



ISSN : 2458-7494

E-ISSN: 2458-7613

KIRKLARELİ ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK ve FEN BİLİMLERİ DERGİSİ

KIRKLARELİ UNIVERSITY
JOURNAL of ENGINEERING and SCIENCE

Cilt / Volume: 4

Sayı / Number: 2

Aralık / December 2018

Kırklareli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü

<http://fbedergi.klu.edu.tr>

e-mail:fbedergi@klu.edu.tr

editor@klu.edu.tr



KIRKLARELİ ÜNİVERSİTESİ / KIRKLARELİ UNIVERSITY
MÜHENDİSLİK ve FEN BİLİMLERİ DERGİSİ / JOURNAL of ENGINEERING and SCIENCE

Sahibi / Owner

Kırklareli Üniversitesi Rektörlüğü Adına / Owner on Behalf of Kırklareli Rectorship
Prof. Dr. Bülent ŞENGÖRÜR (Rektör)

Baş Editör / Editor in Chief

Doç. Dr. Erol TÜRKEŞ

Editörler / Editors

Dr. Öğr. Üyesi Burak ÖZŞAHİN
Dr. Öğr. Üyesi Erdiç KESKİN

Yayın Kurulu / Editorial Board

Prof. Dr. Bülent ŞENGÖRÜR
Prof. Dr. A. Sabih ATADAN
Doç. Dr. Erol TÜRKEŞ
Doç. Dr. Meryem ÇAMUR
Doç. Dr. Serpil AKÖZCAN
Dr. Öğr. Üyesi Burak ÖZŞAHİN
Dr. Öğr. Üyesi Erdiç KESKİN
Dr. Öğr. Üyesi Sencer Süreyya KARABEYOĞLU

Sorumlu Yazı İşleri Müdürü / Editing Manager

Davut CEYLAN

İnternet Adresi / Web Address

<http://fbedergi.klu.edu.tr>

Yazışma Adresi / Correspondence Address

Kırklareli Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü
Rektörlük Kültür Merkezi B Blok Merkez/ Kırklareli
e-mail: fbedergi@klu.edu.tr
Tel: 0 (288) 246 15 16
Fax: 0 (288) 246 16 02

Baskı / Publisher

Kırklareli Üniversitesi Matbaası / Kırklareli University Publishing Centre

Yayın Türü / Publication Type

Yaygın Süreli Yayın / International Periodical

Yılda iki kez yayınlanır: Haziran, Aralık / Twice a year: June, December

Bu sayı 100 adet basılmıştır / This issue published as 100 copies

Basım Tarihi / Publication Date: 31.12.2018



KIRKLARELİ ÜNİVERSİTESİ / KIRKLARELİ UNIVERSITY
MÜHENDİSLİK ve FEN BİLİMLERİ DERGİSİ / JOURNAL of ENGINEERING and SCIENCE

Danışma Kurulu / Advisory Board

Abdurrahman GÜNER, İstanbul Esenyurt Üniversitesi, İstanbul
A. Fevzi BABA, Marmara Üniversitesi, İstanbul
A. Sabih ATADAN, Kırklareli Üniversitesi, Kırklareli
Aleksandar GEORGIEV, Sofya Teknik Üniversitesi, Bulgaristan
Asım KURTOĞLU, Kırklareli Üniversitesi, Kırklareli
Bilal BALKAN, Kırklareli Üniversitesi, Kırklareli
Bülent AKBAŞ, Gebze Teknik Üniversitesi, Kocaeli
Bülent ŞENGÖRÜR, Kırklareli Üniversitesi, Kırklareli
Deris STIAWAN, Sriwijaya University, Endonezya
Emrah DOĞAN, Sakarya Üniversitesi, Sakarya
Erhan BUDAK, Sabancı Üniversitesi, İstanbul
Erol TÜRKEŞ, Kırklareli Üniversitesi, Kırklareli
Fahri VATANSEVER, Uludağ Üniversitesi, Bursa
F.Onur HOCAOĞLU, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar
Gökhan GÖKMEN, Marmara Üniversitesi, İstanbul
Göksel DEMİR, Kırklareli Üniversitesi, Kırklareli
Hasan DEMİR, Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ
Hatice ŞANLIDERE ALOĞLU, Kırklareli Üniversitesi, Kırklareli
İsmail KIYAK, Marmara Üniversitesi, İstanbul
Kadir GÜLER, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul
Kanat Burak BOZDOĞAN, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Çanakkale
Kamil KAHVECİ, Trakya Üniversitesi, Edirne
Lambros EKONOMOU, Hellenic American University, Yunanistan
M. Hakan HOCAOĞLU, Gebze Teknik Üniversitesi, Kocaeli
Meryem ÇAMUR, Kırklareli Üniversitesi, Kırklareli
M.S. Bhaskar RANJANA, Marathwada Institute of Technology, Hindistan
Murat BOSTANCIOĞLU, Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas
Murat KARAHAN, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya
Mustafa BİRİNCİ, İnönü Üniversitesi, Malatya
Nadide SEÇKİN, Kırklareli Üniversitesi, Kırklareli
Oğuzhan ERBAŞ, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya
Osman KILIÇ, Marmara Üniversitesi, İstanbul
Osman Nuri UÇAN, İstanbul Kemerburgaz Üniversitesi, İstanbul
Özlem AYTEKİN, Kırklareli Üniversitesi, Kırklareli
Ramazan ÇAĞLAR, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul
Sarp ERTÜRK, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli
Serpil AKÖZCAN, Kırklareli Üniversitesi, Kırklareli
Sezai TAŞKIN, Celal Bayar Üniversitesi, Manisa
Veselina Nedeva, Trakia Üniversitesi, Bulgaristan
Yılmaz ÇAN, Trakya Üniversitesi, Edirne
Youcef Soufi, University of Tébessa, Cezayir
Yunus BİÇEN, Düzce Üniversitesi, Düzce
Yüksel OĞUZ, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar
Zafer AĞDELEN, Girne Amerikan Üniversitesi, KKTC
Witold Charatonik, University of Wroclaw, Polonya



KIRKLARELİ ÜNİVERSİTESİ / KIRKLARELİ UNIVERSITY
MÜHENDİSLİK ve FEN BİLİMLERİ DERGİSİ / JOURNAL of ENGINEERING and SCIENCE

İçindekiler / Contents

İsmail KIYAK, Tahsin BOYEKİN; COB LED'LERDE YAŞLANDIRMA VE ÖMÜR TAHMİNİ UYGULAMALI ANALİZİ (Araştırma)	153-162
Taner ÇARKIT, Mustafa ALÇI; BATARYA HÜCRELERİNDEKİ ELEKTROKİMYASAL GÜRÜLTÜLERİN İNCELENMESİ (Araştırma)	163-175
Murat AYDIN, Mustafa SOYDEMİR; SERBEST PARÇACIKLI MODÜLER ZIRH ÜRETİMİ (Araştırma)	176-188
Sadettin Cem ALTIPARMAK; ANALYSIS OF THERMAL EXPANSION AND MICRO-DELAMINATION PHENOMENON OF CUTTING TOOL THIN SURFACE COATINGS IN HIGH-SPEED DRY MACHINING (Araştırma)	189-211
İlker TULGA, Kadir KILINÇ; UÇUCU KÜL KULLANIMININ FARKLI DAYANIM SINIFLARINDAKİ BETONLARIN MEKANİK VE DURABİLİTE ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ (Araştırma)	212-236

COB LED'LERDE YAŞLANDIRMA VE ÖMÜR TAHMİNİ UYGULAMALI ANALİZİ

İsmail KIYAK^{*1} Tahsin BOYEKİN²

¹ Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü

² Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği ABD

ÖZET

Yeni teknolojiler ile birlikte LED (Light Emitting Diode, Işık Yayan Diyot) maliyet düşüşü, yüksek etkinlik faktörü ve yüksek renksel geri verim ile birlikte diğer aydınlatma ürünlerinin yerini almaya başlamıştır.

Bu çalışmada, ilk olarak LED'lerin sıcaklıkla ilişkisinden bahsedilmiştir. Sıcaklığın ve diğer değişkenlerin LED ömrüne etkisi araştırılmıştır. Bu araştırmalar sonucu oluşturulan yaşlandırma testleri gerçek zamanlı iki farklı yüksek güçlü LED'e uygulanıp LED ömrü tahmini analizleri yapılmıştır. Çalışmada, LED çipe ait kesin olarak bilinen süre ve jonksiyon sıcaklık verileri ve yüksek doğrulukla ölçülemeyen gerekli diğer parametrelerin bazı noktalarının filtrelenmesiyle ömür tahmini hesaplanmış olup diğer yöntemler ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: LED, LED Yaşlanma Davranışı, LED Ömrü Tahmini, LED Termal Davranış, LM-80, TM-21

*corresponding author: imkiyak@marmara.edu.tr

COB LED AGING and ANALYSIS of LIFETIME ESTIMATION

ABSTRACT

Along with new technologies, LED (Light Emitting Diode) has begun to replace other lighting products with cost reduction, high efficiency factor and high CRI (Color Rendering Index).

In this study, we will first talk about the temperature dependence of the LEDs. The effect of temperature and other variables on LED lifetime will be investigated. The results of these investigations will be applied to the aging tests LED, and LED lifetime estimates will be made. At the study, the exact time and junction temperature data of the LED chip and the junction of some points of other required parameters which cannot be measured with high accuracy are calculated and the life expectancy is calculated and compared with other methods.

Keywords: LED, LED Aging Behavior, LED Lifetime Estimation, LED Thermal Behavior, LM-80, TM-21

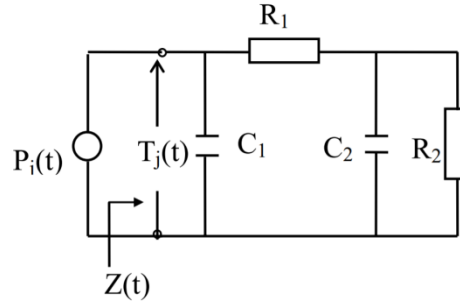
GİRİŞ

Yeni teknolojiler ile birlikte LED (Light Emitting Diode, Işık Yayan Diyot) maliyet düşüşü, yüksek etkinlik faktörü, yüksek renksel geri verim ve uzun ömür ile birlikte diğer aydınlatma ürünlerinin yerini almaya başlamıştır [1-4].

LED'ler iyi tasarlandığında verimli birer ışık kaynağıdır. Ancak kötü tasarım veya kalitesiz materyal ile üretildiğinde olumsuz sonuçlarla karşılaşmaktadır. Özellikle soğutma sistemi kötü olan LED'lerin ömürleri oldukça azalmaktadır [5-7]. Ayrıca armatürdeki LED çipin ömrü üretim aşamalarındaki kaliteyle doğru orantılıdır. Birçok firma LED ömrünü test yapmadan belirtmektedir. Bu sebeple bazı uygulamalar için LED kullanılmadan önce fabrika verilerinin doğruluğu test edilmelidir. Bu çalışmada test için LED yaşlandırma metotları kullanılarak elde edilen sonuçlar analiz edilmiştir. [8-11]

LED IŞIK ÇIKIŞINA SICAKLIĞIN ETKİSİ

LED'ler için en büyük problem olan sıcaklığın etkilerini azaltmak için iyi bir ısıl tasarıma ihtiyaç vardır. Bu tasarımın yeterli olup olmadığını kontrol etmek için de LED çalışırken jonksiyon sıcaklığını ölçmek gerekir. Bu ölçüm yapılamayacağı için jonksiyona yakın olan kısımlar ölçülüp hesaplama yöntemi ile bulunabilmektedir. Bir LED'in ısıl eşdeğer devresi Şekil 1'de görülmektedir [1].



Şekil 1: LED ısıl eşdeğer devresi

$P_j(t)$: jonksiyonda açığa çıkan ısıl güç

$T_j(t)$: jonksiyon sıcaklığı

$Z(t)$: jonksiyondan görülen ısıl empedans

C_1 : jonksiyondan kılıfa kadar olan bölgenin ısıl kapasitesi

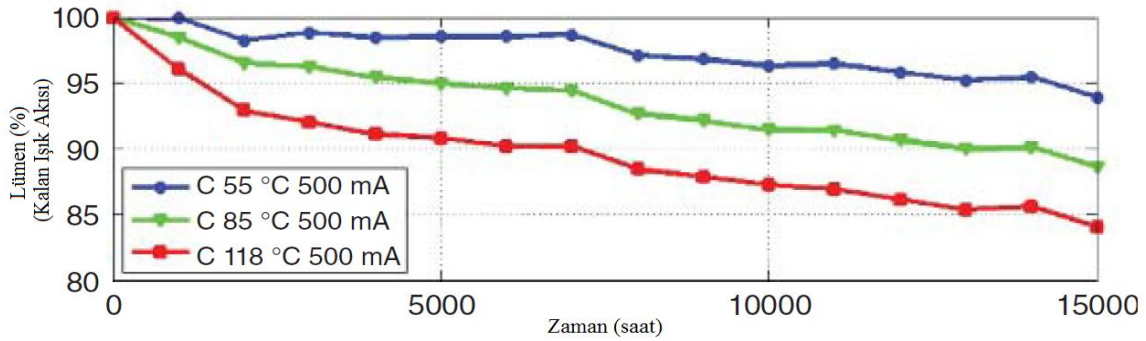
C_2 : kılıf bölgesinin ısıl kapasitesi

R_1 : jonksiyondan kılıfa kadar olan ısıl direnç

R_2 : kılıftan çevreye kadar olan ısıl direnç

LED jonksiyon sıcaklığına yakın değer bulabilmek için en yakın ısı değeri verebilecek olan kısımdan ölçüm yapılmalıdır. Bu konuda yapılan araştırmalar ve ölçümler sonucu katot kısımdan ölçüm daha uygundur.

LED'lerde sıcaklık etkisi Şekil 2'de görülmektedir. LED ömrü, ışık akısı, renk sıcaklığı gibi değerler sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Yüksek sıcaklığa maruz kalan LED bozulmaya uğramaktadır. Bu sebeple ısı tasarım ve LED sürücüsü oldukça önemlidir.



Şekil 2: Üç farklı sıcaklıkta LED'lerin lümen bakımından zamana bağlı grafiği [1]

LED'LERİN YAŞLANMA DAVRANIŞI

LED ürünlerinde, LED bileşenleri, belirli çalışma koşullarında akım, darbe genişlik modülasyonu (PWM), çalışma döngüsü ve hava şartlarına bağlı olarak değişen ortam sıcaklıklarında çalıştırılmaktadır. LED bileşenleri, devre kartı üzerine monte edilir veya diğer elektronik ünitelerden (sürüş ve kontrol elektroniği) ayrılır. Tüm bu bileşenler ve yapı birimleri zamanla bozulmaya uğrar. Bu da aydınlatma, termal, mekanik ve elektriksel parametrelerin değişmesine neden olur. LED bozulma davranışı sorunları aşağıdaki kategorilerde gruplandırılabilir:

- 1) Fotometrik büyüklüklerin amortismanı
- 2) Yayılan LED radyasyonun spektral ve renk özelliklerinin değişmesi
- 3) LED bileşenlerinin elektriksel ve termal özelliklerinin değişmesi[12]

LED'LERDE ÖMÜR BELİRLEME

LED çiplerin ömürleri birçok faktöre bağlıdır. Bu faktörlere örnek olarak, kullanılan malzemelerin cinsi, çalışma sıcaklığı, kullanım zamanı ve sürüş akımı verilebilir. Bu sebeple LED ömürleri, LED çip üreticilerine ve hatta aynı üretim bandındaki LED çipleri içinde bile

farklılık gösterebilir.

Ömür belirleme çalışmaları LED ışık kaynakları için 2000’li yıllarda başlamıştır. Merkezi Amerika Birleşik Devletlerinde olan **Lighting Research Center (LRC)** bünyesinde 2002 yılında kurulan Katı Hal Aydınlatma Sistemleri ve Teknolojileri Birliği (**The Alliance for Solid-State Illumination Systems and Technologies – ASSIST**) katı hal aydınlatma sistemlerinin ömürleri ile ilgili ilk öneri dokümanını “Genel Aydınlatma için LED Ömrü: Ömrün Tanımı” adıyla 2005 yılında yayınlamıştır. Bu dokümana göre LED’ler için LM80, LM70 ve LM50 sırasıyla ışık akısının ilk durumdaki haline göre %80’e, %70’e ve %50’ye düştüğü zamanı saat cinsinden belirtmektedir. ASSIST tarafından yayınlanan bu doküman 2008 yılında Aydınlatma Mühendisliği Topluluğu (**Illuminating Engineering Society – IES**) tarafından geliştirip IES LM-80-08 “LED Işık Kaynaklarının Işık Akısı Sürekliliğinin Ölçümü” adlı doküman olarak yayınlanmıştır. LM80, tekil LED çiplerinin ömür tahminlerinde kullanılan ölçüm yöntemlerini açıklamaktadır. 2011 yılında yayınlanan IES TM-21-11 “Ömür Öngörü Yöntemi” standardı ise LM80 verilerini kullanarak uzun dönem ışık akısı düşümü tahminlerine kullanılmaktadır. Ömür süreleri minimum 6000 saatlik laboratuvar ölçümleri hesaplanır ve armatür ömrü için de eşit kabul edilir. Ancak armatür optik tasarımı ve elektriksel elemanlarının da ışık akısına etkisi unutulmamalıdır. Farklı tahmin yöntemleri mevcuttur; Border Function (BF), Arrhenius Behavior, Vector Acceleration (Temperature Acceleration–Vector Method – Denoted by TA–V), Exponential Function (Belonging to the Definition “Other Mathematical Fit Functions, Flexible (MFF-FLEX)). [1-3, 5, 6]

TM-21 YÖNTEMİ

IES TM-21-11, LED ışık akısı bozulma ömrü tahmini için dokuz farklı mühendislik tabanlı model önermektedir. LED yaşlanma davranışını tanımlamak ve tahmin etmek için doğrusal, üstel, logaritmik ve rasyonel fonksiyonlar önerilmiştir. En popüler ve sıklıkla kullanılan denklem, iki parametrelili (Φ_0 ve α) bir üstel fonksiyon işlevidir (1.1) (matematiksel uyum fonksiyonu (MFF-EXP)): [1-3,5,6]

$$\Phi(t) = \Phi_0 \cdot e^{-\alpha t} \quad (1.1)$$

Burada;

t = saat cinsinden çalışma süresi;

$\Phi(t)$ = t zamanında normalize edilmiş ışık akısı çıkışı;
 Φ_0 = en küçük kareler eğrisine uygun olarak türetilen başlangıç sabitidir;
 α = en küçük kareler eğrisine uygun olarak türetilen bozunma hızı sabiti.

Bu işlev, her seferinde mevcut miktarla orantılı olan bozunma oranına sahip bir işlemi açıklar. Başlangıçtaki Φ_0 ışık akısı bozunma oranı ile azalır ve sifıra doğru yaklaşır. Bu yüzden, ışıksız bozunmanın tek bir orana sahip olduğu ve LED'in artık yaymadığı sürece devam edeceği varsayılmaktadır. Birçok fiziksel materyal bu davranışı sergiler, örneğin radyoaktif materyallerin bozulması. LED karmaşık bir yapı olduğundan, bozulma sadece bir üstel fonksiyon izlediyse, bu farklı bir durum olurdu. Bu tipik davranışı gösteren LED'in bazı kısımları olsa bile, büyük olasılıkla farklı parametrelere sahip bozunma işlevlerinin toplamı olacaktır. Bir LED'in ömrü, ilk ışık akısının% 70'i veya% 80'inin yayıldığı zaman noktası olarak tanımlanır. Bu yüzden ömür boyu eğriler bu zamana kadar sıklıkla tahmin edilmektedir. Sıfıra giden bir fonksiyon neredeyse başlangıçta lineer bir fonksiyona eşittir, bazı durumlarda lineer bir eğri ile yaşam süresini tahmin etmek neredeyse aynı olacaktır[13].

ÖRNEK UYGULAMA

TM-21, LM80 ölçümünün son 5000 saatini kullanır. Eğer ölçümler, 10000 saatten uzun ise, bu sürenin ikinci yarısı kullanılır. Örneğin 13000 saatlik bir ölçümde, 6500-13000 saat arasındaki veriler kullanılır.

Tablo 1: LM-80 Test verileri [7]

Test edilen LED ışık kaynağının açıklaması (üretici, model, katalog numarası)	55 °C Kasa Sıcaklığı İçin Test Verisi		85 °C Kasa Sıcaklığı İçin Test Verisi		105 °C Kasa Sıcaklığı İçin Test Verisi	
	Zaman (Saat)	Lümen (Kalan Işık Akısı) (%)	Zaman (Saat)	Lümen (Kalan Işık Akısı) (%)	Zaman (Saat)	Lümen (Kalan Işık Akısı) (%)
LUXEON 3030 2D: L130-2780003000W21 (nominal CCT 2700K)	0	100,00%	0	100,00%	0	100,00%
	1000	99,26%	1000	98,97%	1000	98,91%
	2000	98,64%	2000	98,43%	2000	98,15%
	3000	98,36%	3000	98,01%	3000	97,68%
	4000	97,69%	4000	97,28%	4000	96,74%
	5000	97,25%	5000	96,71%	5000	96,27%
	6000	96,81%	6000	96,24%	6000	95,73%
	7000	96,34%	7000	95,77%	7000	95,36%
	8000	95,84%	8000	95,66%	8000	95,25%
	9000	95,49%	9000	95,19%	9000	94,56%

LM-80 Test Detayları	
Kasa sıcaklığı başına test edilen toplam ünite sayısı:	50
Hata sayısı:	0
Ölçülen birim sayısı:	50
Test süresi (saat):	9000
Test tahrik akımı (mA):	165
Test edilen kasa sıcaklığı 1 (Tc, °C):	55
Test edilen kasa sıcaklığı 2 (Tc, °C):	85
Test edilen kasa sıcaklığı 3 (Tc, °C):	105

Tablo 1'de bir LED'e ait 9000 saatlik LM-80 test verileri bulunmaktadır. Bu veriler ışığında TM-21 yöntemi ile yapılan tahminlere bakacak olursak;

Tablo 2’te L70 için çıkan ömür tahmini >54000 saat olmaktadır. Sonuçlar raporlanırken, LM80 verisi üzerinden hesaplanan ışık akısını koruma yüzdesi süresi saat cinsinden ölçüm zamanının 6 katından fazla ise, ömür tahmini büyüktür işareti ile verilmelidir. Örneğin bu çalışmada 9000 saatlik LM80 verisi ile ölçülen bir LED çipinin tahmin edilen L70 değeri 54000(=6x9000) saatin üzerinde olduğu için, TM21 L70 süresi tahminini $L70(9k) > 54000$ saat olarak belirtir. TM21, ölçüm zamanının 6 katından fazla ömür tahmini yapmaya istatistiksel hatanın artması sebebi ile izin vermez. TM21 tahmini verilirken, mutlaka LED çip kasa sıcaklığı ve sürüş akımı da belirtilmelidir. Örnek olarak, $L70(9k) > 54000$ saat ($T = 55^{\circ}\text{C}$, $I = 165$ mA) gösteriminin açıklaması: “ 55°C LED çip kasa sıcaklığında, 165 mA sürüş akımında 9000 saat çalıştırılıp ölçülen ışık akısı değerleri kullanılarak, bu çalışma koşulları geçerli kalması halinde söz konusu LED ışık kaynağının ışık akısının %70 değerine düşeceği sürenin 54000 saatten fazla olacağı tahmin edilmektedir” şeklindedir. [1-3,5-8]

Tablo 2: TM-21 Tahmin sonuçları (L70) [7]

Test edilen LED Işık Kaynağı'nın açıklaması (üretici, model, katalog numarası)		LUXEON 3030 2D: L130-2780003000W21 (nominal CCT 2700K)					
55 °C Kasa Sıcaklığı İçin Test Şartları		85 °C Kasa Sıcaklığı İçin Test Şartları		105 °C Kasa Sıcaklığı İçin Test Şartları			
Örnek sayısı	50	Örnek sayısı	50	Örnek sayısı	50		
Hata sayısı	0	Hata sayısı	0	Hata sayısı	0		
Testte kullanılan DUT sürücü akımı (mA)	165	Testte kullanılan DUT sürücü akımı (mA)	165	Testte kullanılan DUT sürücü akımı (mA)	165		
Test süresi (saat)	9.000	Test süresi (saat)	9.000	Test süresi (saat)	9.000		
Projeksiyon için kullanılan test süresi (saat-saat)	4000,0 - 9000,0	Projeksiyon için kullanılan test süresi (saat-saat)	4000,0 - 9000,0	Projeksiyon için kullanılan test süresi (saat-saat)	4000,0 - 9000,0		
Kasa test sıcaklığı (°C)	55	Kasa test sıcaklığı (°C)	85	Kasa test sıcaklığı (°C)	105		
α	4,645E-06	α	4,178E-06	α	4,280E-06		
B	0,995	B	0,988	B	0,983		
Raporlanan L70 (9k) (saat)	>54000	Raporlanan L70 (9k) (saat)	>54000	Raporlanan L70 (9k) (saat)	>54000		

Tablo 3’te L80 için çıkan ömür tahmini $L80(9k) = 47000$ saat ($T = 55^{\circ}\text{C}$, $I = 165$ mA), $L80(9k) = 50000$ saat ($T = 85^{\circ}\text{C}$, $I = 165$ mA), $L80(9k) = 48000$ saat ($T = 105^{\circ}\text{C}$, $I = 165$ mA), olmaktadır.

