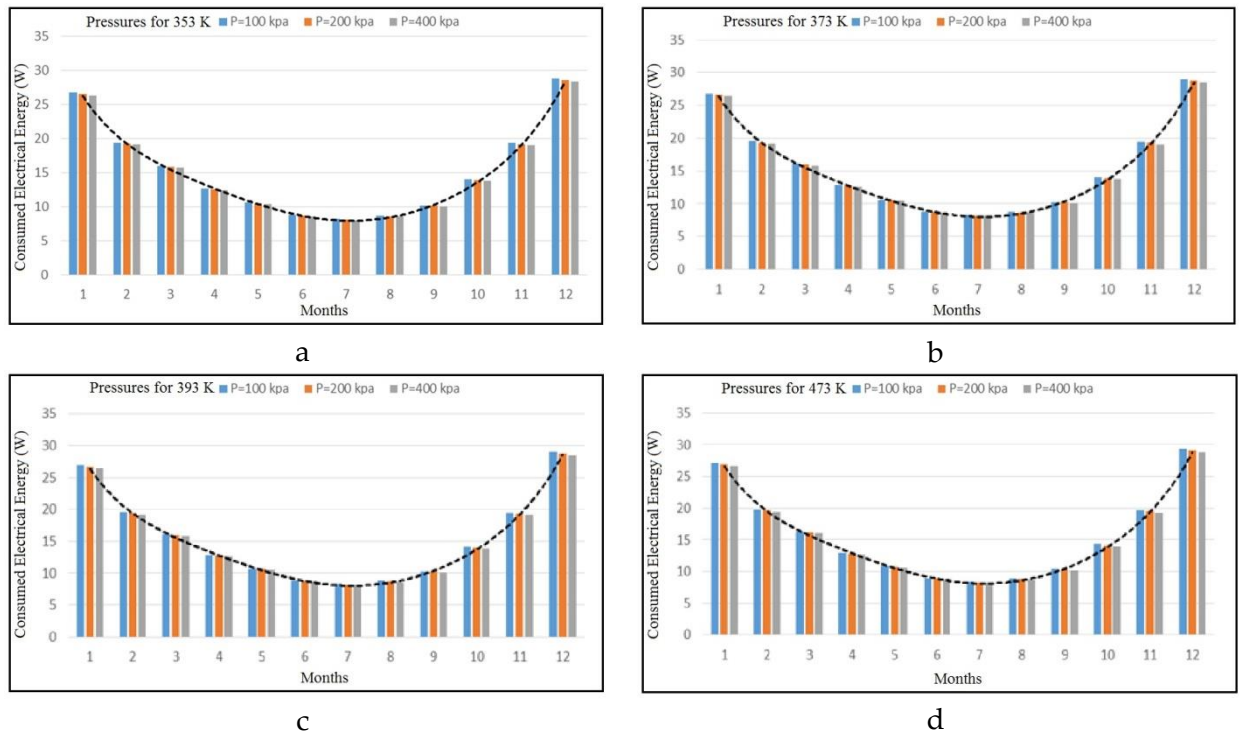


Figure 7. Electrolyzer electricity consumption for fixed temperatures

The share of the electricity in the electrolysis process goes down with the increase in the thermal energy input to the electrolyzer. PVs with integrated heat exchangers, i.e. PVTs, are of interest due to this fact. Thermal heat collectors cool down the PVs in order to protect their efficiency levels while generates heat energy for various aims, reducing electricity need of the electrolyzer for the generated hydrogen amount this time. The least or minimum values can be seen in summer months because of the

increasing thermal energy which is directly supplied to the electrolyzer without any thermal store or waste heat. The electricity power changes between 8 Watts and 29 Watts in the season.

The change in electrolyzer pressure reduces the need of electricity in a slight manner while the temperature of the electrolyzer increases electricity need slightly due to the change in the unit electrical energy need for the Gibbs free energy.