Tablo 3: TM-21 Tahmin sonuçları (L80) [7]

Test edilen LED Işık Kaynağı'nın açıklaması (üretici, model, katalog numarası)		LUXEON 3030 2D: L130-2780003000W21 (nominal CCT 2700K)					
55 °C Kasa Sıcaklığı İçin Test Şartları		85 °C Kasa Sıcaklığı İçin Test Şartları		105 °C Kasa Sıcaklığı İçin Test Şartları			
Örnek sayısı	50	Örnek sayısı	50	Örnek sayısı	50		
Hata sayısı	0	Hata sayısı	0	Hata sayısı	0		
Testte kullanılan DUT sürücü akımı (mA)	165	Testte kullanılan DUT sürücü akımı (mA)	165	Testte kullanılan DUT sürücü akımı (mA)	165		
Test süresi (saat)	9.000	Test süresi (saat)	9.000	Test süresi (saat)	9.000		
Projeksiyon için kullanılan test süresi (saat-saat)	4000,0 - 9000,0	Projeksiyon için kullanılan test süresi (saat-saat)	4000,0 - 9000,0	Projeksiyon için kullanılan test süresi (saat-saat)	4000,0 - 9000,0		
Kasa test sıcaklığı (°C)	55	Kasa test sıcaklığı (°C)	85	Kasa test sıcaklığı (°C)	105		
α	4,645E-06	α	4,178E-06	α	4,280E-06		
B	0,995	B	0,988	B	0,983		
Raporlanan L80 (9k) (saat)	47.000	Raporlanan L80 (9k) (saat)	50.000	Raporlanan L80 (9k) (saat)	48.000		

SONUÇ

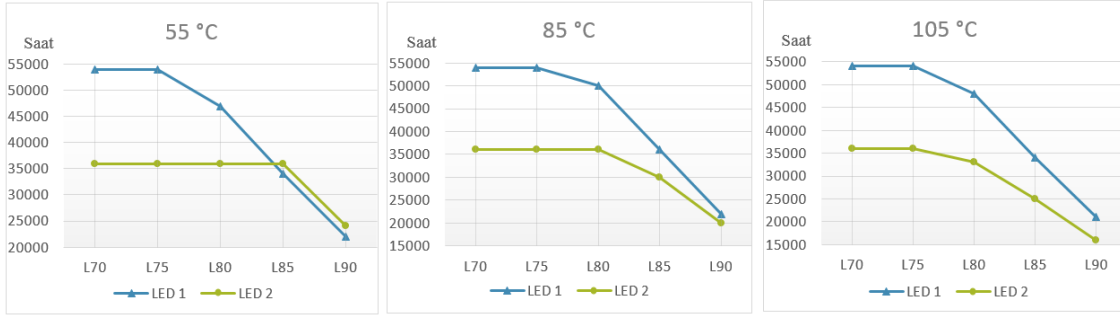
Tablo 4 ve Şekil 3’de iki farklı LED test değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. LED 1, 9000 saatlik LM80 verileri ile, LED 2 ise 6000 saatlik veriler ile ömür hesabı yapılmıştır. Bu sebeple TM-21 ömür tahmini sonuçlarında, TM-21 standartları gereği LED 1’de 54000 saatin üzeri tahmin edilememekte olup LED 2 de ise 36000 saatin üzeri tahmin edilememektedir. Bu sonuçlara bakıldığında LED 1 sıcaklıktan çok etkilenmemekte olup LED 2 önemli ölçüde etkilenmektedir. Genel olarak sıcaklık LED’ler için önemli bir etkidir. Bu sebeple LED’lerin uzun ömürlü olmaları için uygun sıcaklıkta çalıştırılmaları gerekmektedir.

Tablo 4: TM-21 Tahmin sonuçları [7]

Ömür	55 °C		85 °C		105 °C	
	LED 1	LED 2	LED 1	LED 2	LED 1	LED 2
L70	> 54000	> 36000	> 54000	> 36000	> 54000	> 36000
L75	> 54000	> 36000	> 54000	> 36000	> 54000	> 36000
L80	47000	> 36000	50000	> 36000	48000	33000
L85	34000	> 36000	36000	30000	34000	25000
L90	22000	24000	22000	20000	21000	16000

LED 1: LUXEON 3030 2D: L130-2780003000W21 (nominal CCT 2700K)

LED 2: Edison Opto Corporation: 2T01X2WW11000001 (nominal CCT 3000K)



Şekil 3: TM-21 Hesaplama sonuçları [7]

Gelişen teknolojiyle birlikte aydınlatma sistemlerinde yaygınlaşan LED'li ürünlerin teknik verilerinin belirlenmesinde yaşanan en büyük sorun ömür tahminleri için uzun test süreçlerinin olmasıdır. Bu da ürünün piyasa çıkarılmasını geciktirmektedir. Öte yandan bazı firmalar ise LM 79, LM 80 gibi teknik testleri gerek ticari kazanımları gerekse mesleki yetersizliklerden dolayı tam uygulamayarak ömür ve ışık değerleri hatalı LED'leri piyasa sürmektedirler. Bu da tüketiciyi yanıltarak hem LED ile ilgili kötü izlenim yaratmakta hem de zarara uğratmaktadır.

LED çipin ömrü üretim aşamalarındaki kaliteyle doğru orantılıdır. Kullanım şartları, özellikle de sıcaklık ömür süresinde önemli ölçüde etkilidir.

LED'lerin ömürlerinin tahmin edilmesi karmaşık bir sorundur. Yapılan çalışmada, LED çipe ait kesin olarak bilinen süre ve jonksiyon sıcaklık verileri ve yüksek doğrulukla ölçülemeyen gerekli diğer parametrelerin bazı noktalarının filtrelenmesiyle ömür tahmini hesaplanmış olup diğer yöntemler ile karşılaştırılmıştır. Bu analizlere göre daha doğru sonuçlar elde edildiği anlaşılmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Khanh, T. Q., Bodrogi, P., Vinh, T.Q., Winkler, H., LED Lighting: technology and perception, Wiley press, England, 21-28, 2015.
- [2] Richman, E., Understanding LED tests: IES LM-79, LM-80, and TM-21, DOE SSL Workshop, Ohio, USA, 254-258, 2011.
- [3] Yurtseven, M.B., Onaygil, S., Katı Hal Aydınlatma Ürünleri Ömür Ölçümü ve Tahmini Standartları, 11. Ulusal Aydınlatma kongresi, İstanbul, Türkiye, 56-61, 2017.
- [4] Kıyak, I., Oral, B., Topuz, V., Smart indoor LED lighting design powered by hybrid renewableenergy systems, Elsevier, Energy and Buildings, 342-347, 2017.

- [5] Hodapp, M., IESNA LM- 80 and TM- 21, Philips Lumileds Press., Street Lighting Consortium & Workshop , Florida, USA, 164-169, 2015.
- [6] Miller, C., IES TM-21-11 Overview, History and Q&A Session, EPA Energy Star Lamp Round Table, CA, USA, 354-360, 2011.
- [7] Kıyak, İ., A Study on the Working Performance of Dimming Methods for Single and Multi Chip Power LEDs, International Journal of Photoenergy, USA, 1008-1018, 2012.
- [8] Energy Star® TM-21 Calculator for Uneven LM-80 Intervals, <https://www.energystar.gov/.../energy%20star%20tm>, Erişim tarihi: 12.05.2018.
- [9] Narendran, N., Y. Gu., Life of LED-based White light sources, IEEE/OSA Journal of Display Technology, 167-171, 2005.
- [10] Spor, A., Kıyak, İ., Illumination design of educational environment with efficient lighting luminaries, International Conference on Innovative Engineering Applications (CIEA 2018), 457-463, 2018.
- [11] Aytekin, A., Kıyak, İ., LED / IRLED Components and Application Example Used in Medical Systems, International Conference on Innovative Engineering Applications (CIEA 2018), 246-252, 2018.
- [12] Kıyak, İ., Gökmen, G., Temperature and Photometric Analysis of Multichip Power LED and Retrofit Lamp, 8th International advanced Technologies Symposium, 884-894, 2017.
- [13] Gökmen, G., Kıyak, İ., The System Design of Photovoltaic Supported Light Pipe LED Hybrid Illumination, 6. European Conference on Renewable Energy Systems (ECRES 2018), 232-240, 2018.

BATARYA HÜCRELERİNDEKİ ELEKTROKİMYASAL GÜRÜLTÜLERİN İNCELENMESİ

Taner ÇARKIT^{1*}, Mustafa ALÇI²

¹ Kırklareli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Türkiye

² Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Türkiye

Özet

Elektronik bileşenlerden ve batarya hücrelerinden kaynaklanan elektrokimyasal gürültü, batarya hücrelerinin çekirdeklerinde meydana gelen kimyasal tepkimeler ve/veya değişimler sonucunda ortaya çıkmaktadır. Batarya pil hücrelerinden kaynaklanan bu bozucu dalgalanmalar, bataryaların çıkışındaki gerilimlerde değişimlere, korozyonlara neden olarak bataryadan elde edilecek olan verimin azalmasına sebep olmaktadır. Batarya pil hücrelerinden kaynaklanan bu gürültüler, batarya hücrelerinin temelinde kullanılan çeşitli kimyasal bileşenlerden dolayı farklılık göstermektedir. Elektrokimyasal bir enerji kaynağı olan bu hücreler kimyasal içyapılarındaki farklılıklardan dolayı olumlu veya olumsuz özelliklere sahiptirler. Pillerin ve pil bloklarından oluşan bataryaların kullanıldığı alanlarda (havacılık, uzay, haberleşme, askeri ve sivil sistemler vb.) değişiklik olmasının nedeni, farklı kimyasal yapıya sahip hücrelerin gösterdikleri farklı davranışlar ve sahip oldukları farklı özelliklerdir. Bu özelliklerden bir tanesi de gürültü bileşenidir. Bu çalışmada, literatürde çok az yer almış olan bataryaların ve batarya hücrelerinin oluşturdukları gürültüler üzerine yapılan test ve ölçümler araştırılarak birleştirilmiş ve yeni çıkarımlarda bulunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Gürültü, elektrokimyasal gürültü, bataryalardaki gürültü çeşitleri

* tanercarkit@gmail.com / tanercarkit@klu.edu.tr

INVESTIGATION OF ELECTROCHEMICAL NOISES IN BATTERY CELLS

Abstract

Electrochemical noise arising from electronic components and battery cells arises as a result of chemical reactions or changes occurring in the base of battery cells. These disturbing fluctuations caused by the battery cells occasion the changes and electrochemical corrosion in the voltages at the output of the batteries and reduce the efficiency of the battery. This noise caused by the battery cells exhibits some differences because of the various chemical components that are used at the base of the batteries. The cells which are electrochemical energy source have positive or negative properties due to the differences in their chemical structure. The reason, why there are differences in the areas (aviation, space, communications, military and civil systems, etc.) where cells and battery blocks that are made of cells is that dissimilar cells which have distinct chemical structures, show diverse behaviors and characteristics. One of these features is the noise component. In this study, tests and measurements made on the noise produced by the batteries and battery cells, which are very rare in the literature, were investigated and combined, as a result new inferences have been found.

Key words: Noise, electrochemical noise, noise types in the battery cells

1. Giriş

Günümüz teknolojisinin ilerleyişi DC güç kaynaklarının önemini vurgularken, buna paralel olarak batarya teknolojisinin de önemini artırmaktadır. Bataryaların temelinde kimyasal hücreler ve bataryaların yönetiminin gerçekleştirildiği elektronik kontrol baskı devre kartları yer almaktadır. Bu hücreler, kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürdükleri için “elektrokimyasal pil hücreleri” olarak isimlendirilirler. Bu hücrelerden oluşan piller elektriksel olarak şarj edilebilme durumlarına göre ikiye ayrılmaktadır; şarj edilebilen (sekonder) piller, şarj edilemeyen (primer) piller. Günlük hayatta primer piller çok sık karşımıza çıkarken, gelişen teknoloji ile önemli sistemlerde de sekonder piller oldukça geniş ölçekli yer kaplamaktadır. Günümüzde elektrikli araç teknolojilerinde, enerji depolama istemlerinde (EDS), havacılık araçlarında, önemli silah sistemlerinde, yenilenebilir enerji entegreli yeni nesil aydınlatma sistemlerinde elektrokimyasal enerji kaynağı olan pillerden oluşan bataryalar bir elektronik cihaz olarak kendilerini göstermektedirler. Elektronik cihazlar, istenen herhangi bir yerde, tasarlandıkları şekilleriyle görevlerini yapabilmelidirler [1]. Bataryalarda aynen elektronik cihazlar gibi yer aldıkları sistemlerde görevlerini yapabilmelidirler. Bataryaların farklı kullanım alanlarında tercih edilmelerini ve bataryaların performansını etkileyen önemli parametreler aşağıdaki şekilde sıralanmaktadır:

- Deşarj derinliği (DoD)
- Batarya sağlamlık durumu (SoH)
- Aşırı şarj ve deşarj kabiliyeti
- Hızlı şarj ve deşarj kabiliyeti
- Sarj durumu (SoC)
- Döngü sayısı
- Açık devre gerilimi (V)
- İç direnç (R)

Bu parametreler, bataryaların temelinde bulunan hücrelerin kimyalarına göre değişiklik gösterirken, bu hücreler ile birlikte kullanılan elektronik baskı devre kartlarının (PCB) ve bu kartlar üzerinde kullanılan elektronik bileşenlerin, batarya yönetim sistemlerinin (BMS) ve batarya koruma devrelerinin (BPC) özelliklerine, toleranslarına, geçirgenlik kapasitelerine göre

de değişiklik göstermektedir. Sıklıkla kullanılan ve özellikle dikkat edilen bu parametrelerin dışında göz ardı edilebilen ancak bazı kullanım yerlerinde hayati öneme sahip bir diğer parametre de gürültü parametresidir. Elektronik bileşenlerden ve batarya hücrelerinin iç kimyalarından kaynaklanan bu gürültü, elektrokimyasal gürültü olarak tanımlanmaktadır. Elektrokimyasal gürültü, pil hücrelerinin çekirdeklerinde meydana gelen kimyasal tepkimeler ve/veya değişimler sonucunda sunulan gerilimde dalgalanmalara neden olabilmektedir. Bataryaların temelinde yer alan hücrelerden kaynaklanan bu bozucu dalgalanmalar, elektronik bileşenlerde meydana gelen bozucu etkilerle birleşerek, pil bloklarının ve elektronik kartların oluşturduğu, bir tür güç kaynağı olan bataryaların çıkışındaki gerilimlerde değişimlere, dalgalanmalara ve bozucu etkilere neden olarak bataryadan elde edilecek olan verimin düşmesine neden olabilmektedir. Gürültünün meydana getirdiği bu tür bozucu etkileri, gerilim korozyonu olarak tanımlamak mümkündür. Elektrokimyasal etkilerin sebep olduğu gerilim korozyonu; elektrik yük parçacıklarının pillerdeki anot materyalden ortam elektrolitine, ortam elektrolitinden sonra da katot materyale akma süreci olarak adlandırılan, bataryaların çalışmasını olumsuz yönde etkileyebilen her türlü işaret üretim sürecidir. Gürültüden kaynaklanan söz konusu bu gerilim korozyonu, dikkat edilmediği takdirde çok sayıda hücreden oluşan bataryaların oluşturduğu enerji depolama sistemlerinde, elektrikli araç bataryalarında, havacılıkta kullanılan akü sistemlerinde telafisi güç olan olumsuz etkiler meydana getirebilecektir. Bu etkilerden bir tanesine örnek vermek gerekirse; 2000’li yılların başında New York’ta bulunan bir hava alanında, uçak içerisinde yer alan Li-Ion bataryaya sahip dizüstü bilgisayarın içerisinde meydana gelen elektronik, elektrokimyasal, elektromanyetik gürültülerin birleşmesi sonucunda oluşan korozyon etkisi, uçak iniş takımlarında hatalara sebep olmuştur [2]. Elektrokimyasal gürültü birçok kullanım alanında göz ardı edilirken, 2010’lu yılların başında gürültünün teşhis edilebilmesi için yapılan test ve ölçümlerin önemi yakıt hücrelerinde anlaşılmıştır. Literatürde, ticari bataryaların içerisinde kullanılan Li-Ion piller üzerinde yapılmış gürültü kestirimi araştırmaları ile pek fazla karşılaşmamaktadır. Bu eksikliğin nedeni Li-Ion pillerin düşük bozucu gürültü etkisine sahip olmalarıdır [3]. Li-Ion pil hücrelerinin dışında kullanılan farklı kimyalara sahip hücreler (NiCd, NiMH, LiFePO₄, LTO, NMC vb.) de kendilerine özgü gürültü oluşturabilmekte ve kullanım amaçlarına göre birbirlerine üstünlük sağlayabilmektedirler.

2. Batarya Sistemlerindeki Temel Gürültü Çeşitleri

Gürültü, zayıf işaretlerin, sinyallerin, gerilimlerin gerekli kuvvetlendirme işlemleri yapılarak, kullanılmak istenen yerlerde istenmeden ortaya çıkan, rahatsız edici, korozyon oluşturan etkilerin tümü olarak tanımlanmaktadır. Birçok elektronik sistemde ve cihazda, göz önüne alınması gereken birden fazla gürültü türü bulunmaktadır. Meydana gelen gürültünün değerlendirilebilmesi ve yorumlanabilmesi için bazı kavramlar kullanılmaktadır. Kullanılan bu kavramlardan bir tanesi gürültü aralığıdır. Gürültü aralığı, işaret gücünün (P_S), gürültü gücüne (P_R) oranı olarak tanımlanırken, dB cinsinden ifade edilmektedir. P_R oranı arttıkça gürültünün bozucu etkileri artmaktadır. Bir direncin üzerinde meydana gelen ısı gürültünün matematiksel formlarla ifade edilerek sonucun gerilim (V) cinsinden gösterilmesi diğer bir kavram olan gürültü gerilimini vermektedir. Gürültü gerilimi $V_{gürültü}$ olarak Denk.1’de ifade edilmektedir.

$$V_{gürültü} = \sqrt{4kTRb} \quad (1)$$

$$F = \sigma_1 / \sigma_2 \quad (2)$$

Burada k, Boltzman sabitini ($1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K°), T, Kelvin cinsinden sıcaklığı, b, Hertz (Hz) cinsinden bant genişliğini, R Ohm cinsinden direnci ifade etmektedir. Elektronik cihazlarda ve sistemlerde gürültünün değerlendirilmesinde kullanılan önemli kavramlardan bir tanesi de Denk.2’de F ile ifade edilen gürültü katsayısıdır. Gürültü katsayısı, girişteki gürültü aralığının çıkıştaki gürültü aralığına olan oranı olarak tanımlanmaktadır. Gürültü katsayısını dB cinsinden ifade etmek istendiğinde; $10 \log F$ formülü kullanılmaktadır. Batarya sistemleri bir nevi elektronik cihaz olarak düşünüldüğünde, bu elektronik sistemlerin temelinde üç tür gürültü ile karşılaşmaktadır. Bunlar;

- Termal gürültü (Johnson Noise)
- Atış/Vuruş gürültüsü (Shot Noise)
- Kırpışma gürültüsü (Flicker Noise)

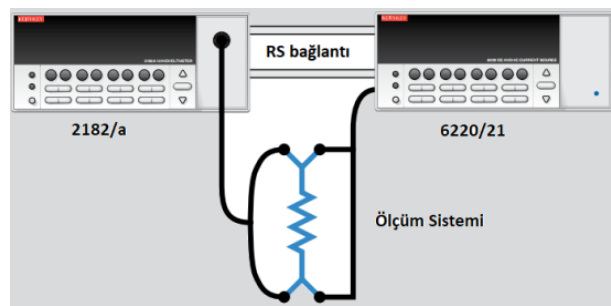
Johnson gürültüsü ($V_{gürültü}$ veya V_{jg}) olarak isimlendirilen gürültü, direnç üzerinde meydana gelen termal gürültünün gerilim cinsinden ifade edilmesidir. Denk.1’den de anlaşılacağı üzere, düşük frekanslarda Johnson gürültüsü sadece sıcaklığa ve dirence bağlıdır. Johnson gürültüsü formülünde akımın (I) yer almaması, bu gürültünün akıma bağlı olmadığını göstermektedir. Yine formülde frekans direkt olarak gösterilmemektedir, bunun yerine bant genişliği kullanılmaktadır. Johnson gürültüsü, bant genişliği dikkate alınarak frekans bandında belirli aralıklarda “beyaz

gürültü (White Noise)” olarak tanımlanmaktadır. Diğer bir gürültü türü atış/vuruş gürültüsüdür (Shot Noise). Shot noise iki koşul oluştuğunda meydana gelmektedir. Bu koşullardan birincisi, yük taşıyıcıları sayısal olarak belirtildiğinde, ikincisi ise varış zamanının rastgele olduğu durumlardır [4]. Bu gürültünün olumsuz etkileri Denk.3’te verilmekte olan akım dalgalanmasına sebep olmaktadır.

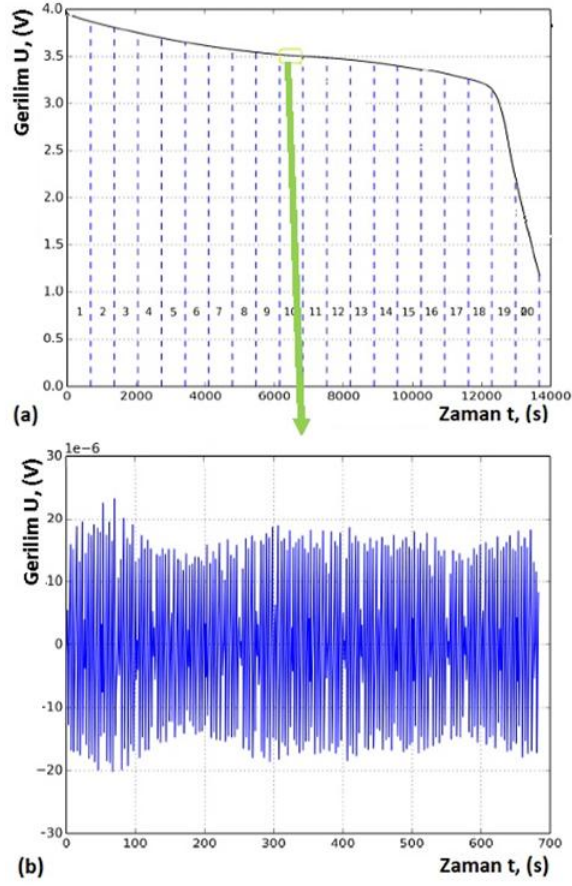
$$I_{\text{shot}} = \sqrt{2qIb} \quad (3)$$

Burada q, Coulomb cinsinden elektron yükünü ($1.602 \cdot 10^{-19}$ C), I, amper cinsinden kutup akımını, b, Hz cinsinden ölçülen bant genişliğini ifade etmektedir. Batarya sistemlerinde ortaya çıkan diğer bir gürültü çeşidi de kırpışma gürültüsüdür. Kırpışma gürültüsü (Flicker Noise) $1/f$ gürültüsü olarak isimlendirilmektedir [5]. Bu gürültü çeşidi, özellikle 100 Hz’den düşük frekanslarda kendini hissettirmektedir. Johnson gürültüsünün aksine frekansa bağlıdır, ancak frekansla ters orantılı olarak değişmektedir. Batarya sistemlerinin temelinde yer alan hücreler, elektrokimyasal birer enerji kaynağı olarak tanımlanmaktadır. Dolayısı ile hücrelerin temel yapı taşlarını oluşturan farklı kimyalara sahip maddelerin oluşturduğu elektronik gürültü de elektrokimyasal gürültü olarak tanımlanmaktadır. Bu gürültünün temelinde yatan önemli sebeplerden bir tanesi; batarya hücrelerinin iç yapısında bulunan elektrolitlerde meydana gelen türbülanslı dalgalanmalardır. Elektrokimyasal gürültüyü; elektrolitlerin türbülanslı dalgalanmalarından kaynaklanan sınırlayıcı difüzyon akımındaki korozyonlar olarak tanımlamak da mümkündür [3]. Bu tanımdan yararlanarak, elektrokimyasal akım gürültüsünü (ECN); aynı potansiyelde tutulan iki farklı veya aynı elektrot arasında meydana gelen anlık akım dalgalanmaları olarak tanımlamak mümkündür. Bu akım dalgalanmaları, iki farklı elektrot arasında veya aynı malzemedeki mikro yapısal farklılıklar içeren iki elektrot arasındaki bir galvanik aktiviteye bağlıdır. ECN genellikle Sıfır Direnç Ampermetresi (ZRA) kullanılarak ölçülmektedir. Elektrokimyasal potansiyel gürültüsü (EPN) olarak adlandırılan potansiyel dalgalanmalarını ölçmek için de çalışma elektrotları ile aynı materyalden bir referans elektrot veya bir zayıflama elektrodu kullanılmaktadır [6]. Batarya hücrelerinde, pil bloklarında, batarya sistemlerinde gürültü ölçümlerinin sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi için, çevresel etkilerden olabildiğince az etkilenmesi için küçük yüzey alanına sahip iletkenler kullanılmaktadır. Gerçekleştirilen test ve ölçümler, dış ortamda mevcutta bulunan birçok gürültüden ve gürültü kaynağından izole edilmiş ünitelerde yapılmaktadır. Şekil 1’de verilmekte olan test ölçüm blok

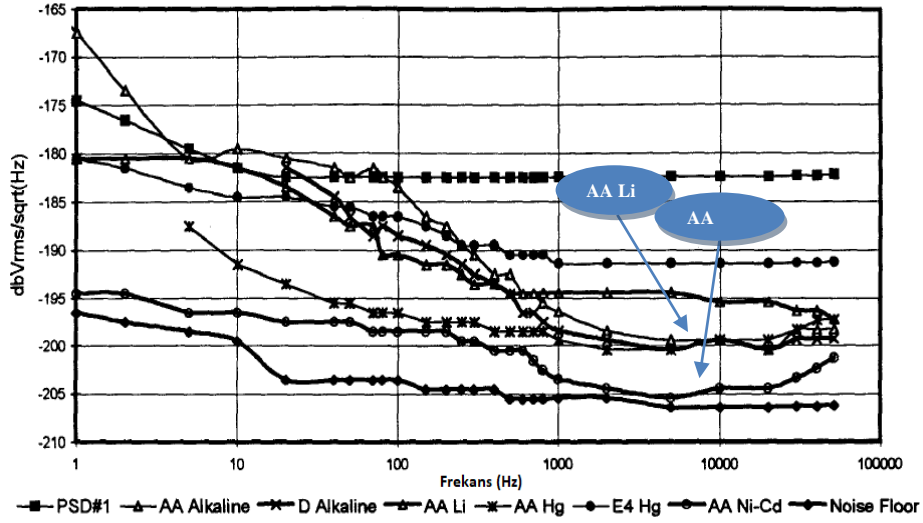
şeması ile bu veriler elde edilmektedir [7]. Pazarda en çok tercih edilen batarya hücrelerinden biri 18650 Li-Ion pilleridir. Bu hücrelerin nominal voltajları 3,6 V_{DC} mertebelerinde iken, akım kapasiteleri çeşitlilik gösterebilmektedir. Literatürde, silindirik tip 18650 batarya hücreleri üzerinde gerçekleştirilen deneylerden elde edilen tecrübelerle göre, elektrokimyasal gürültülerden kaynaklanan voltaj dalgalanmalarının oranı Şekil 2’de görüldüğü üzere düşüktür [8]. Bu sistemlerin testlerinin gerçekleştirilmesinde hassas ölçüm yapabilen, düşük seviyeli voltaj gürültülerini ölçebilen, düşük seviyeli akım gürültülerini algılayabilen Keithley 6220/6221 AC/DC akım kaynağı ve Nanovoltmeter Keithley 2182/a gibi gerilim kaynakları kullanılmaktadır. 18650 silindirik tip Li-Ion batarya hücreleri üzerinde yapılan ölçümlerde elde edilen deşarj grafiği ve gürültü nedeniyle meydana gelen dalgalanma Şekil-2’de gösterilmektedir. Bu grafikte de görüldüğü üzere gerilim dalgalanmalarında olağan dışı pikler görülmemiştir. Bundan dolayı Li-Ion batarya hücrelerinin gerilimleri üzerinde gürültünün etkisi çok azdır. Başka bir çalışmadan elde edilen Şekil 3’teki verilere göre, 10 kHz frekansta AA Li hücrelerin elektrokimyasal gürültüsünün -195 dBV/Hz gibi düşük seviyelerde olduğu görülmektedir [4]. Çeşitli pil kimyalarına ve pil türlerine göre yapılan deneyler sonucunda birçok veri elde edilmiştir. Bu veriler çeşitli ölçüm cihazları ile elde edilmiş ve literatürde yerini almıştır. Gürültü ölçüm sistemlerinde sıklıkla tercih edilen yöntemler arasında Fourier analizi, Ters Fourier analizi, Hızlı Fourier analizi (FFT) gibi yöntemler yer almaktadır. 1995 yılında FFT ile yapılan çapraz korelasyon yöntemi neticesinde, farklı batarya hücrelerinin kimyalarına dair elde edilen voltaj gürültü ölçüm verileri Şekil 3’teki grafikte gösterilmektedir [4].



Şekil 1: Gürültü test ölçüm blok gösterimi



Şekil 2: (a) Li-Ion bataryanın deşarj grafiği, (b) Voltaj dalgalanması

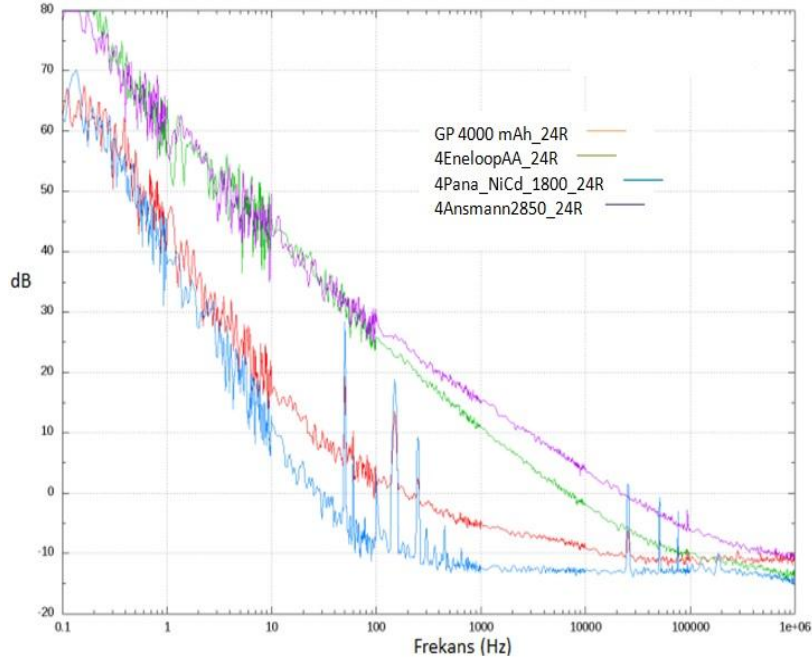


Şekil 3: Çeşitli batarya hücrelerinin kimyaları üzerinde yapılan gürültü test sonuçları

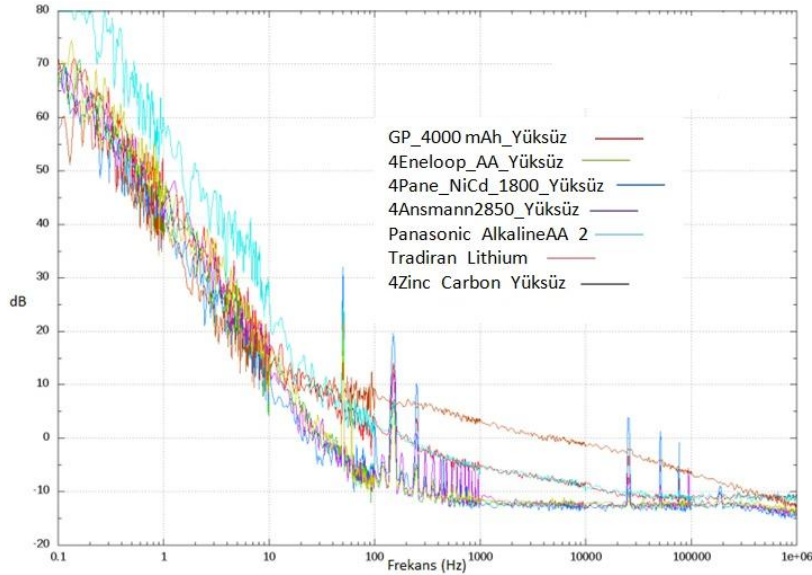
Fourier analizi yöntemine göre çalışan Agilent 89441A cihazı ile, Tablo 1’de gösterilen batarya hücre türleri yüksüz durumda ve yük üzerinden çıkış alınarak test edilmiştir. Yapılan ölçümler sonucunda yük üzerinden elde edilen veriler Şekil-4’deki grafikte verilirken, çıkışta yük bulunmaksızın elde edilen sonuçlar ise Şekil-5’deki grafikte gösterilmektedir [9]. Test ve ölçümler göstermektedir ki NiCd kimyasına sahip piller, test sonuçlarını gösteren grafikten (Şekil 3) de anlaşılacağı üzere gürültü değerleri 10 kHz frekansta -205 dBV/Hz mertebelerindedir ve bundan dolayı diğer kimyalara nazaran en iyi gürültü performansına sahiptir. NiCd kimyasına sahip piller diğer kimyalara sahip pillere nazaran en iyi gürültü performansını göstermesine karşın, elde edilen grafiklerde anlık yükselişler görülmektedir. Şekil 3’teki gürültü analizini ve ölçümlerini ifade eden grafikte 10 Hz ile 1000 Hz arasındaki frekanslarda NiCd batarya hücrelerinin gürültülerin ileri frekanslardaki gürültü değerlerine göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

Tablo 1: Fourier analizi yöntemi yardımı ile test edilen farklı tür batarya hücreleri

Marka	Pil Kimyası	Gerilim (V)	Akım Kapasitesi (mAh)	Pil Tipi
Ansmann	NiMH	1.2	2850	Sekonder
Sanyo Eneloop	NiMH	1.2	2000	Sekonder
Panasonic/Sanyo Cadnica	NiCd	1.2	1800	Sekonder
Aerocell	Çinko Karbon	1.5	-	Primer AA
Panasonic	Alkalin	1.5	-	Primer AA
GP	NiMH	1.2	4000	Sekonder
Tadiran	Li-SOCl ₂	3.6	1500	Primer



Şekil 4: Dört farklı tür batarya hüresine ait yük üzerinden elde edilen gürültü etkenleri



Şekil 5: Yedi farklı tür batarya hüresine ait yük olmaksızın elde edilen gürültü etkenleri

Şekil 4'teki grafikte 10 Hz ile 1000 Hz arasındaki ve 10000 Hz ile 100000 Hz arasındaki frekanslarda NiCd batarya hücrelerinin yük üzerinden elde edilen gürültü değerlerinde anlık artışlar görülmektedir. Şekil 5'teki farklı tür batarya hüresine ait yük olmaksızın elde edilen gürültü grafiğinde de yine 10 Hz ile 1000 Hz arasındaki ve 10000 Hz ile 100000 Hz arasındaki

frekanslarda NiCd batarya hücrelerinin yük olmaksızın elde edilen gürültü değerlerinde anlık artışlar görülmektedir. Grafikler incelendiğinde aynı frekans aralıklarında GP marka NiMH kimyasına sahip 4000 mAh kapasiteli sekonder hücre ile Panasonic marka NiCd kimyasına sahip 1800 mAh kapasiteli sekonder hücrenin gürültü profillerinde, 10 Hz ile 1000 Hz arasındaki ve 10000 Hz ile 100000 Hz arasındaki frekanslarda anlık artış görülmektedir. Ancak, bu artış benzer kimyaya sahip Ansmen marka ve/veya Sanyo marka pillerde görülmemektedir. Farklı üreticiler tarafından kullanılan farklı üretim prosesleri neticesinde ileriki frekanslarda elektrot malzemesinin taneleri arasında korozyonlar meydana gelebilmektedir [10-11]. Gürültü profilinde meydana gelen bu ani artışlar, literatürde kenar yumuşatma filtresi (anti-aliasing filter) olarak tanımlanan özel bir filtre kullanılarak giderilebilmektedir. Gürültü profilindeki anlık artışlardaki frekans bant genişliği değeri olmadan, tepeden tepeye genliği bir anlam ifade etmemektedir [12].

3. Sonuç

Batarya teknolojisi hiç şüphesiz ki 2050’li yıllara kadar mevcuttaki önemini koruyacak ve ileriki çalışmalar neticesinde dünyanın vazgeçilmez teknolojileri arasında yer alacaktır. Ulaşım, haberleşme, enerji gibi birçok temel alanda bataryalar kullanılmakta ve kullanımı da giderek yaygınlaşmaktadır. Havacılıkta NiCd bataryaların ve kurşun asit akülerin kullanılması, denizaltı araçlarında kurşun asit ve yakıt pili teknolojisinin kullanılması, GPS/GPRS sistemlerinde lityum temelli bataryalar kullanılsa da tercihin nikel tabanlı pil bloklarından oluşan bataryaların yönünde olması gibi sonuçların sebebi hücre kimyalarından kaynaklanan avantaj ve dezavantajlardır. Bu avantaj ve dezavantajların yanı sıra, Li-Ion batarya hücresi üreticilerinin ürünlerinin, farklı oranlarda çevreye zarar verebilme olasılıkları, güvenlik sorunları, alınması gereken tedbirlerin maliyetleri kullanıcı tercihlerinin değişimini etkileyen önemli sebepler arasındadır. NiCd bataryaların gürültü performansının iyi olmasından dolayı, bu bataryalar havacılık araçlarında, haberleşme cihazlarında, gürültünün bozucu etkilerinin önem arz ettiği yerlerde tercih edilmektedir. NiCd kimyasına sahip batarya hücrelerinin gürültü verileri diğer kimyalara sahip pillerin gürültü verilerinden daha iyi performansa sahip olmasına karşın, içerisinde Ni kimyası bulunduran bazı batarya hücrelerinin gürültü profilinde farklı frekans aralıklarında anlık artışlar meydana gelmektedir. Ancak, bu artış benzer kimyaya sahip, farklı üreticiler tarafından üretilen pillerde görülmemektedir. Anlık bu değişimler üreticilerin kullanmış olduğu üretim

proseslerinden kaynaklanabilmektedir. Li-Ion batarya hücrelerinin enerji kapasitelerinden yararlanmak ve kullanım alanını genişletmek amacı ile yapılan teknolojik çalışmaların neticesinde, Li-Ion batarya hücrelerinin hava araçlarında, su üstü ve su altı deniz araçlarında, haberleşme sistemlerinde kullanımı için Ar-Ge çalışmaları devam etmekte ve farklı karakteristiklere sahip ürünler elde edilmektedir. Elde edilen sonuçlardan çıkartılacak bir diğer önemli yorum ise; Denk.1’de de görüldüğü gibi düşük iç dirence sahip batarya hücrelerinin daha düşük voltaj gürültüsü ortaya çıkaracakları yönündedir. Bu çalışmanın ardından ileriki dönemde yapılması planlanan çalışmalar; enerji depolama sistemlerinin ulusal şebekeye paralel olarak bir kaynak gibi bağlanması durumunda veya seri bağlı köprülenen (bypass edilebilen) bir kaynak gibi bağlanması durumunda sistem kararlılığına etkisi olarak incelenecektir.

Kaynaklar

- [1] S. Özsoy, B.S. Yılbaş, M. Alçı, “Elektronik Cihazların Elektromagnetik Etkilerden Korunma Teknikleri”, II. Ulusal Üniversite ve Sanayi İşbirliği Sempozyumu, s:77-93, 1988
- [2] Maxim Integrated Inc., “Circuit Tradeoffs Minimize Noise in Battery-Input Power Supplies”, pp:1-8, 2001
- [3] S. Martemianov, F. Maillard, A. Thomas, P. Lagonotte, L. Madiler, “Noise Diagnosis of Commercial Li-Ion Batteries Using High Order Moments”, Russian Journal of Electrochemistry, Vol. 52, No. 12, pp: 1122-1130, 2016
- [4] C.K. Boggs, A.D. Doak, F.L. Walls, “Measurement of Voltage Noise in Chemical Batteries”, IEEE International Frequency Control Symposium, 1995
- [5] Texas Instruments, “Noise Analysis in Operational Amplifier”, 2007
- [6] Bio Logic Science Instruments, “Electrochemical Noise Measurements”, App. Note:39, pp:1-3, 2012
- [7] Keithley, “Model 2182 Nanovoltmeter User’s Manual”, 2016
- [8] A. Thomas, S. Martemianov, F. Maillard, P. Madier, “New Methodology of Electrochemical noise Analysis And Applications For Commercial Li-Ion Batteries”, Journal of Solid State Electrochemistry, Vol. 19, Issue 9, pp: 2803-2810, 2015
- [9] G. Hoffmann, “ Noise Measurements On Chemical Batteries”, pp:2-12, 2014
- [10] E. M. Lehockey, A. M. Brennenstuhl, G. Palumbo, P. Lin, “British Corrosion Journal”,



Vol:33, No:1, pp: 29-26, 1998

[11] V. Upadhyay, “Advanced Electrochemical Methods For Characterizing The Performance Of Organic Coatings”, North Dakota State University, ss:1-200, 2012

[12] S. Ritter, F. Huet, R. A. Cottis, “Guideline For An Assessment Of Electrochemical Noise Measurement Devices”, Material And corrosion, Vol:63, No: 4, 2012

SERBEST PARÇACIKLI MODÜLER ZIRH TASARIMI

Murat AYDIN^{1*}, Mustafa SOYDEMİR²

¹Erciyes Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uçak Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye

²Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivil Havacılık Anabilim Dalı, Kayseri, Türkiye

Özet

Ülkelerin siyasi ve ekonomik gücünü belirleyen unsurlarından birisi olan savunma sanayiinde, dünyada yaşanan teknolojik gelişmelere paralel olarak değişime, yeniliğe ve modernizasyona sürekli olarak ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle savunma teknolojileri alanında faaliyet gösteren askeri ve sivil kuruluşlar, gelişen silah sistemlerine karşı, ağırlığı azaltarak hareket kabiliyetini arttıracak yüksek performanslı zırh sistemleri geliştirmek için çalışmaktadırlar.

Modern balistik zırhlar genel olarak ya homojen izotropik malzemelerden ya da kompozit yapılardan oluşmaktadır. Katmanlı kompozit plakalar da bu amaçlar için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında incelenen zırh sistemi modüler bir yapıya sahip olup, dış duvarlar ve bu duvarlar arasında bulunan serbest parçacıklardan oluşmaktadır. Yapı içerisinde bir sıvı gibi davranan bu parçacıklar hedefe çarpan cisimi kararsızlaştırarak yön değiştirmesini sağlamış ve bunun neticesinde plakada tam delinme engellenmiştir. Bu zırh sistemin bilinen diğer zırhlardan farklı ve üstün kılacak yenilikçi yönleri, koruma altına alınmak istenilen bölgeye taşınması ve kurulmasının oldukça kolay ve kısa sürede mümkün olması, kurulması için özel eğitilmiş personel ve teçhizat gerektirmemesi, yeniden kullanılabilir olması, düşük maliyetli olması, tekrarlı isabetlerde dayanımını devam ettirmesi ve mermi ya da fırlatılan cismin zırh üzerinden geri sekmemesi şeklinde sıralanabilir.

Zırh teknolojisi alanında gerçekleştirilen bu çalışmada hem askeri hem de sivil savunma sanayiinde kullanılabilecek, yüksek performansa sahip, serbest parçacıklı modüler bir zırh tasarlanarak, balistik testleri gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Terminal Balistik, Balistik Performans, Zırh Teknolojileri

FREE PARTICLE MODULAR ARMOR SYSTEM DESIGN

Abstract

As an indicator of political and economic power, defense industry continuously requires change, innovation and modernization depending on technological development across the world. It is for this reason; countries designate critically important scientific studies as priority research fields. Modern ballistic armors are manufactured either from isotropic or composite materials. Layered composite plates are used frequently for this objective. Armor systems to be developed with this project will embody two wall layers and free particles in between. The particles in the body behaved like a fluid, destabilize the impactor, divert it, and finally a perforation will be prevented. Innovative and superior features of the armor system considered to be developed are easiness of transportation, short set up time, no requirement for a specially trained staff and special tools, reusability, low costs, durability against repetitive hits and no rebounding. In this study, a high performance and modular free-particle armor was designed, and its ballistic tests were performed. The designed armor technology is expected to be used in both military and civil applications.

Keywords: Terminal Ballistic, Ballistic performance, Armor Technologies

1. GİRİŞ

Balistik; genel anlamda, fişegin ateşlenmesi ile mermi çekirdeğinin namludan çıkıp hedefe ulaşmasına kadar olan hareketlerini, hedef üzerindeki tahribatını ve mermi çekirdeğinin bu hareketine etki eden faktörleri inceleyen bilimdir. İç balistik, dış balistik ve terminal balistiği olmak üzere üç ana disipline ayrılmıştır [1]. Bu çalışma terminal balistik sahasında olup balistik testlerde kullanılan mermilerin, hedef plakaya ulaşmaya kadar geçen zaman içerisindeki hareketleri ve bu hareketleri etkileyen faktörler çalışma kapsamının dışındadır.