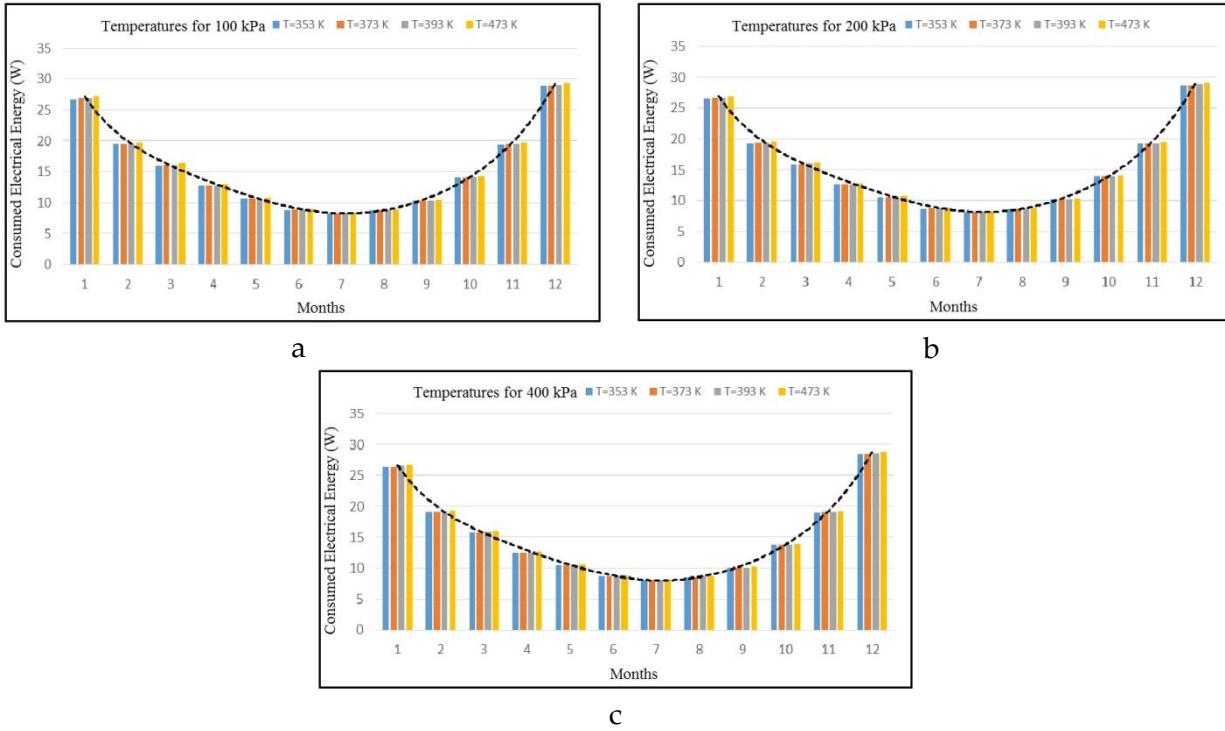


Figure 8. Electrolyzer electricity consumption for fixed pressures

On the other hand temperature directly affects the generated hydrogen throughout the year. While hydrogen amounts between 120 g/m and 132 g/m can be obtained by the proposed system, the contribution of the temperature level is nearly 10% to the production. This is due to the change of entropy levels with temperature. The thermal energy enters to the system is spent with lesser unit energy cost when the temperature is relatively high. These data clearly show that higher temperatures yield higher hydrogen generation rates. This evaluation is also made by several scientists whose reports indicates information about this phenomenon and one example can be find in Padin *et al.* (2000). As an instance for the hydrogen production, 130.94 g/h is generated in July for the 473 K and 100 kPa. For the 393 K, the hydrogen production drops to approximately 127.5 g/h and the remaining two values are 126.5 g/h and 125.5 g/h for 373 K and 353 K respectively. In the reference work of Ngoh *et al.* (2014) similar to this work, the theoretical production rate of hydrogen per second and per day recorded from simulation of interconnected system based on optimum scenario are respectively 0.064 kg/s and 1843.2 kg/day. The fresh water consumption rate in that study is around 0.7168 kg/s. So the fresh water required per day is stated as 30.967 m³. Boudries (2013) on the other hand reported the mean value over the country of the hydrogen production potential per unit cell area is about 0.14 kg H₂/m² day for the least favorable month; while this value is about 0.19 kg H₂/m² day for the most favorable month. Parabolic trough reflector stated as an alternative in that study, yielded results as about 0.10 kg H₂/m² day for the least favorable month and about 0.17 kg H₂/m² day for the most favorable month. Of course there are still differences in parameters and environmental inputs with these studies and present work. However, they still indicate the potential of the hydrogen electrolysis and the possibility to use hydrogen as an energy vector.