Bir yapıyı tüm yönleriyle bütün mermi tehditlerine karşı koruyabilecek bir zırh sistemini tasarlamak yüksek maliyetli ve kütleli olarak çok ağır olacaktır. Bu sebeple yapının ihtiyaç duyacağı koruma seviyesine bağlı olarak en uygun ağırlık-performans oranına sahip bir zırh tasarlamak gerekir. Silah sistemlerindeki teknolojik gelişmeler sonucu koruma kalkanı olarak kullanılan zırhların tehditlere karşı koruma kabiliyetlerini yitirmeleri araştırmacıları zırh sistemlerinde yeni malzeme arayışına ve tasarımlara mecbur bırakmıştır. Bu sahada çalışan araştırmacıların temel motivasyonları, hareket kabiliyetini arttırarak, daha hafif ve daha yüksek performanslı zırh sistemleri geliştirmek üzerine olmuştur [2-5]. Bu gelişmeler doğrultusunda modern zırh sistemlerinde metal malzemeler yerini kompozit malzemelere bırakmıştır. Genellikle katmanlı yapıya sahip olan bu zırh sistemlerinde, mermi uç geometrisinin deforme edilerek nüfuziyet kabiliyetinin azaltılması, mermi kinetik enerjisinin ve çarpma etkisiyle oluşan şok dalgalarının sönmelenmesi, yapısal bütünlüğün ve termal dayanıklılığın sağlanması gibi işlevlere sahip malzemeler kullanılmaktadır [6].

Bilinen zırh sistemlerinde kullanılan malzemeler genel olarak sürekli bir yapıya sahip olup son yıllarda içerisinde bir akışkan ya da serbest partikül içeren zırh sistemleri üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Liu ve arkadaşları [7], içerisinde düzenli olarak dağıtılmış seramik bilye ile desteklenmiş yüksek performanslı beton yapıların, 500 ile 800m/s hız aralığında rijit mermi tesiri altında darbe dayanımlarını incelemişler. LSDYNA sonlu elemanlar paket programı kullanarak yapılan sayısal çalışmada parçacık hidrodinamiği sonlu elemanlar metodunu kullanmışlardır. Yüksek performanslı beton hedeflerin rijit mermi etkisi altındaki davranışları üzerinde, seramik bilye çapı, konumsal diziliş, seramik bilyelerin malzeme tipinin etkilerinin incelendiği çalışmada balistik limit ve tam delinme limit belirlemesi de yapmışlardır. 500 - 850 m/s aralığındaki mermi

hızlarında, 6 katmanlı altıgen dizilimli ve 20mm çapa sahip seramik bilyeler ile desteklenmiş olan model diğerleri ile karşılaştırıldığında en düşük penetrasyon derinliğine sahip olmuştur. Kartuzov ve arkadaşları [8] içerisinde serberst halde alüminyum ve silisyum karbür partikül bulunan hibrit sandviç zırhın balistik darbe etkisi altında davranışlarını sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında dairesel geometriye sahip merminin dikdörtgen profile sahip mermiye kıyasla plaka içerisine daha az penetre olabildiğini ve mermi hızının artması ile penetrasyonun arttığını gözlemlemişlerdir.

Bu çalışma ile geliştirilmek istenen modüler zırh sistemini mevcut zırhlardan ayıran en belirgin fark ta hiç şüphesiz, içerisinde serbest halde bulunan parçacıklardır. Söz konusu zırh modüler bir yapıda olup iki önemli bileşeni bulunmaktadır. Bunlardan ilki dış duvarlar diğeri ise bu duvarlar arasında bulunan serbest parçacıklardır (Şekil 1).



Şekil 1. Modüler Zırh Sistemi

Dış duvarlar serbest olan iç parçacıkları bir arada tutmakla görevli olup, metal ya da polimer ince plaka, plywood, osb veya fiber takviyeli kompozit levha gibi malzemelerden seçilebilirler. Modüler zırh sisteminin en önemli bileşeni olan, dış plakalar arasında serbest olarak bulunan iç parçacıklar ise bir sıvı gibi davranarak hedefe çarpan cismin hareketini kararsızlaştırarak takla atmasını ve yön değiştirmesini sağlayacaktır böylelikle mermi nüfuziyet kabiliyetini kaybedecek ve plakada tam delinme (perforasyon) gerçekleşmeyecektir.

Genel mekanizması yukarıda tariflenen zırh sistemine isabet edecek cismin (mermi, havan topu, tanksavar (RPG), vb.) enerjisini sönmüleyerek onu durduracak olan iç parçacıklar yüksek sertlik,

termal direnç ve basma dayanımına sahip olan malzemeden seçilmelidir. Ağırlığın da azaltılmasından hedefle mevcut malzemeler değerlendirildiğinde yukarıda belirtilen mekanik özellikleri karşılayacak en uygun malzeme olarak seramikler ön plana çıkmaktadır. Balistik uygulamalarda önemli bir bileşen olarak kullanılmakta olan seramik malzemeler hedefe çarpan merminin delici ucunu kalınlaştırarak merminin nüfuziyet kabiliyetini de önemli ölçüde düşürmektedir.

Serbest parçacıklı modüler zırh sistemleri kritik öneme sahip birçok alanda etkin balistik koruma sağlayacak istidadı olup Amerika ve Avrupa ülkeleri tarafından geliştirilmekte ve kullanılmaktadır. Ülkemizde bu zırh sisteminin kullanımı olmayıp literatürde de konu ile ilgili bir çalışmaya rastlanmamıştır. Zırh sistemini bilinen zırh sistemlerinden ayıran en önemli özellikler şu şekilde özetlenebilir, zırh sisteminin modüler yapıda olması sebebiyle, korunmak istenilen kişi, araç, alan ya da teçhizat etrafında çok kolay ve hızlı bir şekilde kurulumu yapılabilen ve bu kurulum içinde özel eğitilmiş personel ve donanım gerekmemektedir. Bu sayede kısa süreli ve geçici olarak koruma kalkanı oluşturulma ihtiyacı karşılanabilecektir. Örneğin sınır bölgesinde kurulacak istenen geçici bir karargâh için betonarme binaların yapılması gerek maliyet gerekse zaman açısından zahmetli olacaktır fakat bu zırh sistemi ile çok kısa bir süre içerisinde ve düşük maliyette koruma bölgesi oluşturulabilecektir. Balistik zırh sistemlerinde bir diğer önemli kabiliyet de zırh sisteminin aynı noktaya tekrarlı atışlarda dayanım göstermeye devam etmesidir. Genel olarak balistik koruyucular her bir isabet sonrası mukavemetini kaybederek belli bir atış tekrarı sonucu delinirler.

Bu çalışma ile tasarlanacak zırhı diğer zırhlardan üstün kılacak bir diğer özellik te, zırhın her bir atış sonrası kendini yenileyerek ilk durumuna geri dönecek olmasıdır. Bu da zırhın sürekli olarak koruma sağlaması anlamına gelmektedir. Ayrıca zırh sistemine isabet eden merminin yön değiştirmesi ile mermi sistem içerisinde kalacağından merminin zırha çarpıp geri sekme problemi de olmayacaktır.

2. ZIRH SİSTEMİNİN OLUŞTURULMASI

Deneysel olarak gerçekleştirilen bu çalışmada, modüler zırh sisteminin tasarlanması önemli bir aşama olup balistik performans üzerindeki etkilerinin incelenmesi gereken birçok parametre mevcuttur. Yukarıda genel yapısı tariflenen zırh sistemi, dış duvarlar ve dış duvar malzemesi

arasında bulunan serbest parçacıklardan oluşmaktadır. Seçilecek olan dış duvar malzemesi, zırhın isabet alması sonrasında kırılmamalı ve üzerinde, parçacıkların çapından daha büyük bir çapta delik oluşmamalıdır. Zira böyle bir durumda zırh sistemi içerisindeki seramik parçacıklar dışarı dökülecek ve zırh sistemi balistik koruma kabiliyeti kaybedecektir. Bu çalışmada dış duvar malzemesi olarak; 2.5mm kalınlığa sahip alüminyum plaka kullanılmıştır (Şekil 2). Alüminyum plakalar sünek bir davranış göstermiş olup yaklaşık 40 adet 9x19mm parabellum mermi isabeti sonrasında seramik parçacıkların zırh sistemi içeride kalmasını sağlamıştır.

Modüler zırh sistemi yapısındaki en önemli bileşen dış plakalar arasında bulunan iç parçacıklardır zira bu parçacıklar mermi nüfuziyeti sonrası merminin delici ucunu deforme ederek kalınlaşmasını sağlayacak ve mermi enerjisini sönmüleyecektir ayrıca bu bölgede, iç parçacıkların serbest olması sebebiyle mermi yön değiştirerek arka yüzeye ulaşamayacaktır. İç parçacık olarak bu çalışmada 15mm çapa sahip porselen bilyeler kullanılmıştır.



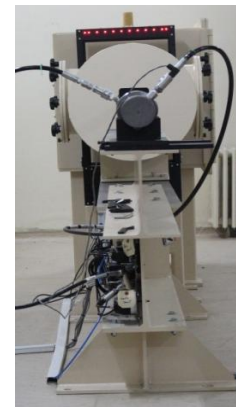
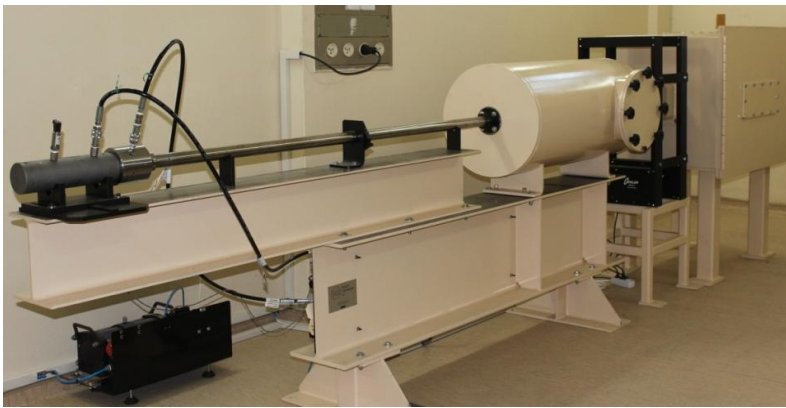
Şekil 2. Al dış duvar ve porselen iç parçacıklar kullanılarak tasarlanmış modüler zırh sistem.

3. BALİSTİK TESTLERİN YAPILMASI

DeneySEL çalışmaların ikinci kısmında, tasarım aşaması tamamlanan modüler zırh sisteminin balistik testleri yapılmıştır. Balistik testler 9x19 mm parabellum mermisi kullanan ateşli silah ve 0.3 kalibre parçacık benzetimli (FSP) mermi kullanan gaz silah sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ateşli silah ile atışlar yaklaşık 3 metre mesafeden yapılmış olup isabetler sonrası zırh sistemin ön ve arka yüz deformasyonları incelenmiştir. Zırh sistemi balistik limitinin belirlenmesi için Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mekanik Laboratuvarında bulunan gaz silah (gas gun) sistemi kullanılmıştır (Şekil 3). Balistik testlerde kullanılan 9x19 mm

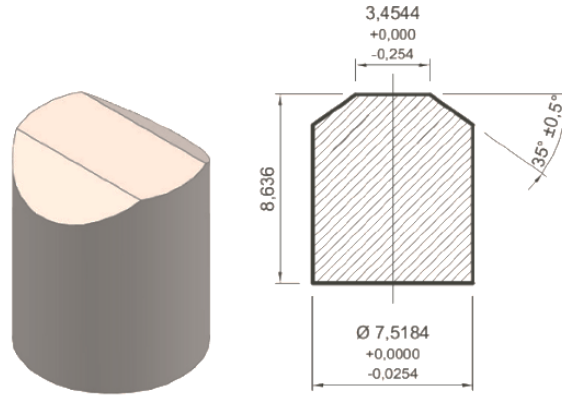
parabellum mermisi pirinç (CuZn36) ceket ve kurşun-antimon çekirdekten oluşmaktadır. Mermi ağırlığı 8 gram olup merminin silah namlusundan çıkış hızı yaklaşık olarak 370 m/s'dir. Balistik testlerde kullanılan bir diğer mermi de 0.3 kalibre FSP (Fragment Simulating Projectiles) parçacık benzetimli mermilerdir. 0.3 kalibre FSP mermileri MIL-DTL-46593B standardına uygun olarak AISI 4340H çeliğinden imal edilmiş olup özellikleri Şekil 4'te verilmiştir.

Malzemelerin balistik performansının belirlenmesinde çeşitli standartlar mevcuttur. Bu standartların amacı, yüksek yoğunluklu aşındırıcı mermilere karşı geliştirilmiş zırh malzemelerinin sınıflandırılması ve balistik performans değerlendirmesinin geliştirilmesinde ihtiyaç duyulan test ekipmanı, prosedürler, hedefler ve terminoloji için bir genel metodoloji sağlamaktır.



Şekil 3. Gaz silah sistemi.

Malzeme	AISI 4340H-4337H
Ağırlık (grain)	44±0.5
Sertlik (RC)	30±2



Şekil 4. 0.30 kalibre FSP mermi.

Balistik darbe analizlerinde, zırh sisteminin mekanik özelliklerinin bilinmesinin yanı sıra, darbe etkisini oluşturan mermi veya penetratörün de özelliklerinin iyi bilinmesi gerekir. Çünkü mermi türüne göre oluşacak darbe etkileri farklılıklar gösterir. Gelişen teknoloji ile farklı silahlar için hız, geometrik şekil, çekirdek yapısı gibi özellikleri birbirinden çok farklı mermi türleri geliştirilmiştir. Tablo 1 ve Tablo 2’de sırasıyla NIJ ve STANAG standartlarında balistik koruma seviyeleri verilmiştir.

Tablo 1. NIJ 0101.03 Balistik koruma seviyeleri [10].

SEVİYE	MERMİ TİPİ	MERMİ HIZI (m/s)	MERMİ AĞIRLIĞI (g)
I	38 Special RN Lead - 22 LRHV LEad	259- 320	10.2 - 2.6
II-A	357 Magnum JSP - 9mm FMJ	381 - 332	10.2 - 8.0
II	357 Magnum JSP - 9mm FMJ	425 - 358	10.2 - 8.0
III-A	44 Magnum - 9mm FMJ	426 - 426	15.55 - 8.0
III	7.62 mm FMJ	838	9.7
IV	30-06 AP	868	10.8

Geliştirilmek istenen modüler zırh sisteminin hangi koruma seviyelerinde etkin olarak kullanılabileceğinin belirlenmesi önem arz etmekte olup buda optimum plaka kalınlığının tespiti ile mümkün olacaktır. Bu çalışma ile STANAG 4569 standardı 3. seviye tehditlere karşı bir zırh geliştirilmesi hedeflenmektedir. Bu standarda göre 3. seviyedeki bir zırhın, yaklaşık olarak 930 m/s hıza sahip bir 7.62x51mm NATO mermisini durdurması anlamına gelmektedir.

4. SONUÇLAR

Serbest parçacıklı modüler zırh sisteminin 9x19 mm parabellum tabanca mermisi kullanılarak yapılan balistik testlerinde, hedef bölgesine yerleştirilen 10 cm kalınlığa sahip zırh sitemi üzerine yaklaşık 3 metre mesafeden 40 atış yapılmıştır.

Tablo 2. STANAG-4569 Balistik koruma seviyeleri [11].

SEVİYE	MERMİ TİPİ	MERMİ HIZI (m/s)	TEHDİT TİPİ	MESAFE
5	25mm x 137 APDS-T, PMB 073	1258	Otomatik Cannon APDS mühimmatı	500 m
4	14.5mm x 114 API/B32	911	Ağır makineli tüfek AP mühimmatı	200 m
3	7.62mm x 51 AP	930	Tüfek: AP tungsten karbür çekirdek	30 m
3	7.62mm x 54R B32 API	854	Tüfek: AP tungsten karbür çekirdek	30 m
2	7.62mm x 39 API BZ	695	Tüfek: zırh delici çelik çekirdek	30 m
1	7.62mm x 51 NATO	833	Tüfek: Pirinç kaplamalı kurşun çekirdek	30 m
1	5.56mm x 45 NATO	900	Tüfek: Pirinç kaplamalı kurşun çekirdek	30 m
1	5.56mm x 45 M193	937	Tüfek: Pirinç kaplamalı kurşun çekirdek	30 m

Testler sonrasında plaka ön ve arka yüzelerindeki deformasyonlar incelendiğinde (Şekil 5) mermi zırh ön yüzeyinde bulunan alüminyum plakayı delmiş ve zırh sisteminin içerisinde kalmıştır ayrıca zırh üzerinden sekme olmamıştır. Tekrarlı atışlar altında zırh sisteminde tam nüfuziyet (perforasyon) gerçekleşmemiş ve zırh koruma görevine devam edebilmiştir. Atışlar sonrası zırh sistemi içerisinde bulunan porselen parçacıklar arasına dağılmış halde bulunmuş olan mermiler toplanarak deformasyonları incelenmiştir. Bir kısmı Şekil 6’da verilen mermilerde çok yüksek deformasyon mevcuttur. Şekildeki mermi ve parçacıkları zırh sistemi içerisinden çıkarılan en büyük boyutlu olanlardır, diğer parçalar bu resimde görülenlere kıyasla oldukça küçük parçalara bölünmüştür. Mermi, porselen bilyelerle çarptıktan sonra parçalara ayrılmış ve enerjisini önemli ölçüde kaybetmiştir. Sonuç olarak 10 cm kalınlıktaki serbest parçacıklı modüler zırh için bu mermi tipi ve enerji seviyesi oldukça düşük etki oluşturmuştur. Daha sonraki çalışmalarda 9x19 mm tabanca mermisi için optimum plaka kalınlığı tespiti yapılacaktır. Gaz silah sistemi ile 0.3 kalibre FSP mermi kullanılarak gerçekleştirilen balistik atışlarda, zırh sistemi hedef tankı içerisine sabitlenmiş ve aynı noktaya 543, 627, 743, 925, 1160 ve yaklaşık olarak 1400 m/s hızlarında atışlar yapılarak, 10cm kalınlığa sahip zırh sistemi için balistik limit tespit edilmek istenmiştir.



Şekil 5. 9x19 mm parabellum tabanca mermisi isabeti sonrası zırh sistemi ön ve arka yüzey görüntüleri.

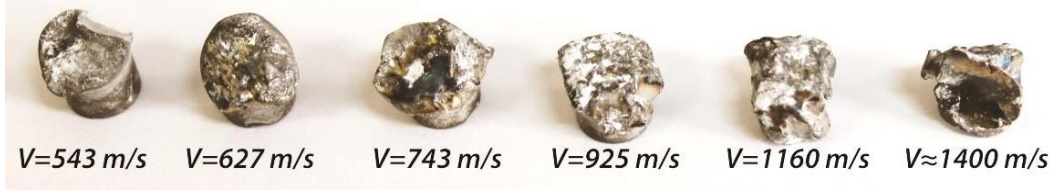


Şekil 6. 9x19 mm mermi deformasyon görüntüleri.

Balistik limit ışık geçecek oranda kısmi nüfuziyetin meydana geldiği durum olarak tariflenebilir. Bütün hız değerleri için tasarlanan serbest parçacıklı zırh sistemi tam koruma göstermiş olup hiçbir hızda zırhta tam nüfuziyet olmamıştır. Test sonrası zırh sistemi içerisinde çıkarılan mermiler incelendiğinde, porselen bilyeler mermi delici ucunu kalınlaştırarak merminin nüfuziyet gücünü kaybetmesine sebebiyet vermişlerdir. Şekil 7’de 0.3 kalibre FSP mermilerdeki deformasyonların mermi hızının artmasıyla birlikte önemli ölçüde arttığı da görülmektedir.

Zırh sistemi 1400 m/s mermi hız değerinde delinmemiştir ve bu hız değeri, gaz silah sisteminin mermiyi fırlatabileceği en üst limiti olması sebebiyle 10cm kalınlığa sahip serbest parçacıklı modüler zırh sisteminin balistik limitinin hesaplanması mümkün olamamıştır. İstenilen koruma seviyesi için optimum kalınlığın hesap edilmesi çalışmanın ilerleyen safhalarında incelenecektir

Sonuç olarak üzerinde çalışılan bu zırh sisteminin, koruma altına alınmak istenilen bölgeye taşınması ve kurulmasının oldukça kolay ve kısa sürede mümkün olması, kurulması için özel eğitilmiş personel ve teçhizat gerektirmemesi, yeniden kullanılabilir olması, düşük maliyetli olması, tekrarlı isabetlerde dayanımını devam ettirmesi ve mermi ya da fırlatılan cismin zırh üzerinden geri sekmemesi gibi üstün özelliklere sahip olması ve balistik performansının yüksek olması sebebiyle Türk Savunma Sanayisine katkı sağlayacak potansiyele sahiptir.



Şekil 7. 0.30 kalibre FSP mermi deformasyon görüntüleri.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmaya Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi FYL-2016-6812 nolu proje ile finansal destek sağlamış olup destekleri sebebiyle Erciyes Üniversitesine teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- [1] Cihangiroğlu, B. Adli Bilimler I. Jandarma Kriminal Daire Başkanlığı Yayınları, 2011.
- [2] Alper, İ., Çoruhlu, A. Silah Sistemleri ve Balistik Ders Kitabı. Kara Kuvvetleri Komutanlığı Kara Harp Okulu Komutanlığı, 2006.
- [3] Gooch, W.A. “An Overview Of Ceramic Armor Applications” The American Ceramic Society, 2002.
- [4] Charles, A. “Developing an ultra-lightweight armor concept”, IV. International Conference on Advanced Ceramics and Glass, 485–498, 2001.
- [5] Orlovskaya, N. “Design and manufacturing B4C-SiC layered ceramics for armor applications”, in 105th Annual Meeting of The American Ceramic Society, 59–70, 2003.
- [6] Hazell, P. J. Armour Materials, Theory and Design. London: CRC Press, 2016.
- [7] Liu J., Wu C., Li J., Fang J., Su Y. and Shao R., “Ceramic balls protected ultra-high performance concrete structure against projectile impact—A numerical study”, International Journal of Impact Engineering, 125:143-162, 2019.
- [8] Kartuzov V., Kartuzov I. and Mikhailov O., “Computer modeling of process of projectile’s penetration into discrete-element armor panel”, Procedia Engineering 204:92–99, 2017.
- [9] Evcı, C., Seramik kompozit zırh sistemlerinin darbe ve balistik özelliklerinin belirlenmesi,



Doktora tezi, Gazi Üniversitesi, 2009.

[10] NATO STANAG 4569, Protection levels for occupants of logistic and light armoured vehicles, 2004.

[11] NIJ Standard 0101.03, Ballistic Resistance of Personal Body Armor, 1987.

ANALYSIS OF THERMAL EXPANSION AND MICRO-DELAMINATION PHENOMENON OF CUTTING TOOL THIN SURFACE COATINGS IN HIGH-SPEED DRY MACHINING¹

Sadettin Cem ALTIPARMAK²

*School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering, The University of Manchester
Manchester, United Kingdom*

ABSTRACT

High-speed machining (HSM) is one of the commonly implemented recent machining technologies in industrial manufacturing operations. It enables higher efficiency and accuracy by reducing production cost and machining cycle times depending on the specific manufacturing operation requirements and demands. Particularly, dry machining is characterised with severe level of temperature and heat generation enters into cutting tools rather than machining with cutting liquid. HSM implementations lead to detrimental effects on tool lifespan resulting in premature cutting tool failure or tool damages. In order to overcome this problem, cutting tool thin surface coatings are applied to reduce the amount of heat transferring into cutting tool to enhance tribological conditions and wear resistance of cutting tools. However, as a result of the coefficient of thermal expansion (CTE) mismatching of coating layer materials, delamination phenomenon can be observed in coating structures during machining. As outcomes of the study based on the results obtained, total dimensional thermal expansion and micro-delamination of the most appropriate optimised 3-layered coating structure relatively decreased compared to 2-layered coatings, and the necessity of the thermal expansion capacity consideration in coating implementations was revealed for related Finite Element Analysis (FEA) simulations and coating structure designs.

Keywords: HSM technology; Multi-layer coatings; Delamination; Thermal expansion; CTE

¹This study was prepared based on the data of MSc dissertation named ‘‘Analysis of Thermal Expansion of Cutting Tool Thin Coatings Using Finite Element Modelling’’ of the corresponding author.

² *corresponding author:* scemaltiparmak@gmail.com

YÜKSEK-HIZLI KESİMDE KULLANILAN KESİCİ TAKIMLARA UYGULANAN YÜZEY KAPLAMASINDAKİ TERMAL GENLEŞME VE MİKRO-KATMAN AYRIŞMASI OLUŞUMLARININ ANALİZİ

ÖZET

Yüksek-hızlı kesim tekniği (YHK) günümüzde sanayide yaygınca kullanılan bir metal kesme tekniğidir. Üretimin verimliliğini arttırırken imalat gereksinimlerine bağlı olarak işlem süresini ve maliyeti düşürür. Özellikle kuru kesim ıslak kesime nazaran, yüksek mertebelerdeki sıcaklık ve kesici takımın içerisine transfer olan ısı oluşumuyla karakterize edilir. Kuru hızlı kesim uygulamaları kesici takımın ömrünün azaltılmasına ve kesici takımda beklenenden erken hasarlara yol açar. Bu sorunun ortadan kaldırılmasıyla ilgili olarak transfer olan ısıyı ve kesici takımın yüzeyinin yenmesini azaltmak aynı zamanda kesici takımın sürtünme durumunu arttırmak için kesici takımlara ince yüzey kaplamaları uygulanır. Ancak metal kesme işlemi boyunca bu yüzey kaplama malzemelerinin termal genleşme değerlerinin farklılığından dolayı katman ayrışması olayı gözlemlenebilir. Buradan hareketle elde edilen sonuçlara dayanarak yapılan çalışmada, 3-katmanlı optimize edilmiş yüzey kaplamasında 2-katmanlı yüzey kaplamalarına nazaran toplam aksenal genleşme ve katman ayrışması azalmıştır. Ayrıca termal genleşme kapasitesi sonlu elemanlar analizlerinde ve çoklu yüzey kaplamaları dizaynlarında göz ardı edilmemesinin gerekliliği ortaya koyulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Yüksek-hızlı kesim tekniği; Çoklu yüzey kaplamaları; Katman ayrışması; Termal genleşme; Termal genleşme katsayısı

1. INTRODUCTION

In industry, the term ‘machining’ is used to characterise the operations where the chip formation occurs. Even though chip-formation operations called machining is commonly associated with several big-scale industries such as aerospace and automotive industries, machining has also other implementation areas for precision and ultraprecision machining [1]. In conventional machining, as a sub-category of machining, materials are removed from the surface of workpiece to give part desired shape by deforming the workpiece irreversibly called plastic deformation [2]. Considering the consuming coolant, machining operations can be categorised as wet and dry machining. Although coolant fluids are advantageous to diminish heat generation and take away cutting debris from the cutting contact area, coolant fluids have hazardous effects on environment and health of operator. Therefore, the dry machining implementation trend has become a widely preferred alternative to avoid demerits of wet machining due to its sustainable and environmentally-friendly features [3]. Since severe amount of tool temperatures are generated compared to wet machining processes during the dry machining processes, cutting tools used in dry machining operations should have a high level of hardness capacity particularly at elevated temperatures [4]. Moreover, severe temperature levels can be reached in dry machining depending on the cutting parameters and type of machining process. The amount of generated heat at this temperature levels and cutting forces, in turn, can lead to detrimental effects on cutting tool lifespan resulting in premature tool failure or tool damages due to high rate of plastic deformation, which leads to high machining process expenditures for manufacturers [5].

To overcome the mentioned problem, tool manufacturers apply several techniques to reduce the amount of heat transferring into the cutting tools during machining processes e.g. single or multi-layer hard and soft functional thin surface coating implementations for cutting tools with the appropriate coating layer thickness based on the specific features of machining process such as the workpiece being machined, cutting tool material and cutting demands in order to prolong the life of cutting tools and increase wear resistance as well as tribological performance of the cutting tools [6]. However, as a result of the mismatching of thermal expansion coefficient (CTE) values of cutting tool and substrate or different materials of cutting tool thin coating layers, micro-delamination phenomenon and thermal expansion occurrence can be observed especially in HSM processes due to higher temperature generation compared to low and medium-speed machining

processes, which effects machining efficiency and manufacturing cost resulting by premature tool failure. Therefore, there is a necessity for thermal expansion of the thin surface coatings of cutting tools and delamination phenomenon to be taken into consideration in surface cutting tool coating combinations and finite element analyses.

1.1.High-Speed Machining Technology

HSM is one of the up-to-date machining technologies that allows manufacturers to enhance machining accuracy by descending machining time, production cycle and cost. Even though HSM is mostly applied and known during the last seven-eight decades, still any standard definition proposed has not been approved yet for HSM [7]. It is stated that high-speed machining is not simple to be defined and compared with other conventional machining processes, since the actual experienced cutting speed in machining depends on several parameters e.g. material of workpiece, cutting tool type and cutting speed as illustrated in Fig. 1. Therefore, the definition of HSM can be associated with the whole conducted machining technology.

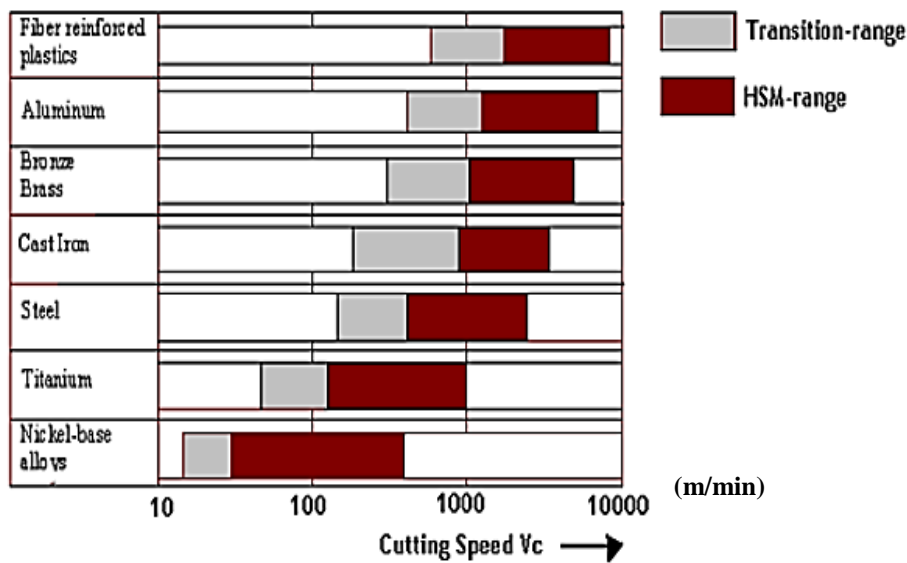


Figure 1: High-speed cutting scales based on workpiece materials being machined [8]

All the workpiece material illustrated in the Fig. 1 has its own range for cutting regime. Therefore, in order to characterise whether the machining operation is HSM or not, type of workpiece material being machined, cutting speed and cutting technology should be individually considered [8].

In addition to reducing machining time and cost, HSM has some other advantages, which outweighs the disadvantages of HSM as illustrated in Fig. 2. The most relevant merit related to this paper is that in HSM processes, relatively less amount of heat is generated in the cutting zone and then less amount of heat is transferred into cutting tool comparing to traditional machining and low machining operations, which prolongs the lifespan of cutting tools used in HSM processes in manufacturing industry.

Moreover, HSM enables to provide better surface finish and part precision, reduction in cutting forces and workpiece distortion while decreasing the leading time of products. Apart from these merits of HSM technology, HSM has some demerits in addition to high deformation rate, which varies depending on the workpiece material being machined, desired production shape and geometry as follows; elevated amount of tool wear rate, tooling expenditure including spindles and controllers, difficulties in fixturing as well as the necessity of innovation in cutting tool geometries and coatings to compensate the drawbacks of HSM [9].

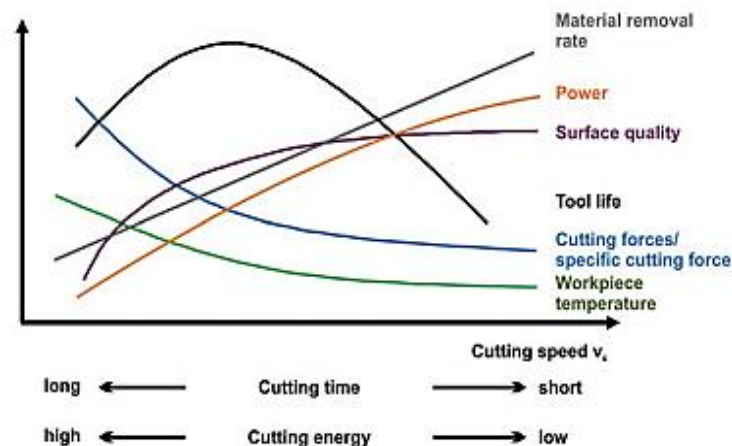


Figure 2: Main features of HSM [10]

1.2. Cutting Tools and Coatings

In the recent competitive environment of manufacturing industry, due to the high machining efficiency and productivity as well as shorter lead time demand of manufacturing products, the innovation and research necessity of cutting tools and coatings has revealed. In this regard, cutting tools used in HSM processes should mainly have high hardness, toughness and stress resistance to withstand the wear mechanisms and tool deformation due to the elevated amount of generated heat, vibration existence and deformation rate in HSM processes.

In order to meet the requirements of machining processes by enhancing the thermal, wear and tribological properties of cutting tools used in industry, cutting tools are coated with single or multi-layer outer hard coatings such as TiN, TiCN and Al₂O₃. Some of the key features need to be considered in the coating structures can be briefly expressed as [11];

Selecting of the coating material

- Thermal coating layer expansion and delamination phenomenon throughout the machining process
- Pre-planning of CTE mismatching both among single-layer coating materials and cutting tool substrate- inner coating layer before designing multi-layer coating structures

Some main characteristics of cutting tools used in HSM i.e. low thermal conductivity, high work hardening level and the amount of the heat transferring into cutting tools lead to premature tool failure and shorten the lifespan of cutting tools in HSM. In order to overcome this problem, most of the broadly used cutting tools in manufacturing industry have appropriate multi-layer outer thin coatings depending on the machining operation demands and workpiece being machined-cutting tool couple [12].

In literature, some comparative studies [13][14][15][16] asserted that the results of surface roughness, tool wear and machining performance of cutting tools with multi-layer coatings were determined as much better compared to uncoated cutting tools. In this sense, another key factor which impacts on machining performance and tool lifespan is coating thickness. In another study [17], the impacts of the coating thickness were investigated from some perspectives and it is deduced that increment in coating layer thickness has positive effects on tool life by postponing delamination occurrence. Moreover, enhanced coating layer thickness, in turn, leads to an increase in edge radius and residual stresses of the interface.

On the other hand, thermal properties of coatings have significant effects on machining processes. Some materials with relatively low thermal conductivity can play role as a thermal barrier in multi-layer coating structures when applied as coating surface film. In this regard, these coatings have capacity to remove a large amount of heat from cutting tool by chip formation [18].

Coating implementations as a thermal barrier in multi-layer cutting tool coatings can be associated with elevated cutting tool-formed chip temperature increment as a result of HSM operations. When these severe levels of process temperatures were reached, most of the

parameters of the machining process differentiate e.g. tool friction and deformation rates [19].

1.3. Heat Generation and Distribution Mechanisms in Turning Process

In heat transfer mechanism, large amount of the total generated energy in the turning process is converted into the heat energy as following forms [20] and the general formulation for the heat conduction is governed by equation (1) [21];

- Heat transfer by conduction between the cutting tool and the workpiece material due to surface-to-surface contact
- Heat transfer by convection into the machining environment in the surfaces where the cutting tool has not surface-to-surface contact
- Heat transfer by convection into the machining environment in the surfaces where the workpiece material being machined has not contact interaction

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{Q}{k} - \frac{h_t \cdot (T - T_o)}{k} = \frac{1}{\alpha} * \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

where, T corresponds to temperature, α and k represent coefficient of thermal expansion and heat conduction

The heat generation is mainly taken place in three zones primary, secondary and tertiary deformation zones. During the machining process, the amount of initially generated heat is revealed at the shear plane and the heat leads to heat increment in the vicinity of the primary deformation zone due to the plastic deformation. Then, comparatively higher amount of generated heat is generated in the tool-chip interface zone as a result of sliding and sticking friction in addition to plastic deformation, which occurs at the sliding (l_{sl}) and sticking (l_{st}) zones that summation of these zones gives the total contact length (L_C) between the formed chip and the surface of the cutting tool. Eventually, heat is generated due to the friction resulting in rubbing between newly machined workpiece surface and the flank face of the cutting tool at the tool-workpiece contact area [22].

1.4. Thermal Expansion, CTE and Delamination Phenomenon

In literature, few studies related with the effects of CTE properties of hard coating materials on thermal expansion of cutting tool coatings and delamination phenomenon are available. Moreover, there are few studies can be founded state that thermal expansion behaviours depending on CTE values of hard coating materials e.g. TiCN, TiN, Al_2O_3 are associated with the microstructure of coating material [23], feature of chemical composition [24] and thickness [25]. In another study [26], bone screwing process was carried out with CTE values of drill bit and bone materials.

The mismatching of the CTE between cutting tool substrate and coating mate or among thin coating layers leads to thermal stress existence in the cutting tool-coatings structure particularly at the levels of elevated temperatures [25]. In this regard, there is a strong link between thermal stress and wear mechanisms that several studies in literature focused on the relation can be accessed [27]. Therefore, to investigate the micro-delamination phenomenon in cutting tool-coating structures, creating an overall understanding of CTE is essential.

Implementation of multi-layer coating systems on cutting tools can be resulted in interlayer delamination existence (as depicted in Fig. 3) and formation of longitudinal cracks due to the CTE mismatching of coating layers and cutting tool coating-substrate couple [28].

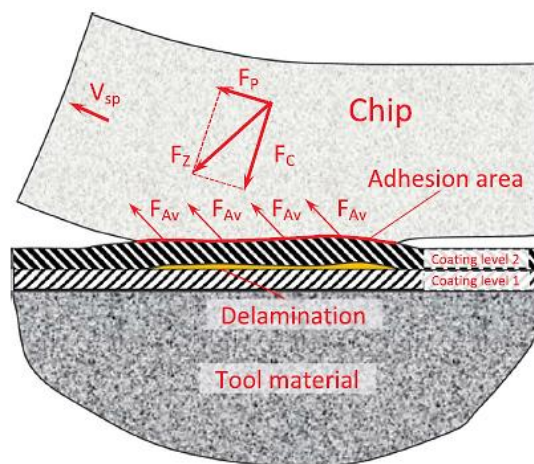


Figure 3: Delamination formation between multi-layer coating layers [28]

where, F_P , F_C and F_Z are thrust, cutting and resultant forces, F_{Av} and V_{sp} represent adhesion force and speed of chip flow respectively

1.5. Estimation of Heat Generation in Machining Process

The estimation of the amount of heat transferring into cutting tool during machining is essential, since this amount of heat limits the cutting tool lifespan and leads to premature tool deformation and failures. In order to investigate the effects of the heat, 100% theoretical amount of heat was calculated based on validated data from literature [29] by following this procedure to apply in tool-workpiece contact area for low speed (314 m/min), medium speed (565 m/min) and HSM (879 m/min) as follows by assuming the rake angle 0° during machining;

The heat generation at the zone of secondary deformation was formalised by frictional force (F_{fr}) as shown in equation (2).

$$F_{fr} = F_v * \sin \alpha + F_f * \cos \alpha \quad (2)$$

where, F_v and F_f represent cutting forces in the equation

Furthermore, the amount of heat flux (q_{st}) per unit (equation 3) is derived from two components as given in equation (4).

$$q_{st} = \tau_{sh} * V_{ch} \quad (3)$$

$$\tau_{sh} = \frac{F_{fr}}{a_p * L_c} \quad V_{ch} = \frac{V_c}{\lambda_h} \quad (4)$$

where, τ_{sh} , V_{ch} and a_p corresponds to shear stress, velocity of formed chip and cutting depth respectively. Moreover, V_c and λ_h are cutting velocity and chip compression ratio

After all the calculations made for three types of machining discipline based on the parameters given in Table 1. Then, theoretical amounts of heats for low, medium and HSM were determined after calculation procedures as $1.387 * 10^6$, $3.025 * 10^6$ and $5.073 * 10^6$ J/(mm².s).

Specifically, prediction of the amount of heat entering cutting tool during HSM can be explained;

$$F_{fr} = (750 * \sin 0^\circ + 400 * \cos 0^\circ) = 400 \text{ N}$$

$$V_{ch} = \frac{V_c}{\lambda_h} = \frac{14650}{2.1} = 6976.2 \text{ m/min} \quad \tau_{sh} = \frac{F_{fr}}{a_p * l_c} = \frac{400}{2 * 275 * 10^{-3}} = 727.27 \text{ N/mm}^2$$

$$Q_{st \text{ final}} = \tau_{sh} * V_{ch} = 6976.2 * 727.27 = 5.0735 * 10^6 \frac{\text{J}}{\text{mm}^2 * \text{s}}$$

Table 1: All parameters applied to calculate the predicted amount of heat per unit [29]

Cutting Speed	L_C	a_P	λ_h	f_v	f_f	Rake Angle	V_{ch}	Contact Area
879 m/min	275 μm	2 mm	2.1	750 N	400 N	0°	14650 mm/s	0.55 mm ²
565 m/min	331 μm	2 mm	2.28	800 N	485 N	0°	4129 mm/s	0.66 mm ²
314 m/min	434 μm	2 mm	2.39	850 N	550 N	0°	5233 mm/s	0.86 mm ²

2. FINITE ELEMENT MODEL AND TRANSIENT COUPLED TEMPERATURE-DISPLACEMENT ANALYSIS

In order to analyse the effects of heat transfer into the cutting tool on cutting tool thin coating, the most appropriate type of FEA for this study was determined as coupled temperature-displacement transient heat transfer analysis, which is performed where the simultaneous solutions of temperature fields and stress/displacement are required. The FEM software Abaqus/CAE 2016 was applied to perform all the orthogonal turning simulations in this study.

2.1. Details of Created Finite Element Model

Single and multi-layer shell elements representing cutting tool thin coatings were created without substrate in SolidWorks® based on real validated cutting parameters by simplifying the FE models to investigate the impacts of the thermal expansion on cutting tool coating layers, and then imported to Abaqus/CAE 2016 software based on real dimensions (0.650x0.187x0.562 inches) of TNMG160404-MS cutting tool with the thickness of 10 μm (0.01 mm). Temperature-dependent material behaviours (as shown in Table 2) such as conductivity, elastic (Poisson's ratio, and Young's modulus), thermal expansion, density and specific heat for three different types of widely used hard coating materials i.e. Al₂O₃, TiCN and TiN were found from literature [29][30][31] and inputted in the pre-processing stage of the simulations.

Table 2: All the temperature-dependent material properties of hard coatings applied [29][30][31]

Thermal and Mechanical Properties of Coatings		Al_2O_3	$TiCN$	TiN
Density, ρ (kg/m ³)		3780	4180	5420
Poisson's Ratio, ν		0.23	0.20	0.25
Young's Modulus, E (GPa)		340	355	250
Coefficient of Thermal Expansion $\times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$ (CTE)	50 °C	4	50 °C 3.15	0 °C 6.25
	100 °C	4.0625	100 °C 4	75 °C 7
	200 °C	4.125	150 °C 4.4	150 °C 8
	300 °C	4.1875	200 °C 4.6	225 °C 8.5
	400 °C	4.25	300 °C 5.25	300 °C 9
	500 °C	4.3125	400 °C 5.9	375 °C 9.25
	600 °C	4.375	500 °C 6.6	450 °C 9.5
	700 °C	4.4375	600 °C 7.15	525 °C 9.7
	800 °C	4.5	700 °C 7.75	600 °C 9.85
	900 °C	4.5625	800 °C 8.25	675 °C 10
	1000 °C	4.625	900 °C 8.75	
	1100 °C	4.6875	1000 °C 9.4	
	1200 °C	4.75		
Thermal Conductivity, λ_T (W/m.°C)	100 °C	17.00	29.00	21.00
	200 °C	14.10	29.90	21.47
	300 °C	12.50	90.60	22.00
	400 °C	10.80	61.50	22.52
	500 °C	8.75	32.00	23.00
	600 °C	7.50	33.00	23.72
	700 °C	6.50	33.50	24.38
	800 °C	6.00	34.50	25.01
	900 °C	5.50	35.00	25.50
Specific Heat, C_p (J/Kg.°C)	100 °C	903	1030	702.60
	200 °C	1022	1020	752.70
	300 °C	1089	1040	783.40
	400 °C	1139	1070	801.16
	500 °C	1176	1120	818.90
	600 °C	1202	1260	833.46
	700 °C	1220	1350	846.39
	800 °C	1237	1660	856.00
	900 °C	1252	1810	857.60

10-node modified thermally coupled second-order tetrahedron mesh element (C3D10MT) was selected for mesh generation by making mesh refinement (0.05 element size) in workpiece-coating contact area where the highest temperature gradients were predicted to be occurred in the model of cutting tool thin coating structures (Fig. 4) to obtain relatively more accurate results.

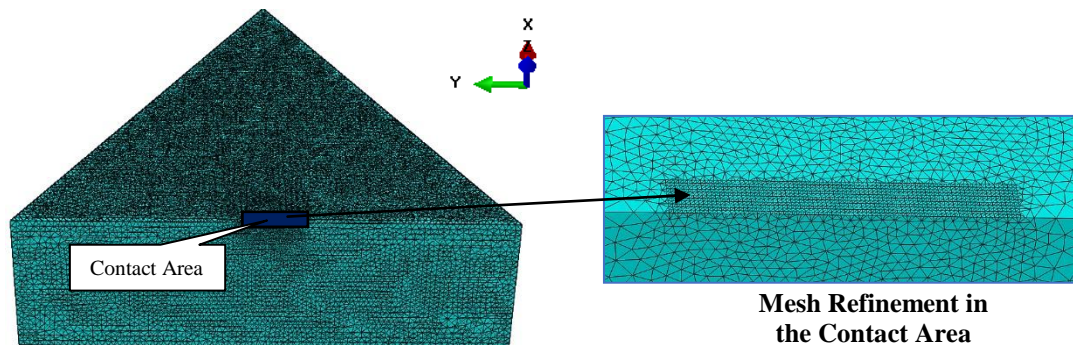


Figure 4: Created FE model and mesh refinement

Some boundary conditions (BC) and assumptions were set in the FEM coupled temperature-displacement transient heat transfer analysis as follows;

- The amounts of heat fluxes applied in simulations were assumed as constant across the cutting depth width (a_p) and the heat loss due to radiation was neglected
- Convective heat loss for the surfaces which are not in contact in the model and sink temperature were determined as $h = 10 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ and $25 \text{ }^\circ\text{C}$
- Single and multi-layer cutting tool coatings were fixed by choosing Symmetry/Antisymmetric/Encastre BC option to investigate dimensional expansion based on a reference surface
- The initial temperature of the machining environment was set as $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (Room Temp.)