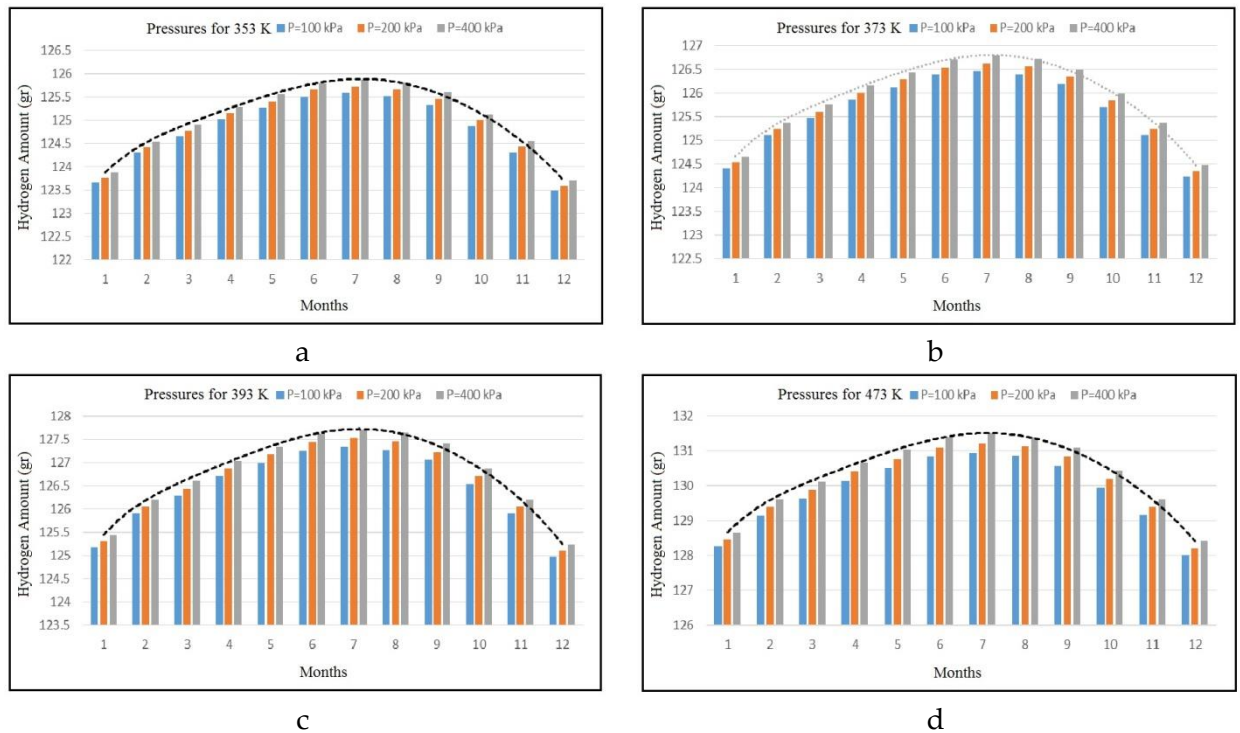


Figure 9. Generated hydrogen amount in the electrolyzer electricity consumption for fixed temperatures