Several simulations representing single and multi-layer coating structures were conducted as listed in Table 3;

Table 3: All the simulations conducted		
Simulations for Single-Layer Coatings (1-Layer)		
Al_2O_3 –314 m/min	TiCN–314 m/min	TiN–314 m/min
Al_2O_3 –565 m/min	TiCN–565 m/min	TiN–565 m/min
Al_2O_3 –879 m/min	TiCN–879 m/min	TiN–879 m/min
Simulations for Multi-Layer Coatings (2 and 3-Layers)		
Al_2O_3 -TiCN 879 m/min	TiN-TiCN 879 m/min	Al_2O_3 -TiN 879 m/min
	TiCN- Al_2O_3 -TiN 879 m/min	

3. DETERMINATION OF THE MOST APPROPRIATE MULTI-LAYER COATING COMBINATION BASED ON THE RESULTS

Coating layer combinations for cutting tools in manufacturing industry varies depending on machining task, workpiece material being machined and specific machining operation [32].

The principal features need to be taken into consideration to determine coating structures for cutting tools can be summarised as follows [32];

- The selection of material for coatings by considering some mechanical and thermal properties such as heat generation, thermal stress resulting wear mechanisms and thermal expansion due to CTE mismatching resulting in delamination and premature tool failure
- Layer and dimension growth (expansion) throughout the machining and coating process resulting in premature tool failure
- Pre-planning of single-layer coatings for designing of multi-layer coating structures

In this regard, in order to design the most appropriate multi-layered cutting tool thin coating structure to apply for HSM simulations for this study, initially nine simulations (Table 3) representing single-layer coating were conducted for low, medium and HSM by applying the corresponding amount of heat during the machining time.

To meet the objectives of the study, three paths were created as illustrated in Fig.5 below to measure thermal stress and expansion as well as displacement caused by thermal expansion. Each path was started from the cutting-edge and placed on either rake or flank face of the cutting tool coatings. In detail, Path-1 and Path-3 were located along the rake face, whereas Path-2 was created 0.078 inches far from the center of the contact area on the flank face of the cutting tool coating. Then, results obtained from these paths were evaluated by creating graphs and making comparisons.

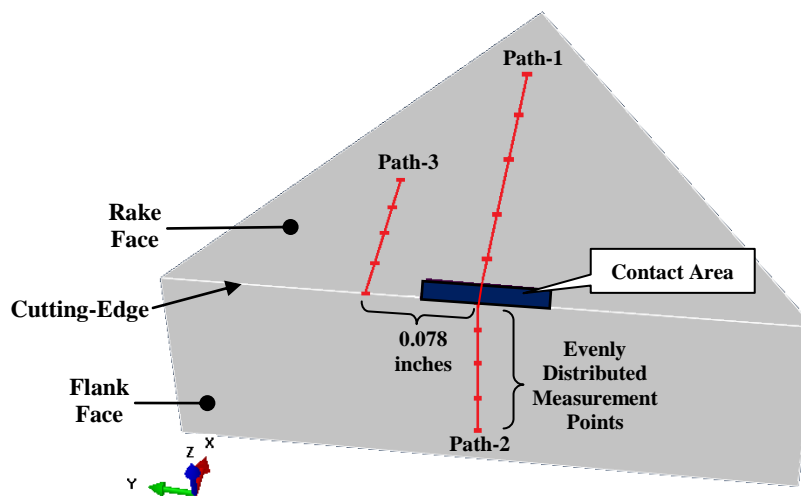


Figure 5: Paths created in the models

3.1. Results of Single-Layer Coating Structure Simulations

The generated temperature, thermal stress, thermal expansion and total dimensional thermal expansion occurrence (along the rake face X-Direction, flank face Z-Direction and cutting-edge Y-Direction) results were obtained and then compared. To investigate the effect of the cutting speed and coating material, results were compared by keeping the cutting speed and coating material constant.

It can be deduced from the results that thermal stress and expansion existence were increased by increasing the cutting speed. Hence the highest level of thermal stress and expansion were

observed in HSM, whereas the lowest results were obtained for low-speed machining due to the relatively higher level of plastic deformation rate taken place in HSM process. To mention the effects of the temperature increment for each type of coating material in parallel with the cutting speed increase, the results of TiCN coating material were given as an example in Fig. 6.

The higher temperature results were observed on the rake face of the coating compared to the flank face of the coatings, namely higher temperature levels were measured from the Path-1 rather than Path-2. Specifically, the higher temperature generation was obtained for TiCN coating material in all the orthogonal cutting simulations for low, medium and HSM processes, whereas the lowest temperature results were recorded for cutting tool coatings composed of Al_2O_3 coating material. As an example, temperature results were compared in Fig. 7 below in Path-2 to assess the effect of coating material in HSM process. Therefore, it is inferred that Al_2O_3 coating material has the capacity to be used as thermal barrier in the multi-layer coating combinations.

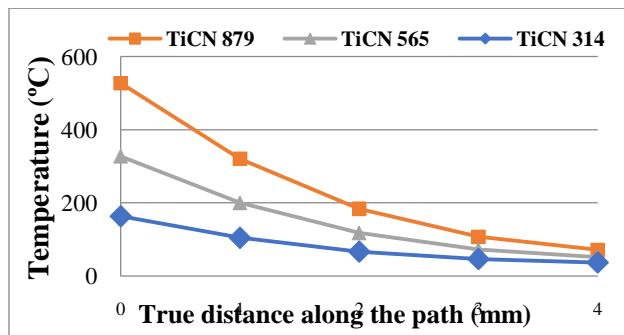


Figure 6: Temperature increment in single-layer TiCN coating (Path-2)

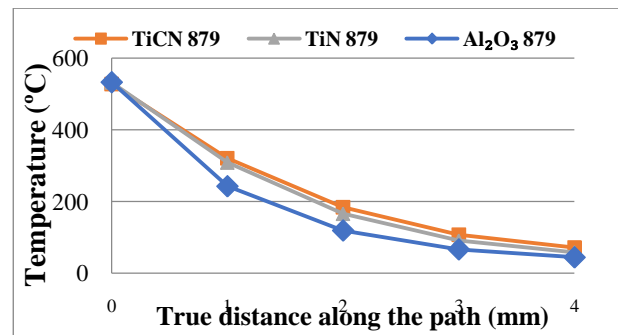


Figure 7: Temperature results for each coating material in HSM operation (Path-2)

In addition to temperature generation results, the results of thermal stress and displacement because of thermal expansion as well as expansion in thickness were given in Fig. 8, 9 and 10.

Thermal stress can be mentioned as another key factor that restricts the lifespan of cutting tools used in manufacturing industry. In this sense, remained thermal stress existence after machining of previous machining pass effects on the machining quality and precision of the following machining pass, which leads to relatively shorter tool life due to premature tool failure [33] and tool wear mechanisms [34]. Even though slightly higher amount of thermal stress generation was obtained on the rake face of cutting tool coatings, particularly the highest level of thermal stress was measured in the vicinity of Path-3, therefore, cutting tool deformation and failure can be

primarily expected to occur in the vicinity of Path-3 (Fig. 8) in single-layer coating implementations. On the other hand, the maximum displacement occurrence was obtained on the rake face of coating structures in the nearby of Path-1 (Fig. 9). Therefore, micro-delamination and micro-cracking phenomena can possibly be taken place in the vicinity of Path-1. That is why the investigation priority of the micro-delamination and micro-cracking should be initially given to rake face of single-layer cutting tool thin coatings.

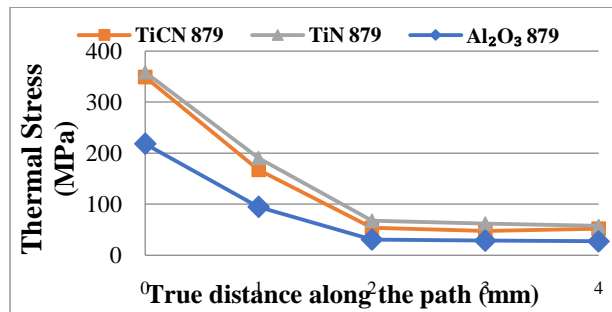


Figure 8: Thermal stress results for each coating material in HSM operation (Path-3)

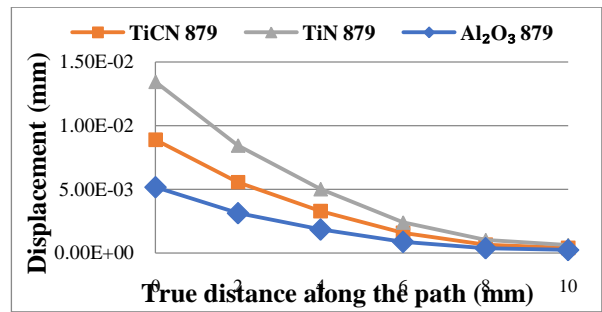


Figure 9: Displacement results of each single-layer coatings in HSM (Path-1)

Moreover, the maximum thickness expansion results in Z-Direction of the rake faces of single-layer coatings were graphed in Fig. 10 and the highest and the lowest thermal expansion existences in coating thickness of TiN and Al₂O₃ coating material were associated with the relatively higher and lower CTE values of TiN and Al₂O₃ coating materials as given in Table 2.

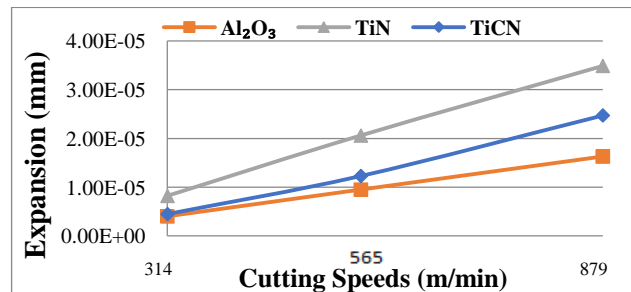


Figure 10: Maximum thickness expansion (in Z-Direction on the rake faces)

3.2. Results of Multi-Layer Coating Structure Simulations

In this part of the study, three different simulations for 2-layered coating combinations (Al₂O₃-TiCN, TiN-TiCN and Al₂O₃-TiN) were conducted for HSM with 879 m/min cutting speed by keeping all the parameters constant. Then, the thermal stress and expansion results measured from

the paths were compared. The slightly similar overall trend was observed for Al_2O_3 -TiCN and Al_2O_3 -TiN 2-layers coatings, whereas relatively higher temperature (Fig. 11) and thermal stress was generated for TiN-TiCN cutting tool coating. The delamination occurrence and total dimensional expansion results were also illustrated in Fig. 12 and Fig. 13, and the highest amount of delamination and dimensional expansion on the rake (X-Direction), flank faces (Y-Direction) and cutting edge (Z-Direction) were observed for TiN-TiCN multi-layer coating.

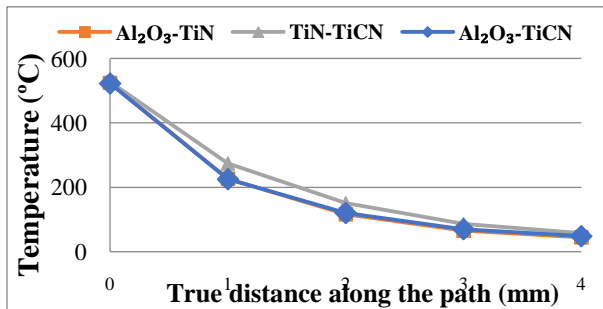


Figure 11: Temperature results for 2-layers coatings in HSM (Path-2)

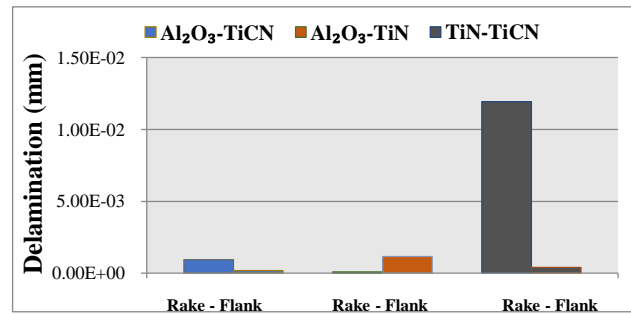


Figure 12: Delamination results of rake and flank faces of 2-layers coatings (Z and Y-Directions)

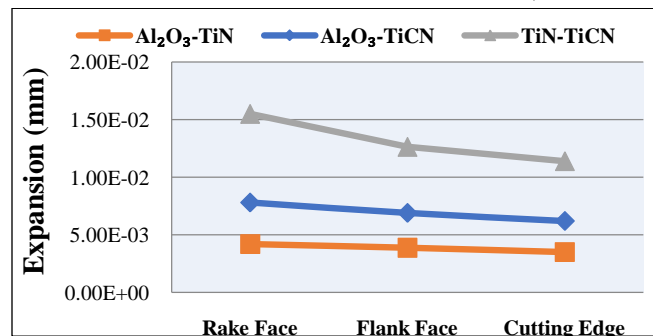


Figure 13: Delamination occurrence comparison of 2-layers coatings

As an overall discussion of single-layer and 2-layers coating results, it is deduced that TiN-TiCN 2-layers coatings should not have any contact interaction (surface-to-surface), since the highest temperature, delamination (Fig. 14 with 1.000e+01 deformation scale factor) and thermal stress results were generated in TiN-TiCN 2-layers coatings. The lowest temperature generation was measured for Al_2O_3 single-layer coating material as mention earlier. That is why Al_2O_3 coating material was placed in the middle layer of 3-layers coating combination as a thermal isolator to avoid having surface-to-surface contact of TiN-TiCN coating layers resulting in the maximum delamination occurrence. Last of all, due to the highest temperature results of TiCN single-layer

coating, the TiCN coating was decided as the outer coating surface to keep maximum temperature generation away from the cutting tool to decrease the heat transferring into the substrate of cutting tools. Accordingly, the optimisation for 3-layers coatings was made determining the most appropriate cutting tool thin coating structure combination for this study as TiCN-Al₂O₃-TiN. Eventually, the last simulation was conducted (879 m/min) for the most appropriate 3-layers coating combination. Then, the delamination occurrence was illustrated in Fig. 15 as follows;

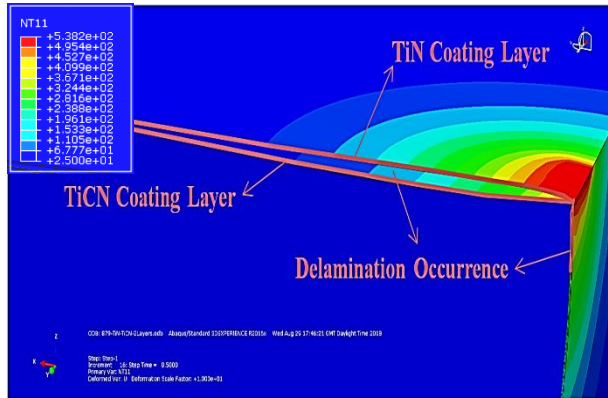


Figure 14: Cross-sectional view cut along the rake face of TiN-TiCN 2-layers coating to illustrate delamination existence in HSM

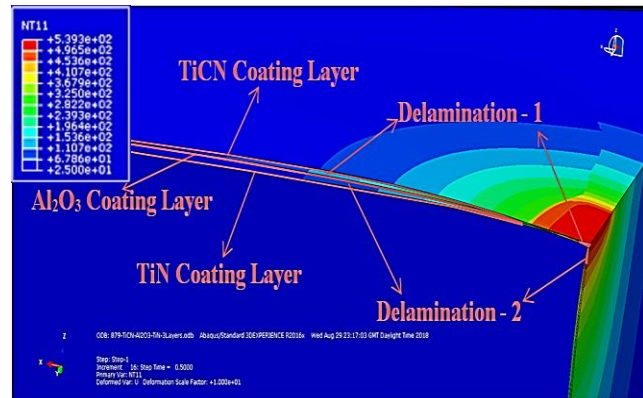


Figure 15: Appearance of delamination existence of TiCN-Al₂O₃-TiN multi-layer coating in HSM after cross-sectional view cut along the rake face

3.3. Comparison of Multi-Layer Coating Structures (2 and 3-Layers)

The increment in the layer number of multi-layer coatings has several positive effects. For instance, the total dimensional thermal expansions of TiCN-Al₂O₃-TiN multi-layer coating structure (Fig. 16 at the bottom) on the rake (X-Direction), cutting-edge (Y-Direction) and flank faces (Z-Direction), which can be attributed to the CTE mismatching of coating materials, were comparatively less rather than other 2-layers coating structures. Furthermore, it can be inferred from Fig. 17 that the delamination existence between TiCN-Al₂O₃-TiN coating structure layers is comparatively lower than delamination existence in 2-layers coating combinations. In detail, a considerable level of micro-delamination was obtained on the rake face of the outer coating layer couple (TiCN-Al₂O₃) of the 3-layers coating structure, however, it can be tolerated due to the location of the layer couple.

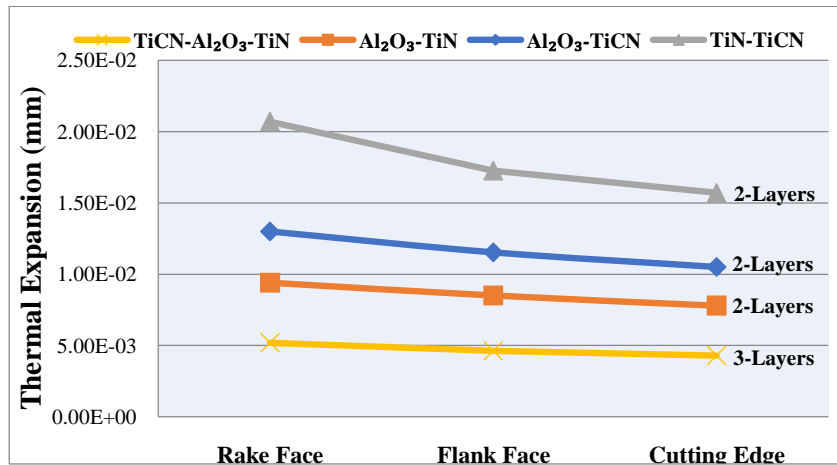


Figure 16: Dimensional thermal expansion comparison of multi-layer coatings

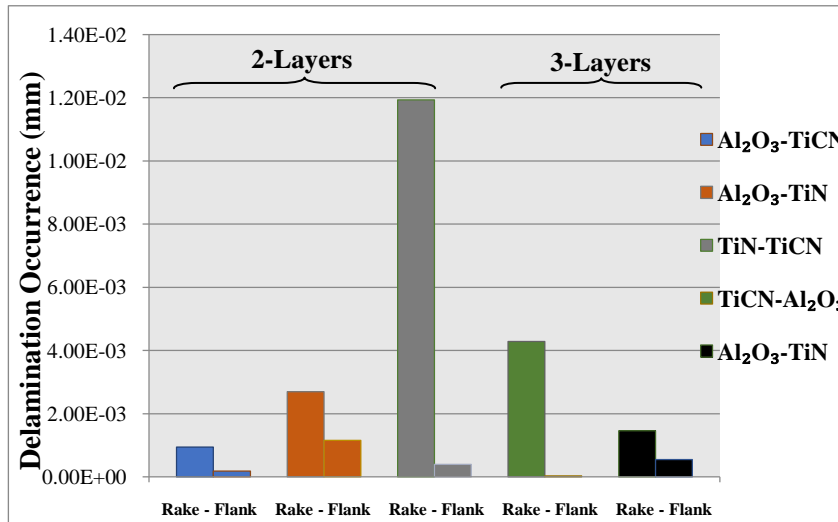


Figure 17: Delamination comparison in multi-layer coatings on the rake and flank faces (Z and X-Directions)

4. CONCLUSIONS

In this study, several orthogonal dry machining simulations were performed through one of the widely used commercially available FEM software Abaqus/CAE 2016 in order to investigate the effects of the theoretical amount of heat entering into cutting tool on thermal expansion and micro-delamination phenomenon of the cutting tool thin multi-layer coatings of the TNMG160404-MS carbide cutting tool after determining the most appropriate coating layer combination based on the comparison of micro-delamination, thermal stress and expansion.

These conclusions from general to specific were achieved as follows;

1. It is deduced taking into results of single and multi-layer coatings account that the highest amount of temperature generation, delamination phenomenon, thermal stress and thermal expansion were measured in the vicinity of the contact areas of the single and multi-layer coatings in HSM process, whereas the lowest results were obtained for low-speed machining, which can be associated with the elevated deformation rate in parallel with cutting speed.
2. Since the relatively higher level of micro-delamination, thermal stress and expansion were observed on the rake face of single and multi-layer coating structures, premature tool failure and deformation as well as the existence of one or more wear mechanism can possibly be taken place on the rake face of cutting tool coatings. Therefore, the priority of micro-delamination and wear investigation should be given to the rake faces of the cutting tool coating structures.
3. TiN and TiN-TiCN single and multi-layer coating materials can be characterised by high thermal expansion and micro-delamination existence due to the relatively high CTE values of TiN coating material. In this regard, micro-delamination phenomenon should be necessarily considered for the coating structures including TiN based coatings.
4. Due to the comparatively low level of CTE and thermal conductivity values of Al_2O_3 coating material, among other hard coating materials particularly at elevated temperatures, Al_2O_3 coating layer can be applied as a thermal isolator in various of coating combinations depending on the specific demands of the machining processes.
5. TiCN- Al_2O_3 -TiN multi-layer coating structure was determined for this study using three widely used hard coating materials in industry as the most appropriate coating combination. It is asserted that in the case of applying this coating combination, the least amount of heat was possibly predicted to be transferred into the TNMG160404-MS carbide cutting tool resulting in relatively less amount of wear rate and tool deformation as well as prolonged tool lifespan.
6. As a result of the increment in the number of coating layers for multi-layered coating structures, the thermal stress generation and total dimensional thermal expansion on the cutting-edge, rake and flank face were declined. Therefore, it is inferred that tool deformation and wear mechanisms can be occurred with less probability in 3-layers

coating combinations rather than 2-layers. In this respect, TNMG160404-MS carbide cutting tool with 3-layers coating is expected to have the longest tool lifespan compared to the carbide tool with single-layer and 2-layers cutting tool thin coating, in turn, resulting in the less cutting tool expenditure for the manufacturers in manufacturing industry.

REFERENCES

- [1] M. Staszuk, D. Pakuła, G. Chladek, M. Pawlyta, M. Pancielejko, and P. Czaja, “Investigation of the structure and properties of PVD coatings and ALD + PVD hybrid coatings deposited on sialon tool ceramics,” *Vacuum*, vol. 154, no. March, pp. 272–284, 2018.
- [2] K. Aslantas, T. I. Uzun, and A. Çicek, “Tool life and wear mechanism of coated and uncoated Al₂O₃/TiCN mixed ceramic tools in turning hardened alloy steel,” *Wear*, vol. 274–275, no. February 2018, pp. 442–451, 2012.
- [3] D. Dudzinski, A. Devillez, A. Moufki, D. Larrouquere, V. Zerrouki, and J. Vigneau, “A Review of Developments Towards Dry and High Speed Machining of Inconel 718 Alloy,” *Int. J. of Machine Tools & Manufacture*, Vol.44, pp. 439-456, 2004.
- [4] G. S. Goindi and P. Sarkar, “Dry machining: A step towards sustainable machining—Challenges and future directions,” *J. Clean. Prod.*, vol. 165, pp. 1557–1571, 2017.
- [5] M. Fahad, P. T. Mativenga, and M. A. Sheikh, “Critical design factors for multi-layer coating systems that influence heat partition in the secondary shear deformation zone and machining performance,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 226, no.6, pp. 1071–1085, 2012.
- [6] A. Hosokawa, K. Shimamura, and T. Ueda, “Cutting characteristics of PVD-coated tools deposited by Unbalanced Magnetron Sputtering method,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 61, no. 1, pp. 95–98, 2012.
- [7] X. Zhang, R. Huang, K. Liu, A. S. Kumar, and X. Shan, “Rotating-tool diamond turning of Fresnel lenses on a roller mold for manufacturing of functional optical film,” *Precis. Eng.*, vol. 51, no. July 2017, pp. 445–457, 2018.
- [8] H. Schulz and T. Moriwaki, “High-speed Machining,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 41, no. 2, pp. 637–643, 1992.
- [9] P. Fallböhmer, C. A. Rodríguez, T. Özel, and T. Altan, “High-speed machining of cast iron and alloy steels for die and mold manufacturing,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 98, no. 1, pp. 104–115, 2000.

- [10] Neugebauer, R., Bouzakis, K.-D., Denkena, B., Klocke, F., terzing, A., Tekkaya, A.E., Wertheim, R., Velocity Effects in Metal Forming and Machining Processes, *Annals of CIRP* Vol. 60/2, p. 627-650, 2011.
- [11] F. Klocke, T. Krieg, K. Gerschwiler, R. Fritsch, V. Zinkann, M. Pöhls, and G. Eisenblätter, “Improved Cutting Processes with Adapted Coating Systems,” *CIRP Annals*, vol. 47, no. 1, pp. 65–68, 1998.
- [12] K. D. Bouzakis, N. Michailidis, G. Skordaris, E. Bouzakis, D. Biermann, and R. M’Saoubi, “Cutting with coated tools: Coating technologies, characterization methods and performance optimization,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 61, no. 2, pp. 703–723, 2012.
- [13] A. Devillez, F. Schneider, S. Dominiak, D. Dudzinski, and D. Larrouquere, “Cutting forces and wear in dry machining of Inconel 718 with coated carbide tools,” *Wear*, vol. 262, no. 7–8, pp. 931–942, 2007.
- [14] K. K. Gajrani, S. Suresh, and M. R. Sankar, “Environmental riendly hard machining performance of uncoated and MoS₂coated mechanical micro-textured tungsten carbide cutting tools,” *Tribol. Int.*, vol. 125, no. December 2017, pp. 141–155, 2018.
- [15] K. Aruna Prabha, B. Srinivasa Prasad, and N. Srilatha, “Comparative Study of Wear Patterns of both Coated and Uncoated Tool Inserts in High Speed Turning of EN36 Steel,” *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 2, pp. 4368–4375, 2018.
- [16] S. Kumar. T., R. Ramanujam, M. Vignesh, N. Tamiloli, N. Sharma, S. Srivastava and A. Patel, “Comparative evaluation of performances of TiAlN, AlCrN, TiAlN/AlCrN coated carbide cutting tools and uncoated carbide cutting tools on turning Inconel 825 alloy using Grey Relational Analysis,” *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 279, pp. 331–342, 2018.
- [17] F. Qin, Y. K. Chou, D. Nolen, and R. G. Thompson, “Coatingthickness effects on diamond coated cutting tools,” *Surf. Coatings Technol.*, vol. 204, no. 6–7, p p. 1056–1060, 2009.
- [18] L. Braginsky, A. Gusarov, and V. Shklover, “Models of thermal conductivity of multilayer wear resistant coatings,” *Surf. Coatings Technol.*, vol. 204, no. 5, pp. 629–634, 2009.
- [19] N. Abukhshim, P. Mativenga, and M. Sheikh, “Heat generation and temperature prediction in metal cutting: A review and implications for high speed machining,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 46, no. 7-8, pp. 782–800, 2006.
- [20] K. Gok, ‘Development of three-dimensional finite element model to calculate the turning processing parameters in turning operations’, *Measurement*, 75, pp. 57-68, 2015.

- [21] A. Gok, K. Gok, and M. B. Bilgin, 'Three-dimensional finite element model of the drilling process used for fixation of Salter-Harris type-3 fractures by using a K-wire', *Mechanical Science*, 6, pp. 147-154, 2015.
- [22] Akbar, F., Mativenga, P. T. and Sheikh, M. A. 'An evaluation of heat partition in the high-speed turning of AISI/SAE 4140 steel with uncoated and TiN-coated tools', *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 222(7), pp. 759–771, 2008.
- [23] P.H. Mayrhofer, C. Mitterer 'High-temperature properties of nanocomposite TiB_xN_y and TiB_xC_y coatings, Surf. Coat. Technol', 133-134, pp. 131–137, 2000.
- [24] R. Daniel, D. Holec, M. Bartosik, J. Keckes, C. Mitterer, 'Size effect of thermal expansion and thermal/intrinsic stresses in nanostructured thin films: experiment and model', *Acta Mater.* 59, pp. 6631–6645, 2011.
- [25] R. Daniel, K.J. Martinschitz, J. Keckes, C. Mitterer, 'The origin of stresses in magnetron-sputtered thin films with zone T structures', *Acta Mater.* 58, pp. 2621–2633, 2010.
- [26] M. Erdem, K. Gok, B. Gokce, A. Gok, 'Numerical analysis of temperature, screwing moment and thrust force using finite element method in bone screwing process', *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*, Vol. 17, No. 1, 1750016 (16 pages), 2017.
- [27] P.H.Mayrhofer, C. Mitterer, J.Musil 'Structure–property relationships in single-and dual-phase nanocrystalline hard coatings', *Surf. Coat. Technol.* 174-175, pp. 725–731, 2003.
- [28] Vereschaka, A. A. 'Delamination and longitudinal cracking in multi-layered composite nanostructured coatings and their influence on cutting tool life', *Wear. Elsevier B.V.*, wear.2017.07.021, 390–391(July), pp. 209–219, 2017.
- [29] Fahad, M., Mativenga, P. T. and Sheikh, M. A., 'An investigation of multilayer coated (TiCN/Al₂O₃-TiN) tungsten carbide tools in high speed cutting using a hybrid finite element and experimental technique', *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 225(10), pp. 1835–1850, 2011.
- [30] Krajinovic, I., Daves, W., Tkadletz, M., Teppernegg, T., Klünsner, T., Schalk, N., ... Czettl, C., Finite element study of the influence of hard coatings on hard metal tool loading during milling. *Surface and Coatings Technology*, 304, 134-141, 2016.
- [31] Bartosik, M., Holec, D., Apel, D., Klaus, M., Genzel, C., Keckes, J., ... Mayrhofer, P. H., Thermal expansion of Ti-Al-N and Cr-Al-N coatings. *Scripta Materialia*, 127, 182-185, 2017.



- [32] Klocke, F. and Krieg, T., 'Coated tools for metal cutting - features and applications', *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 48(2), pp. 515–525, 1999.
- [33] Kumar, M. P., 'Study on Tool Life and its Failure Mechanisms', 2(4), pp. 126–131, 2015.
- [34] B. Prakash, J.Mukerji, S.Kalia, 'Tribological properties of Al₂O₃/TiN composites', *Am. Ceram. Soc. Bull* 77, pp. 68–72, 1998.

UÇUCU KÜL KULLANIMININ FARKLI DAYANIM SINIFLARINDAKİ BETONLARIN MEKANİK VE DURABİLİTE ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

İlker TULGA¹, Kadir KILINÇ²

*Kırklareli Üniversitesi Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığı Kayalı Kampusu Kırklareli
Kırklareli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölüm, Kırklareli*

Özet

Dünya yirminci yüzyılla birlikte hızlı bir endüstriyel gelişim içerisine girmiştir. Bu gelişim medeniyet açısından büyük getiriler sağlamakla birlikte endüstriyel atıkların çevreye olumsuz etkileri göz önüne alındığında büyük sorunlar karşımıza çıkmaktadır. Bu atık malzemelerin yararlı geri dönüşüm mekanizmaları ile değerlendirilmesi maliyet açısından ve aynı zaman da çevresel etkilerin iyileştirilmesi açısından önem kazanmaktadır. Çevresel olarak sorun oluşturan inşaat sektöründe kullanımı mevcut olan uçucu kül gibi endüstriyel bir atık malzemenin geri dönüşüm olarak değerlendirilmesi hem çevresel açıdan hem de betonun özelliklerini iyileştirmesi açısından insanlığa büyük katkılar sağlayacağı düşünülmektedir. Bu çalışmada Çanakkale Biga Bekirli Termik Santralinin uçucu külünün betonun mekanik ve durabilite özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. 4 farklı dayanımda beton karışımı üretilmiştir. Her bir beton sınıfı için şahit beton, uçucu kül içeren beton ve uçucu kül içermeyen beton üretilmiştir. Uçucu kül kullanım yüzdesi çimento miktarının % 20'si, kimyasal katkı yüzdesi ise toplam bağlayıcı miktarının % 1'i olarak alınmıştır. Numunelerde 3, 7, 28 ve 56 gün sonunda basınç dayanımı testi uygulanmıştır. Yarmada çekme dayanımı testleri de yapılmıştır. Dayanıklılık testi olarak ise donma-çözünme testi gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak C20/25 sınıfı betonlarda uçucu kül kullanımı 3, 7 ve 56 günlük basınç dayanımlarını şahite oranla artırmış, ancak 28 günlük basınç dayanımını azaltmıştır. Uçucu kül içermeyen betonun 3 günlük basınç dayanımı şahit betonun 3 günlük basınç dayanımından daha düşüktür. C25/30 sınıfı betonlarda uçucu kül kullanılan betonların en yüksek basınç dayanımınının 56. günde elde edildiği gözlenmiştir. C30/37 ve C35/45 sınıfı betonlarda erken dayanım sonuçlarına bakıldığında uçucu külün erken dayanımları artırmadığı ileri ki dayanımları artırdığı görülmüştür. Tüm beton sınıfları için uçucu kül kullanımı yarmada çekme dayanımlarını artırmıştır. Farklı dayanım sınıflarındaki betonlarda ve kendiliğinden yerleşen betonda uçucu kül kullanımı donma-çözünme direncini artırmıştır.

Anahtar Kelimeler: Uçucu kül, Beton, Basınç dayanımı, Yarmada çekme dayanımı, Donma-çözünme direnci.

EFFECT OF FLY ASH USE ON THE MECHANICAL AND DURABILITY PROPERTIES OF CONCRETES WHICH HAVE DIFFERENT STRENGTH LEVEL

Abstract

The world has entered a rapid industrial development with the twentieth century. This development provides great returns in terms of civilization, but when considering the negative effects of industrial wastes on the environment, big problems arise. The reuse of these waste materials with useful recycling systems is important both in terms of economic and environmental impacts. It is thought that an industrial waste-fly ash generally preferred in the construction industry which become problem to the environment is considered as recycling and will contribute to humanity in terms of improving both environmentally and concrete properties. At this experimental study, effect of fly ash which has been derived from Çanakkale Biga Bekirli Thermal Power Plant on the mechanical and durability properties of concrete was investigated. Four concrete mixture which have different strength level were produced. For each concrete class, control concrete, concrete with fly ash and concrete without fly ash were produced. The percentage of fly ash was 20 percent of the cement amount. Chemical admixtures was used as 1 percent of total binder amount. Compressive strength results were found for 3, 7, 28 and 56 day specimens. In addition, split tension strength result was determined. Freezing and thawing resistance was also investigated. Consequently, for C20/25 concrete, it was found to be significant that fly ash use increased 3, 7 and 56 day compressive strength results. However, fly ash use reduced 28 day compressive strength result. 3 day compressive strength of concrete without fly ash is less than 3 day compressive strength of control concrete. The greatest compressive strength result of concrete using fly ash in C25/30 concretes was obtained for 56 day specimens. It was significant that fly ash use increased the later compressive strength. For C30/37 and C35/45 concretes, fly ash does not increase the earlier compressive strength. However, fly ash increases the later compressive strength results. Fly ash use for all concrete classes has increased split tension strength results. Fly ash use for both all concrete classes has increased the freezing and thawing resistance.

Keywords: Fly ash, Concrete, Compressive strength, Split tension strength, Freezing and thawing resistance.

1. GİRİŞ

Dünya yirminci yüzyılla birlikte hızlı bir endüstriyel gelişim içerisine girmiştir. Bu gelişim medeniyet açısından büyük getiriler sağlamakla birlikte endüstriyel atıkların çevreye olumsuz etkileri göz önüne alındığında büyük sorunlar karşımıza çıkmaktadır. Bu atık malzemelerin yararlı geri dönüşüm mekanizmaları ile değerlendirilmesi maliyet açısından ve aynı zaman da çevresel etkilerin iyileştirilmesi açısından önem kazanmaktadır. Çevresel olarak sorun oluşturan inşaat sektöründe kullanımı mevcut olan uçucu kül gibi endüstriyel atık malzemenin geri dönüşüm olarak değerlendirilmesi hem çevresel açıdan hem de betonun özelliklerini iyileştirmesi açısından insanlığa büyük katkılar sağlayacağı düşünülmektedir. Beton özelliklerini iyileştirmek için üretimde uçucu kül gibi bir mineral katkının yanında kimyasal katkıları da kullanılabilir. Kimyasal katkıları betonun işlenebilirliğini iyileştirmede, priz sürelerini hızlandırma veya geciktirmede, dayanım kazanma oranını kontrol etmede, donatı dayanıklılığı artırmada, alkali-silika reaksiyonu, sülfat etkisi ve korozyondan korunmada tercih edilir [1]. Aynı zamanda kimyasal katkıları betonda sürüklenmiş hava kabarcıkları oluşturabilir ve suyun yüzey çekmesini değiştirebilir [2]. Kimyasal katkıların işlevi iki farklı şekilde olmaktadır. Birinci işlevi sağlayan kimyasal katkıları çimento-su ile etkileşim yaparak suyun yüzey çekmesini değiştirir. İkinci işlevi sağlayan kimyasal katkıları ise iyonik bileşenleri bozar ve çimento ile su arasında gerçekleşen kimyasal tepkimeleri yönlendirir. Tablo 1'de kimyasal katkıların beton özelliklerini iyileştirmedeki faydaları, kimyasal katkı çeşitleri ve sınıfları sunulmuştur [3]. Su azaltıcı kimyasal katkıların işlevi çimento-su arasındaki hidratasyon reaksiyonlarına dayanır. Çimento ile su arasındaki hidratasyon reaksiyonları tamamlandıktan sonra etrenjit oluşumu gerçekleşir. Çimento inceliği ve bileşimi, özellikle C_3A anabileşen miktarı, SO_3 ve alkali miktarları etrenjit oluşturma miktarını etkileyebilir [1]. Süperakışkanlaştırıcılar yüksek miktarda su azaltıcı kimyasal katkılarıdır. Süperakışkanlaştırıcılar çimento taneleri tarafından adsorbe olduğunda, negatif yüke sahip olurlar. Negatif yüklü olması çevreleyen suyun yüzey çekmesini azaltır ve bu sayede betonun akıcılığı artar. Su miktarını % 20–30 azaltırlar [1]. Kimyasal katkıları TS EN 206:2013+A1 Türk Standardında, taze veya sertleşmiş beton özellikleri değiştirilmek istendiğinde, karışım sürecinde betona, çimento ağırlığının yüzdesi olarak karışıma eklenen katkıları olarak tanımlanmıştır [4]. Kimyasal katkı kullanılması getireceği avantajlar belirtilecek olursa beton maliyeti azalabilir, beton özellikleri iyileşebilir, betonun karışım

sürecinden yerleştirme sürecine kadar beton kalitesi iyileşebilir [5]. Kimyasal katkıların kullanım uygunluğunun TS EN 934-2+A1 standardına göre incelenmesi gerekmektedir [4, 6].

Tablo 1. Kimyasal katkıların beton özellikleri üzerinde yararlı etkileri, kimyasal katkı tipleri ve kategorileri

Beton Özelliği	Kimyasal Katkı Tipi	Katkı Kategorisi
İşlenebilirlik	Su azaltıcılar	Kimyasal
	Hava sürükleyiciler	Hava sürükleme
	Mineral toz	Mineral
	Puzolanlar	Mineral
Priz kontrolü	Priz hızlandırıcılar	Kimyasal
	Priz geciktiriciler	Kimyasal
Dayanım	Su azaltıcılar	Kimyasal
	Puzolanlar	Mineral
	Priz geciktiriciler	Kimyasal
Dayanıklılık	Hava sürükleyiciler	Kimyasal
	Puzolanlar	Mineral
	Su azaltıcılar	Kimyasal
	Su itici kimyasal katkılar	Kimyasal

Mineral katkıları ise puzolanlardır. Eğer bir malzeme kalsiyum hidroksitle tepkimeye girebiliyorsa puzolanik aktiviteye sahip bir malzemedir ve “puzolan” olarak adlandırılır. Bir puzolan amorf silika içerir ve bu da kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek C-S-H jelini oluşturur [3]. Puzolanik malzemeler genellikle camsı formda silika ve alümina içerir ve bunlar da kalsiyum hidroksitle reaksiyona girebilir. Bunun sonucunda ilave C-S-H hidratlar ve kalsiyum alüminat hidratlar oluşur. Bu reaksiyon çimento hidrasyonundan daha yavaştır ve puzolanik çimentoların dayanım artışı hızı Portland çimentolarının dayanım artışı hızından daha düşüktür. Uçucu kül bir puzolanik malzemedir. Uçucu kül, camsı taneli küresel şekle sahiptir. Beton işlenebilirliği üzerinde pozitif bir etkisi vardır. Uçucu küldeki iri taneleri atmak uçucu külün performansını artırabilir [2]. Betonda uçucu kül kullanımı sertleşmiş betonun geçirimsizliğini azaltır ve dayanıklılığını artırır [3]. Ayrıca uçucu kül kullanımı sülfat

etkisi direncini de [1]. TS EN 206:2013+A1 Türk Standardında mineral katkı beton özelliklerini iyileştirmek, dayanıklılığı artırmak amacıyla kullanımı mevcut olan katkı sınıfı olarak tanımlanmıştır. Mineral katkılar iki farklı sınıfta tanımlanmıştır. Birinci sınıf mineral katkılar inert mineral katkılar (Tip I), ikinci sınıf mineral katkılar ise puzolanik mineral katkılar (Tip II) olarak vurgulanmıştır [4]. Puzolanlar Tip II sınıfı mineral katkılardandır. Kullanılacak uçucu külün uygunluk kriterleri TS EN 450-1 standardına göre belirlenir [7].

İşlenebilirlik betonda ayrışma meydana gelmeden betonun kolayca yerleştirilmesi, sıkıştırılması ve bunun sonucunda istenilen görünüşte olmasıdır. Eğer agrega tane şekli ve dağılımı uygunsa, beton kıvamı da yüksekse beton karışımının işlenebilirliği yüksektir. Karışım suyundan dolayı taze betonda bir akıcılık mevcuttur. Kıvam bu akıcılığın bir göstergesidir. Ayrıca su ihtiyacını düşürebilmek için karışımda kimyasal katkı kullanılması da tercih edilebilir [8]. Su kesici ve priz sürelerini geciktiren kimyasal katkılar tercih edildiğinde betonda çok akıcı bir kıvam elde edilebilir. Kıvamı artırmak için karışıma sonradan kesinlikle ekstra su ilave edilmemelidir [1]. İstenilen çökmeyi elde etmek için ve karışım suyunu azaltmak için maksimum agrega tane boyutu artırılmalı, agregadaki pürüzlü ve köşeli tane miktarı azaltılmalıdır, beton karışımında sürüklenmiş hava miktarı artırılmalı ve uçucu kül kullanılmalıdır [1]. Yoğunluğunun düşük olmasından dolayı, uçucu kül, hacimsel olarak çimento, su, veya kum miktarında bir artış olmadan çimento harcı/agrega oranını artırır [1]. Taze beton kolay karıştırılabilir ve taşınabilir olmalıdır. Üniform olmalıdır. Yerleştirme ve sıkıştırmada segregasyon olmamalıdır. Yüzeyi kolaylıkla düzeltilebilmelidir [3]. İşlenebilirlik hem beton karışımlarının maliyetini hem de kalitesini etkileyebilir [1]. Beton karışımlarının işlenebilirliği çimento özellikleri, karışım suyu miktarı, agrega oranları etkisi, agrega özellikleri, zaman ve sıcaklık, katkılardan etkilenmektedir [1, 3]. Çimento miktarının oldukça düşük olması sert bir karışım meydana gelmesine neden olur. Zayıf bir beton yüzeyi elde edilir. Çok yüksek miktarda çimento içeren beton karışımlarında kohezyon mükemmeldir ancak yapışkanlık artar [1]. Betonun işlenebilirliğini yöneten en önemli faktör su miktarıdır. Su miktarını artırmak betonun kolay yayılma ve sıkıştırılabilme özelliğini artırır. Ancak dayanım azalmasının yanı sıra su miktarının artması segregasyona ve terlemeye neden olabilir. İnce tanelerin özgül yüzey alanı daha yüksektir. Bundan dolayı su ihtiyacı artar [3]. Çok ince kumlar veya açılı kumların su ihtiyacı daha yüksektir. Doğal kum yerine kırma kum kullanıldığında beton % 2–3 daha fazla kuma ve 5–10 kg/m³ daha fazla karışım suyuna ihtiyaç duyar [1]. Çok ince kum kullanıldığında su ihtiyacı artar. Doğal kum yerine kırma

kum kullanıldığında betonda % 2-3 daha fazla kuma ve 5-10 kg/m³ daha fazla suya ihtiyaç duyulur [1]. Mineral katkıların işlenebilirlik üzerindeki etkisi çok düşüktür. Hava sürükleyici kimyasal katkılar, su azaltıcı kimyasal katkılar ve priz geciktirici kimyasal katkıları işlenebilirliği artırır [3]. Su-azaltıcı kimyasal katkı taze beton karışımına ilave edildiğinde kıvam artar. Sürüklenmiş hava hamur hacmini artırır ve betonun kıvamını iyileştirir. Aynı zamanda terleme ve segregasyonu azaltarak kohezifliği artırır. Puzolanik katkıları terlemeyi azaltır ve betonun kohezifliğini artırır. Uçucu kül kullanımının kıvam üzerinde olumlu bir etkisi vardır [1].