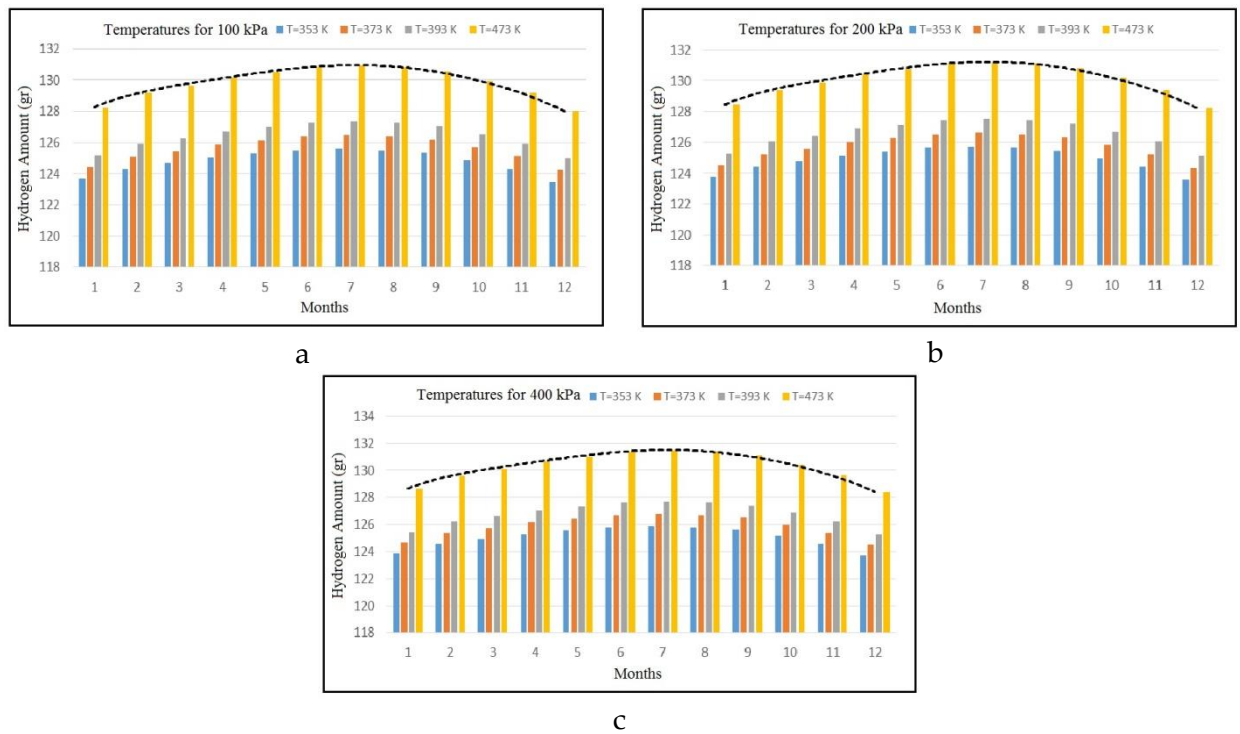


Figure 10. Generated hydrogen amount in the electrolyzer electricity consumption for fixed pressures

For the second part of the results section, three different hydrogen flow rate were selected for the simulation of PEM fuel cell; namely 5.5, 8 and 11.2 Standard Liter per Minute (SLPM). 1.5 seconds time was taken as the simulation duration. Two magnitudes were monitored and presented here; the power of the PEM fuel cell in Watts and the output voltage in Volts. The response of the system is very fast so the time axis was plotted with logarithmic scale in order to ease reading.

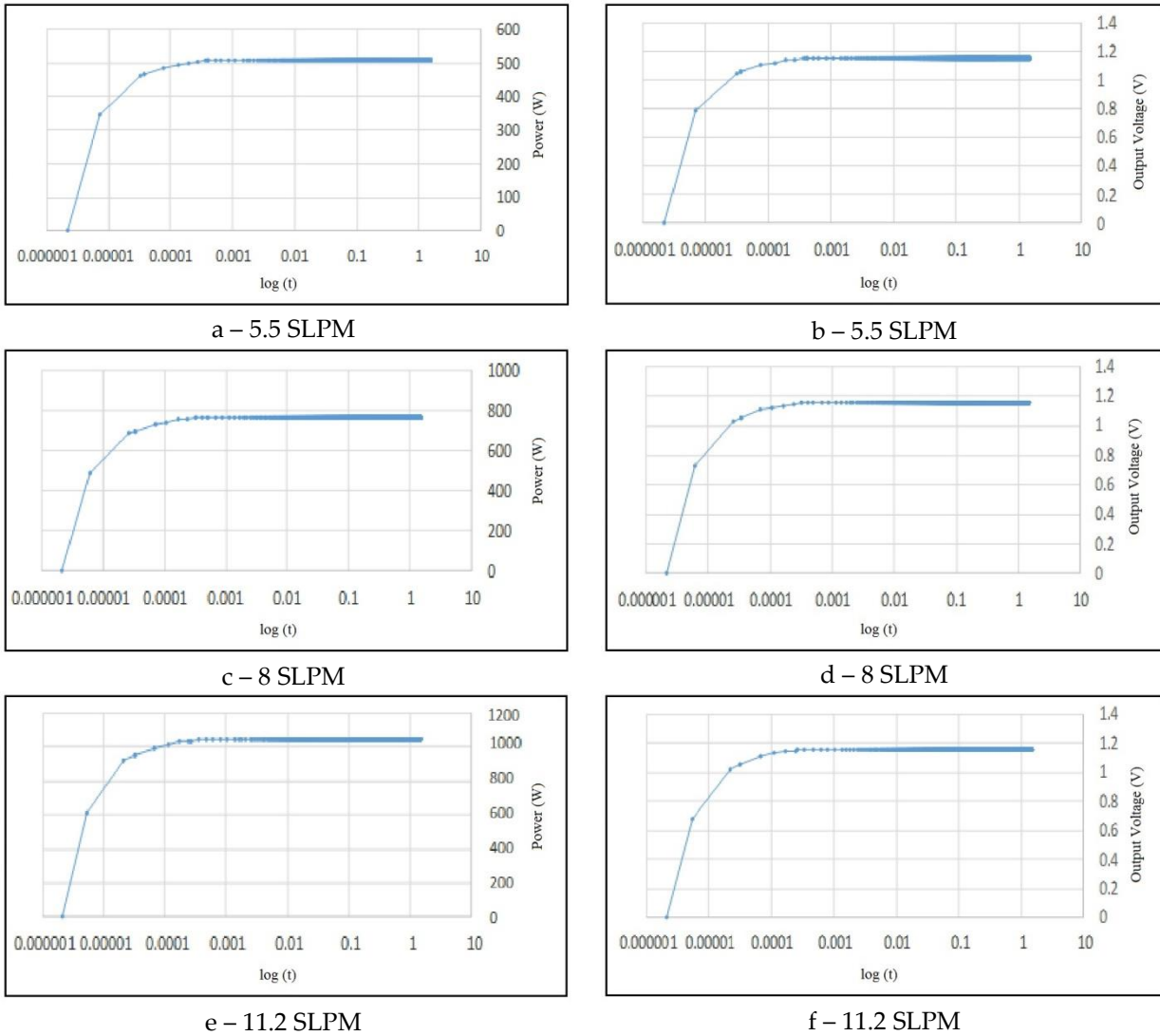


Figure 11. Fuel cell power curve on the left column and voltage curve on the right column

The modeled PEM fuel cell nominal power output is 500 W. The DC voltage is 23 V and current is 22 A for this nominal output power. Although the maximum power of the PEM fuel cell is 1100 W, the actual maximum is about 1000 W due to the internal resistances. DC voltage again can be taken as 23 V for this case. The obtained current in the other hand would be 45 A. The hydrogen input for the 500 W power is 5.5 SLPM. The hydrogen input to the PEM is 11.2 SLPM for 1000 W power output. 8 SLPM was selected as an internal value and the power output for this flow rate is about 760 W. The electrical current here is 33 A.

After a very short time, namely between 0.0001 and 0.001 seconds, the PEM fuel cell reaches to 500 W and 1.159 V for 5.5 SLPM flow rate of hydrogen. After this point, the system remains stable. For the 8 SLPM value, the power and voltage are 760 W and 1.159 V respectively for the same period. The response time is same for 11.2 SLPM with the previous flow rates while power output is 1000 W.

CONCLUSION

An experimental energy generation system to be established in Konya is simulated in this study in order to achieve the main objective that is proposing a system design that can be used for avoiding intermittent characteristics of the solar energy by means of hydrogen storage. The results were acquired

by means of MATLAB-SIMULINK™ and an in-house MATLAB code for the simulation which consists of electricity generation from PV panels, hydrogen generation by means of water electrolysis and using this generated hydrogen in a PEM fuel cell. Necessary graphics are plotted by using the results from the simulations.

Following conclusions can be drawn from the results.

- There is an electricity generation potential for the whole year and this potential reaches to a maximum during summer months which are June, July and August. The maximum power harnessed from the PV setup can reach to 1800 W at peak solar insolation months while the minimum amount is about 300 W.
- The conversion efficiency of the PV system plays a crucial role for the system power output and determines the basic payback period of the system.
- Hydrogen production is increasing with increasing temperature in electrolysis unit.
- Temperature and pressure affect the unit energies by affecting Gibbs free energy and the entropy difference for the thermal energy input.
- The share of the electricity in the electrolysis process goes down with the increase in the thermal energy input to the electrolyzer.
- As an instance for the hydrogen production, 130.94 g/h is generated in July for the 473 K and 100 kPa. For the 393 K, the hydrogen production drops to approximately 127.5 g/h and the remaining two values are 126.5 g/h and 125.5 g/h for 373 K and 353 K respectively.
- The chemical bonds between atoms in the molecules are weaker for the higher temperatures and Gibbs free energy required for the electrolysis is lower for the higher temperatures so the hydrogen generation at a high electrolyzer temperature is higher for a constant voltage and current. The energy that the electrolyzer uses is not increasing much with the increasing temperature or pressure.
- After a very short time between 0.0001 and 0.001 seconds, the PEM fuel cell reaches to 500 W and 1.159 V for 5.5 SLPM, 760 W and 1.159 V for the 8 SLPM and 1000 W for 11.2 SLPM.

For the future work, following remarks can be given.

- The designed system in the context of this study can be regarded as an ideal energy generation system for the rural areas.
- The stored hydrogen can be directly used as a clean and renewable fuel while it can be used in a PEM fuel cell in order to generate electricity.
- The electrolyzer is not a pressurized vessel in the study. Hence, the generated hydrogen should be stored in a pressurized can by means of a compressor. If the electrolyzer device can be defined as a pressurized volume, PEM fuel cell can be used directly without utilizing an additional storage and compressor.
- Since hydrogen storage by pressurizing is considered, various electrolyzer design including pressurized ones can be considered to be utilized.
- In the presence of a financial support, this simulation can be compared with the results of an experimental setup.
- Simulation can be enhanced by modeling the assumptions or integrating some more real world data into the simulation.

As a general self evaluation of the present work, a considerable contribution to the specific literature and the field is done. Presented data and the method can be used directly in order to give reference to an idea or can be improved for a more detailed work. Real world data were used in order to provide inputs for the simulated system and this is one of the novel contributions to the literature. The potential of the region in terms of hydrogen generation and solar energy utilization can be assessed. Another important contribution of the present work to the literature is the survey and evaluation of the similar works in an extensively manner. By this way one can use this paper to assess the application with a wide

perspective. The simulation presented here can be used in order to avoid costly trial and error approaches or in other words reduce the possibilities.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors of this work would like to acknowledge the help and support of Selcuk University.

REFERENCES

- Akyildiz, H., Öztürk, T., 2013, "Production of mg-Mased Amorphous/Nanostructured Thin Films from Multi-Elemental Sources for Hydrogen Storage Applications", *J. Fac.Eng.Arch. Selcuk Univ.*, Vol. 28(1), pp. 1-10.
- Ali, D., Gazey, R., Aklil, D., 2016, "Developing a Thermally Compensated Electrolyzer Model Coupled with Pressurized Hydrogen Storage for Modeling the Energy Efficiency of Hydrogen Energy Storage Systems and Identifying Their Operation Performance Issues", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 66, pp. 27-37.
- Allison, J., 2017, "Robust Multi-Objective Control of Hybrid Renewable Microgeneration Systems with Energy Storage", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 114, pp. 1498-1506.
- Amusat, O.O., Shearing, P.R., Fraga, E.S., 2017, "On the Design of Complex Energy Systems: Accounting for Renewable Variability in Systems Sizing", *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 103, pp. 103-115.
- Amphlett, J.C., Baumert, R.M., Mann, R.F., Peppley, B.A., Roberge, P.R., Harris, T.J., 1995, "Performance Modeling of the Ballard-Mark-Iv Solid Polymer Electrolyte Fuel-Cell: 1. Mechanistic Model Development", *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 142(1), pp. 1-8.
- Bai, M., Song, K., Sun, Y., He, M., Li, Y., Sun, J., 2014, "An Overview of Hydrogen Underground Storage Technology and Prospects in China", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 124, pp. 132-136.
- Baricco, M., Bang, M., Fichtner, M., Hauback, B., Linder, M., Luetto, C., Moretto, P., Sgroi, M., 2017, "SSH2S: Hydrogen Storage in Complex Hydrides for an Auxiliary Power Unit Based on High Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cells", *Journal of Power Sources*, Vol. 342, pp. 853-860.
- Boudries, R., 2013, "Analysis of Solar Hydrogen Production in Algeria: Case of an Electrolyzer-Concentrating Photovoltaic System", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 38(26), pp. 11507-11518.
- Ceraolo, M., Miulli, C., Pozio, A., 2003, "Modelling Static and Dynamic Behaviour of Proton Exchange Membrane Fuel Cells on the Basis of Electro-Chemical Description", *Journal of Power Sources*, Vol. 113(1), pp. 131-144.
- Chong, L.W., Wong, Y.W., Rajkumar, R.K., Rajkumar, R.K., Isa, D., 2016, "Hybrid Energy Storage Systems and Control Strategies for Stand-Alone Renewable Energy Power Systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 66, pp. 174-189.
- Esquivel, J.P., Buser, J.R., Lim, C.W., Domínguez, C., Rojas, S., Yager, P., Sabate, N., 2017, "Single-use Paper-Based Hydrogen Fuel Cells for Point-of-care Diagnostic Applications", *Journal of Power Sources*, Vol. 342, pp. 442-451.
- Fallisch, A., Schellhase, L., Fresko, J., Zechmeister, M., Zedda, M., Ohlmann, J., Zielke, L., Paust, N., Smolinka, T., 2017, "Investigation on PEM Water Electrolysis Cell Design and Components for a HyCon Solar Hydrogen Generator", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 42(19), pp. 13544-13553.
- Fan, X.C., Wang, W.Q., Shi, R.J., Cheng, Z.J., 2017, "Hybrid Pluripotent Coupling System with Wind and Photovoltaic-Hydrogen Energy Storage and the Coal Chemical Industry in Hami, Xinjiang", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 72, pp. 950-960.

- Gemmen, R.S., 2001, *ASME International Mechanical Engineering Congress and Expositions*, New York.
- Gemmen, R.S., Farmouri, P., 2002, "Power Electronics for Fuel Cells Workshop", *University of California, Irvine, National Fuel Cell Research Center*.
- Guida, D., Minutillo, M., 2017, "Design Methodology for a PEM Fuel Cell Power System in a more Electrical Aircraft", *Applied Energy*, Vol. 192, pp. 446-456.
- Guo, K., PrevotEAU, A., Rabaey, K., 2017, "A Novel Tubular Microbial Electrolysis Cell for High Rate Hydrogen Production", *Journal of Power Sources*, Vol. 356, pp. 484-490.
- Guo, J., Xing, L., Hua, Z., Gu, C., Zheng, J., 2016, "Optimization of Compressed Hydrogen Gas Cycling Test System based on Multi-Stage Storage and Self-Pressurized Method", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 41(36), pp. 16306-16315.
- Hu, K., Chen, L., Chen, Q., Wang, X.H., Qi, J., Xu, F., Min, Y., 2017, "Phase-change Heat Storage Installation in Combined Heat and Power Plants for Integration of Renewable Energy Sources into Power System", *Energy*, Vol. 124, pp. 640-651.
- Izgi, M.S., Odemis, O., Sahin, O., Saka, C., 2016, "Effect of NaOH in Hydrogen Production from NaNH_4 by using Co-B-F and Co-B-P catalysts", *SUJEST*, Vol. 4(1), pp. 55-64.
- Jia, F., Guo, L., Liu, H., 2017, "Mitigation Strategies for Hydrogen Starvation under Dynamic Loading in Proton Exchange Membrane Fuel Cells", *Energy Conversion and Management*, Vol. 139, pp. 175-181.
- Kim, J., Lee, S.M., Srinivasan, S., Chamberlin, C.E., 1995, "Modeling of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Performance with an Empirical Equation", *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 142 (8), pp. 2670-2674.
- Kivrak, H., Demir, N.C., Sahin, O., 2013, "Electrocatalytic Properties of Nanostructured Multimetallic Pt-Sn-Cs/C and Pt-M/C (M=Ag, Ca, Cd, Cs, Cu, Fe, Ir, Mg, Pd, Sn, Zr) Direct Ethanol Fuel Cell Catalysts", *Selcuk Univ. J. Eng. Sci. Tech.*, Vol. 1(2), pp. 19-28.
- Kleiner, F., Posern, K., Osburg, A., 2017, "Thermal Conductivity of Selected Salt Hydrates for Thermochemical Solar Heat Storage Applications Measured by the Light Flash Method", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 113, pp. 1189-1193.
- Kumar, S., Jain, A., Ichikawa, T., Kojima, Y., Dey, G.K., 2017, "Development of Vanadium Based Hydrogen Storage Material: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 72, pp. 791-800.
- Larminie, J., Dicks, A., McDonald, M.S., 2003, *Fuel Cell Systems Explained*, Wiley, New York.
- Lashgari, M., Elyas-Haghighi, P., Takeguchi, M., 2017, "A Highly Efficient pn Junction Nanocomposite Solar-Energy-Material [nanophotovoltaic] for Direct Conversion of Water Molecules to Hydrogen Solar Fuel", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol. 165, pp. 9-16.
- Mamaghani, A.H., Najafi, B., Casalegno, A., Rinaldi, F., 2017, "Predictive Modelling and Adaptive Long-Term Performance Optimization of an HT-PEM Fuel Cell based Micro Combined Heat and Power (CHP) Plant", *Applied Energy*, Vol. 192, pp. 519-529.
- Marr, C., Li, X., 1997, "An Engineering Model of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Performance", *ARI-An International Journal for Physical and Engineering Sciences*, Vol. 50(4), pp. 190-200.
- Mohamed, W.A.N.W., Kamil, M.H.M., 2016, "Hydrogen Preheating Through Waste Heat Recovery of an Open-Cathode PEM Fuel Cell Leading to Power Output Improvement", *Energy Conversion and Management*, Vol. 124, pp. 543-555.
- Ngoh, S.K., Ohandja, L.A., Kemajou, A., Monkam, L., 2014, "Design and Simulation of Hybrid Solar High-Temperature Hydrogen Production System using both Solar Photovoltaic and Thermal Energy", *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 7, pp. 279-293.
- Nieskens, D.L.S., Ferrari, D., Liu, Y., Kolonko R., 2011, "The Conversion of Carbon Dioxide and Hydrogen into Methanol and Higher Alcohols", *Catalysis Communications*, Vol. 14(1), pp. 111-113.
- Nojavan, S., Zare, K., Mohammadi-Ivatloo, B., 2017, "Application of Fuel Cell and Electrolyzer as Hydrogen Energy Storage System in Energy Management of Electricity Energy Retailer in the

- Presence of the Renewable Energy Sources and Plug-in Electric Vehicles”, *Energy Conversion and Management*, Vol. 136, pp. 404-417.
- Ostrovskii, V.E., 2002, “Mechanisms of Methanol Synthesis from Hydrogen and Carbon Oxides at Cu-Zn-containing Catalysts in the Context of Some Fundamental Problems of Heterogeneous Catalysis”, *Catalysis Today*, Vol. 77(3), pp. 141-160.
- Padin, J., Veziroglu, T., Shahin, A., 2000, “Hybrid Solar High-Temperature Hydrogen Production System”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 25(4), pp. 295-317.
- Rzayeva, M., Salamov, O., Kerimov, M., 2001, “Modeling to Get Hydrogen and Oxygen by Solar Water Electrolysis”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 26(3), pp. 195-201.
- Sayin, S., Koç, I., 2011, “Güneş Enerjisinden Aktif Olarak Yararlanmada Kullanılan Fotovoltaik (PV) Sistemler ve Yapılarda Kullanım Biçimleri”, *J. Fac.Eng.Arch. Selcuk Univ.*, Vol. 26(3), pp. 89-106. (in Turkish)
- Shekardasht, S.J., 2016, *An Investigation on Generation of Solar Powered (pv) and Applications in Hydrogen Fuel Cells*, MSc Thesis, Selcuk University Institute of Natural and Applied Sciences, Konya TURKEY. (in Turkish)
- Ural, Z., 2007, *Yakıt Pilleri ve Bir PEM Yakıt Pili Sisteminin Dinamik Benzetimi*, MSc Thesis, Dicle University, Institute of Natural Sciences.
- Vincent, I., Kruger, A., Bessarabov, D., 2017, “Development of Efficient Membrane Electrode Assembly for Low Cost Hydrogen Production by Anion Exchange Membrane Electrolysis”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Article In Press, 1-10. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.03.069>)
- Yu, X., Tang, Z., Sun, D., Ouyang, L., Zhu, M., 2017, “Recent Advances and Remaining Challenges of Nanostructured Materials for Hydrogen Storage Applications”, *Progress in Materials Science*, Vol. 88, pp. 1-48.
- Zhang, L., Zhu, X., Cao, Z., Wang, Z., Li, W., Zhu, L., Li, P., Huang, X., Lü, Z., 2017, “Pr and Ti co-doped Strontium Ferrite as a Novel Hydrogen Electrode for Solid Oxide Electrolysis Cell”, *Electrochimica Acta*, Vol. 232, pp. 542-549.
- Zhong, H., Ouyang, L.Z., Ye, J.S., Liu, J.W., Wang, H., Yao, X.D., Zhu, M., 2017, “An One-step Approach Towards Hydrogen Production and Storage Through Regeneration of NaBH₄”, *Energy Storage Materials*, Vol. 7, pp. 222-228.
- Ziougou, C., Voutetakis, S., Papadopoulou, S., Georgiadis, M.C., 2011, “Modeling, Simulation and Experimental Validation of a PEM Fuel Cell System”, *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 35(9), pp. 1886-1900.