2. BETON BASINÇ DAYANIMININ ÖNEMİ

Beton karışımı hazırlamadan önce, uygun bileşenin ve oranının seçimi ilk adımdır [1]. 1918 yılında, İllinoi Üniversitesi'nde Lewis Enstitüsünde yapılan testlerin bir sonucu olarak, Duff Abrams su-çimento oranı ve beton dayanımı arasında bir bağıntı kurmuştur. Bu bağıntı, Abrams su-çimento oranı kuralı olarak bilinir. Bağıntı (1)'de verildiği gibidir [1].

$$f_c = \frac{k_1}{k_2^{w/c}} \quad (1)$$

w/c: su-çimento oranı

k₁, k₂: ampirik sabitler

Beton basınç dayanımı, su-çimento oranı ve hidrasyon derecesinin bir fonksiyonudur. Belirli sıcaklıkta hidrasyon derecesi zamana bağlıdır. Su-çimento oranı 0.3'ün altında ise su-çimento oranında düşük azalmalar yapılarak basınç dayanımında yüksek artışlar elde edilebilir [1]. Hidrasyon reaksiyonlarının gelişim süreci beton porozitesi ve basınç dayanımını etkiler. Agrega dayanımı, beton dayanımını belirleyen en önemli faktördür. Agrega boyutu, şekli, yüzey yapısı, tane boyutu dağılımı ve mineralojisi de beton dayanımını farklı derecelerde etkiler [1]. İyi derecede gradasyonlu iri agreganın maksimum tane boyutunda yapılacak bir değişiklik beton basınç dayanımını iki farklı şekilde etkiler. İlk olarak eğer çimento miktarı benzer ve kıvamları birbirine yakın iki farklı karışım mevcutsa maksimum agrega tane boyutu daha yüksek olan betonda karışım suyu ihtiyacı daha düşüktür. Diğer yandan, daha iri agregalar daha çok mikro-çatlak oluşumuna sebep olabilir. Bu etki su-

çimento oranı ve gerilme tipine bağlı olarak değişecektir [1]. Su azaltıcı kimyasal katkıları, betonun hem erken hem de son dayanımını artırabilir. Ekolojik ve ekonomik sebeplerden dolayı puzolanik malzeme kullanımı ve atık kullanımı (mineral katkı olarak) artmaktadır. Portland çimentosunun bir kısmı yerine kullanıldığında, mineral katkıların genellikle erken yaşlarda dayanım üzerinde geciktirici bir etkisi vardır. Mineral katkı kullanımı, betonda boşluk miktarını azaltır [1]. Betonun mekanik özelliklerinden uygulama bakımından en kolay ve en çok tercih edileni beton basınç dayanımıdır. Beton basınç dayanımı belirlenecek olursa betonun diğer özellikleri hakkında bir fikir yürütülebilir. Yüksek dayanıma sahip bir betonda porozite düşük, geçirimsizlik düşük ve beton dayanıklılığı yüksektir. Beton basınç dayanımını tayin etmede küp veya silindir numune kullanılabilir. Eğer beton basınç dayanımı belirlenmesinde, TS EN 12390-3:2010 standardına göre küp numune tercih edilirse basınç dayanımı $f_{c,küp}$, silindir numune tercih edilirse basınç dayanımı $f_{c,sil}$ olarak tanımlanır [9]. Numune şeklinin küp veya silindir olması tercihi basınç dayanımı deneyinden önce mutlaka belirtilmelidir. Basınç dayanımı deneyi genellikle 7 ve 28 günlük numunelerde gerçekleştirilir [4]. Betonda varolan gerilme taze betonda uygulanan sıkıştırma süreci, beton kür sürecine bağlı olarak farklılık gösterebilir [1].

2.1. Karakteristik basınç dayanımı (f_{ck})

Beton sınıfı belirlenmesinde esas olan betonun karakteristik basınç dayanımıdır. Beton basınç dayanımını etkileyen önemli bir parametre kullanılacak çimentonun tipi ve beton karışımında kullanılacak çimento miktarıdır. Eğer karışımda çimento dozajı artarsa basınç dayanımı da artar ancak basınç dayanımı hakkında temel esas alınacak gösterge çimento miktarı değil su-çimento oranıdır. Beton karışım suyunun da basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkisi söz konusudur. Karışım suyu miktarı çok yüksek veya çok düşük olursa basınç dayanımı da buna bağlı olarak azalır. Beton karakteristik basınç dayanımının Tablo 2’de sunulan en düşük karakteristik basınç dayanım değerinden daha yüksek veya eşit olması gerekmektedir [4].

Tablo 2. Normal ve yüksek dayanımlı betonlar için basınç dayanımı sınıfları

Basınç dayanımı sınıfı	En düşük karakteristik silindir dayanımı $f_{ck, sil}$ N/mm ²	En düşük karakteristik küp dayanımı $f_{c, küp}$ N/mm ²
C 8/10	8	10
C 12/15	12	15
C 16/20	16	20
C 20/25	20	25
C 25/30	25	30
C 30/37	30	37
C 35/45	35	45
C 40/50	40	50
C 45/55	45	55
C 50/60	50	60

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmada Çanakkale Biga Bekirli Termik Santralinin uçucu külünün betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. 4 farklı dayanım sınıfında beton karışımı üretilmiştir. Her bir beton sınıfı için şahit beton, uçucu kül içeren beton ve uçucu kül içermeyen beton üretilmiştir. Uçucu kül kullanım yüzdesi çimento miktarının % 20'si olarak alınmıştır. Uçucu kül içeren ve uçucu kül içermeyen betonlarda toplam bağlayıcı miktarının % 1'i olmak üzere kimyasal katkı kullanılmıştır. Beton karışımlarında kullanılan kimyasal katkılar Tablo 3-6'da görülmektedir. Üretimlerde 10 cm ebatlı küp kalıplar kullanılmıştır. Üretilen küp numuneler kür havuzunda 23 ± 2 °C suda bekletilmiştir. Numuneler kür havuzundan çıkarıldıktan sonra 4 farklı yaşta basınç dayanımı testine tabi tutulmuştur. Basınç dayanımı testi haricinde yarmada çekme dayanımı testleri de yapılmıştır. Dayanıklılık testi olarak ise donma-çözünme testi gerçekleştirilmiştir. C20/25 beton karışımında orta akışkanlaştırıcı, C25/30 ve C30/37 beton karışımlarında süper akışkanlaştırıcı, C35/45 beton karışımında modifiye polikarboksilat kimyasal katkısı kullanılmıştır.

3.2. Üretilen Betonların Özellikleri

Bu çalışmada üretilen betonların karışım dizaynları Tablo 3-6'da verilmiştir.

Tablo 3. C20/25 beton karışım dizaynı

Bileşen miktarı (kg/m ³)							
	Çimento	Su	Kırmataş I	Kırmataş II	Taş Tozu	Uçucu Kül	Kimyasal Katkı
ŞAHİT	260	185	290	470	1200	0	0
KÜLLÜ	239	185	290	470	1200	52	2.6
KÜLSÜZ	260	185	290	470	1200	0	2.6

Tablo 4. C25/30 beton karışım dizaynı

Bileşen miktarı (kg/m ³)							
	Çimento	Su	Kırmataş I	Kırmataş II	Taş Tozu	Uçucu Kül	Kimyasal Katkı
ŞAHİT	280	190	300	500	1150	0	0
KÜLLÜ	257	190	300	500	1150	56	2.8
KÜLSÜZ	280	190	300	500	1150	0	2.8

Tablo 5. C30/37 beton karışım dizaynı

Bileşen miktarı (kg/m ³)							
	Çimento	Su	Kırmataş I	Kırmataş II	Taş Tozu	Uçucu Kül	Kimyasal Katkı
ŞAHİT	310	187	320	520	1100	0	0
KÜLLÜ	285	187	320	520	1100	62	3.1
KÜLSÜZ	310	187	320	520	1100	0	3.1

Tablo 6. C35/45 beton karışım dizaynı

Bileşen miktarı (kg/m ³)							
	Çimento	Su	Kırmataş I	Kırmataş II	Taş Tozu	Uçucu Kül	Kimyasal Katkı
ŞAHİT	340	185	340	570	1030	0	0
KÜLLÜ	312	185	340	570	1030	68	3.4
KÜLSÜZ	340	185	340	570	1030	0	3.4

3.3. Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

3.3.1. Çimento

Çalışmanın tamamında Kırklareli Pınarhisar Limak Çimento Fabrikasında üretilmiş CEM I 42,5 R Portland çimentosu kullanılmıştır. Portland çimentosunun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 7-9'da sunulmuştur.

Tablo 7. CEM I 42,5R Portland çimentosunun kimyasal özellikleri

Kimyasal Bileşimin Tanımı	Kimyasal Bileşimin Yüzdesi (%)
SiO ₂	19.13
Al ₂ O ₃	4.83
Fe ₂ O ₃	3.22
CaO	63.60
MgO	1.12
SO ₃	2.89
Na ₂ O	0.15
K ₂ O	0.69
Cl	0.0098
Kızdırma Kaybı	3.56
Çözünmeyen Kalıntı	0.32
C ₃ A	7.36

Tablo 8. CEM I 42,5R Portland çimentosunun fiziksel özellikleri

Özgül ağırlık		3.11
Priz süresi(dakika)	Başlangıç	195
	Son	235
Hacim Sabitliği(Le Chatelier) Toplam (mm)		1
Özgül Yüzey (Blaine) cm ² /gr		3475

Tablo 9. CEM I 42,5R Portland çimentosunun mekanik özellikleri

Gün	Basınç Dayanımları (N/mm ²)
2	28.6
7	48.1
28	59.8

3.3.2. Agregalar

Çalışmada agrega olarak kırmataş I dolomit agregası (5-12 mm), kırmataş II dolomit agregası (12-19 mm) ve taş tozu dolomit agregası (0-5 mm) kullanılmıştır. Agregaların birim ağırlıkları ve özgül ağırlıkları bulunmuştur. Agregaların gevşek yığın yoğunluğu ve özgül ağırlığı Tablo 10'da verilmiştir. Agregaların elek analizi sonuçları Tablo 11'de sunulmuştur.

Tablo 10. Agregaların gevşek yığın yoğunluğu ve özgül ağırlığı

Malzeme	Gevşek Yığın Yoğunluk (Mg/m ³)	Özgül Ağırlık
Taş tozu	1.74	2.82
Kırmataş I	1.54	2.83
Kırmataş II	1.52	2.84

Tablo 11. Agregaların elek analiz sonuçları

Elek Boyutu(mm)	Elek altına geçen yüzde (%)		
	Taş tozu	Kırmataş I	Kırmataş II
31.5	100	100	100
22.4	100	100	100
16	100	100	47
11.2	100	99	3
8	100	47	0
5.6	100	13	0
4	96	2	0
2	61	1	0
1	38	0	0
0.5	26	0	0
0.25	21	0	0
0.125	18	0	0

3.3.3. Uçucu külün özellikleri

Deneylerde Çanakkale Biga Bekirli Termik Santralinin atığı olan uçucu kül kullanılmıştır. Bu kül F tipi uçucu kül olarak sınıflandırılmaktadır. F tipi uçucu külün kimyasal özellikleri Tablo 12'de sunulmuştur.

Tablo 12. Çanakkale Biga Bekirli Termik Santrali uçucu külünün kimyasal bileşimi

Kimyasal Bileşimin Tanımı	Kimyasal Bileşimin Yüzdesi	C Sınıfı Uçucu Küller İçin TS EN 450-1 [7] ve ASTM C618-17a [10]	F Sınıfı Uçucu Küller İçin TS EN 450-1 [7] ve ASTM C618-17a [10]
SiO ₂	-	-	-
Al ₂ O ₃	-	-	-
Fe ₂ O ₃	-	-	-
S+A+F	92.17	>50 ASTM C618-17a	>70 ASTM C618-17a
CaO	-	>10 (Yüksek Kireçli) ASTM C618-17a	<10 (Düşük Kireçli) ASTM C618-17a
MgO	0.682	-	-
SO ₃	-	<3 TS EN 450-1	<TS EN 450-1
K ₂ O	-	-	-

Tablo 12 devam ediyor

Kimyasal Bileşimin Tanımı	Kimyasal Bileşimin Yüzdesi	C Sınıfı Uçucu Küller İçin TS EN 450-1 [7] ve ASTM C618-17a [10]	F Sınıfı Uçucu Küller İçin TS EN 450-1 [7] ve ASTM C618-17a [10]
Na ₂ O	-	-	-
TiO ₂	-	-	-
P ₂ O ₅	-	-	-
Mn ₂ O ₃	-	-	-
Cl	0.01	<0.1 TS EN 450-1	<0.1 TS EN 450-1
Kızdırma Kaybı	2.7	<5 TS EN 450-1	<5 TS EN 450-1
Serbest CaO	0.1	<1 TS EN 450-1	<1 TS EN 450-1

3.4. Beton Karışımları

C20/25 beton karışım dizaynında dozaj 260 kg/m³, C25/30 beton karışım dizaynında dozaj 280 kg/m³, C30/37 karışım dizaynında dozaj 310 kg/m³, C35/45 beton karışım dizaynında 340 kg/m³ seçilmiştir. C20/25 beton karışım dizaynında su/bağlayıcı oranı 0,71, C25/30 beton karışım dizaynında su/bağlayıcı oranı 0,68, C30/37 beton karışım dizaynında su/bağlayıcı oranı 0,60, C35/45 beton karışım dizaynında su/bağlayıcı oranı 0,54'tür. Her bir karışım için 15 dm³ beton üretilmiştir.

3.5. Beton Üretimi Karıştırma Yerleştirme Saklama Numune Boyutları

Beton karışımları laboratuvar tipi beton mikseri kullanılarak hazırlanmıştır. Karışımın katı bileşenleri su ilave edilmeden önce 2 dakika mikserde karıştırılmıştır. Daha sonra su ilave edilerek karışım mikserde 5 dakika daha karıştırılmıştır. Her bir beton karışımının 15 dm³ olarak üretimi gerçekleştirilmiştir. Her bir karışımında taze beton 12 adet 10x10x10 cm³ boyutundaki küp kalıplara yerleştirilmiş, 24 saat sonra sertleşmiş beton kalıplardan çıkarılarak 23±2 °C su içerisinde bekletilmiştir. Basınç dayanımı deneyi 3, 7, 28 ve 56. günler sonunda uygulanmıştır.

3.6. Taze Beton Deneyleri

Her bir beton sınıfı için çökme değeri 150 mm olarak sabit alınmıştır. Aynı zamanda her bir karışım için yaş birim ağırlıklar belirlenmiştir.

3.7. Sertleşmiş Beton Deneyleri

10x10x10 cm³ boyutlarında üretilen numuneler, 23±2 °C su içerisinde saklanmıştır. 3, 7, 28 ve 56. günler sonunda numuneler üzerinde basınç dayanımı testi uygulanmıştır. 28 günlük numuneler kullanılarak yarmada çekme dayanımı testi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca dayanıklılık deneylerinden olan donma-çözünme deneyi de yapılmıştır.

4. DENEY SONUÇLARI

4.1. Taze Beton Deney Sonuçları

Bu çalışmada üretilen taze betonların birim ağırlıkları, çökme değerleri, hava sıcaklıkları ve beton sıcaklıkları, ayrıca kendiliğinden yerleşen betonun birim ağırlıkları, yayılma değerleri, hava sıcaklıkları ve beton sıcaklıkları Tablo 13-16'da sunulmuştur.

Tablo 13. C20/25 taze beton özellikleri

	Yaş birim ağırlık (kg/m ³)	Slump (çökme) (mm)	Hava sıcaklığı (°C)	Beton sıcaklığı (°C)
ŞAHİT	2534	150	21.3	22.8
KÜLLÜ	2504	150	20.7	22.5
KÜLSÜZ	2494	150	23.3	20.5

Tablo 14. C25/30 taze beton özellikleri

	Yaş birim ağırlık (kg/m ³)	Slump (çökme) (mm)	Hava sıcaklığı (°C)	Beton sıcaklığı (°C)
ŞAHİT	2528	150	20.3	19.7
KÜLLÜ	2534	150	20.1	19.6
KÜLSÜZ	2540	150	20.2	19.5

Tablo 15. C30/37 taze beton özellikleri

	Yaş birim ağırlık (kg/m ³)	Slump (çökme) (mm)	Hava sıcaklığı (°C)	Beton sıcaklığı (°C)
ŞAHİT	2456	150	20.1	17.8
KÜLLÜ	2534	150	20.7	19.1
KÜLSÜZ	2540	150	20.2	19.5

Tablo 16. C35/45 taze beton özellikleri

	Yaş birim ağırlık (kg/m ³)	Slump (çökme) (mm)	Hava sıcaklığı (°C)	Beton sıcaklığı (°C)
ŞAHİT	2514	150	20.4	21.2
KÜLLÜ	2572	150	20.8	20.2
KÜLSÜZ	2560	150	20.3	20.2

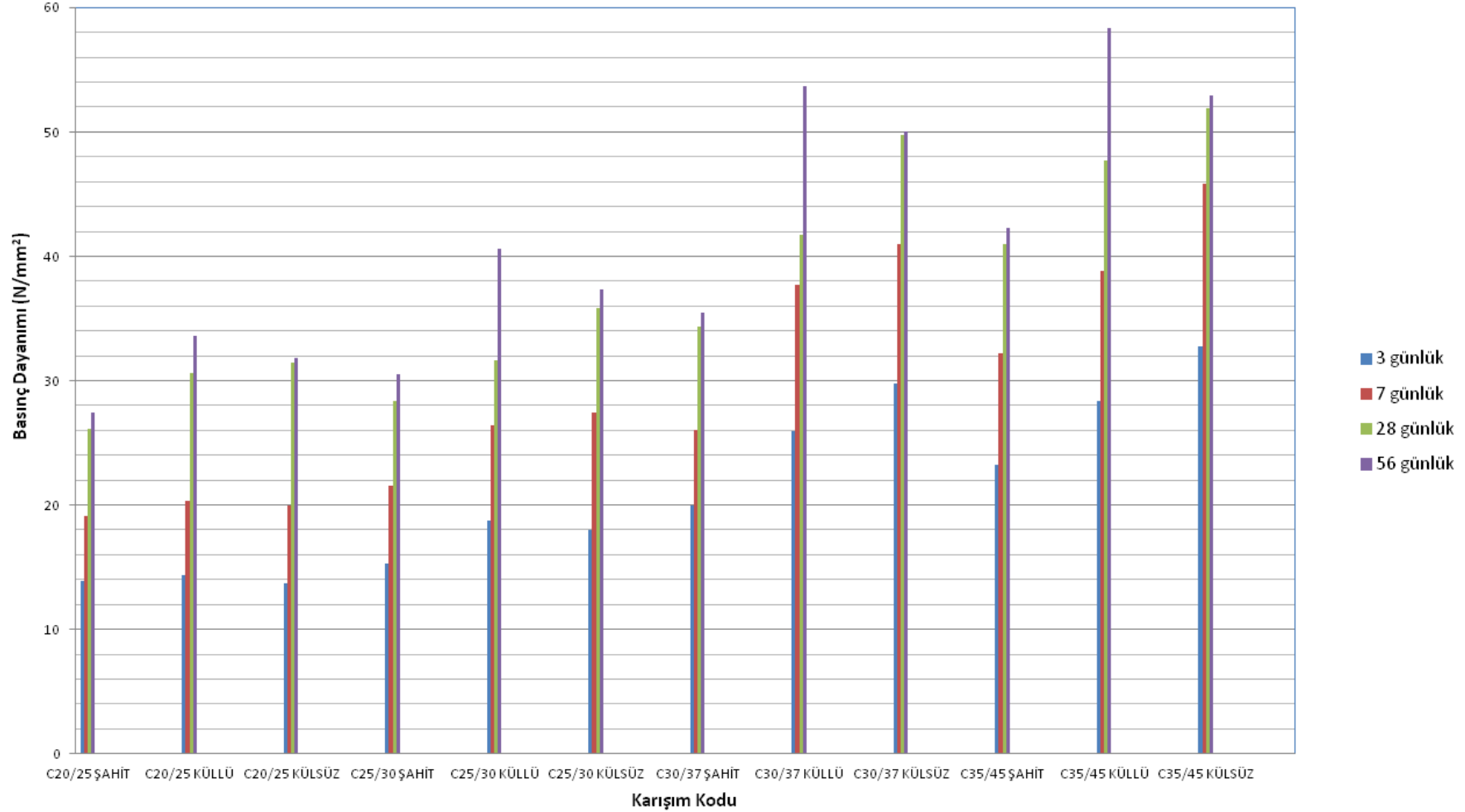
4.2. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları

4.2.1. Basınç dayanımı tayini

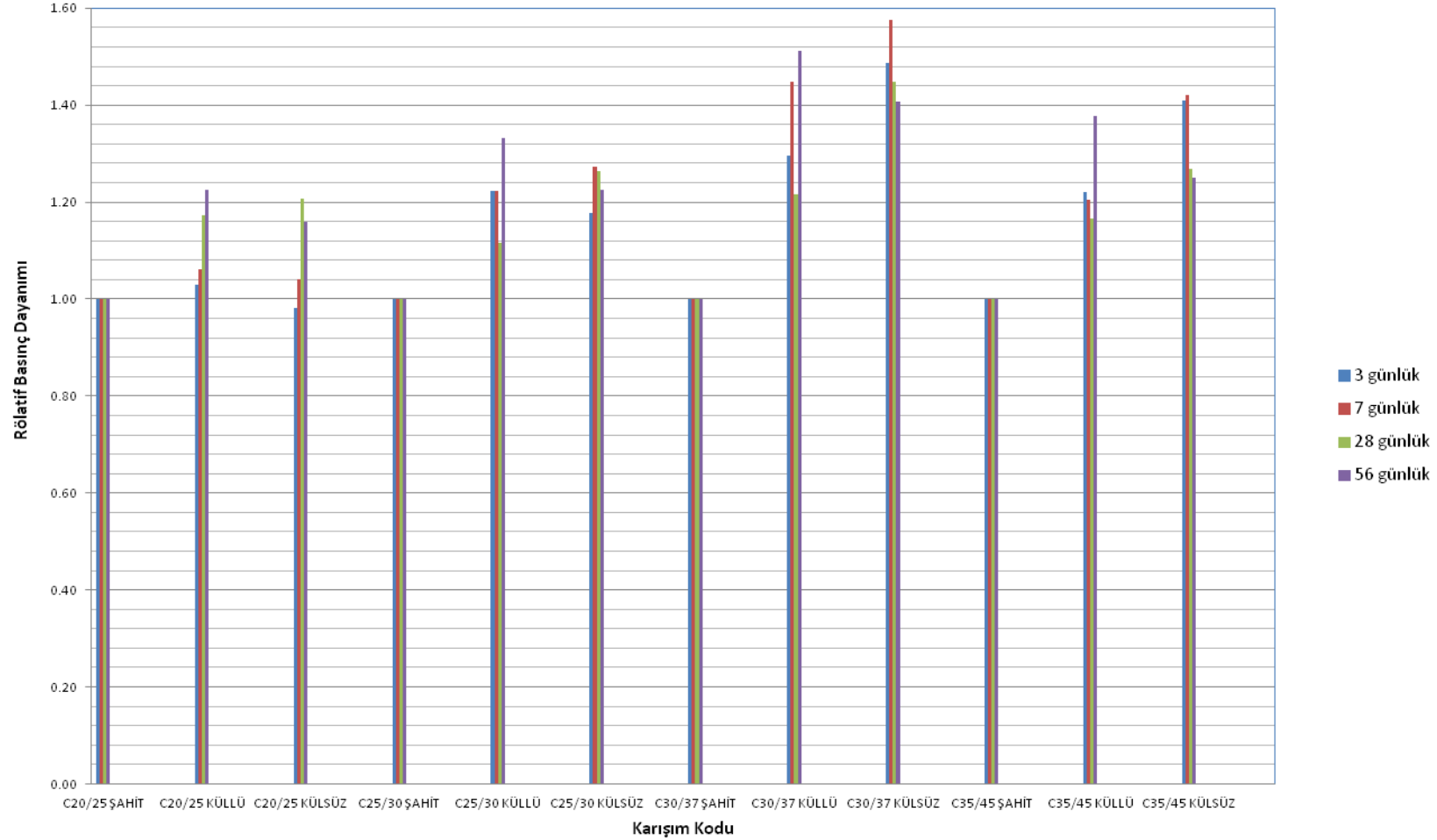
Bu çalışmada üretimi yapılan betonların basınç dayanımı değerleri ile rölatif basınç dayanımı değerleri Şekil 1-2'de verilmiştir.

4.2.2. Yarmada çekme dayanımı tayini

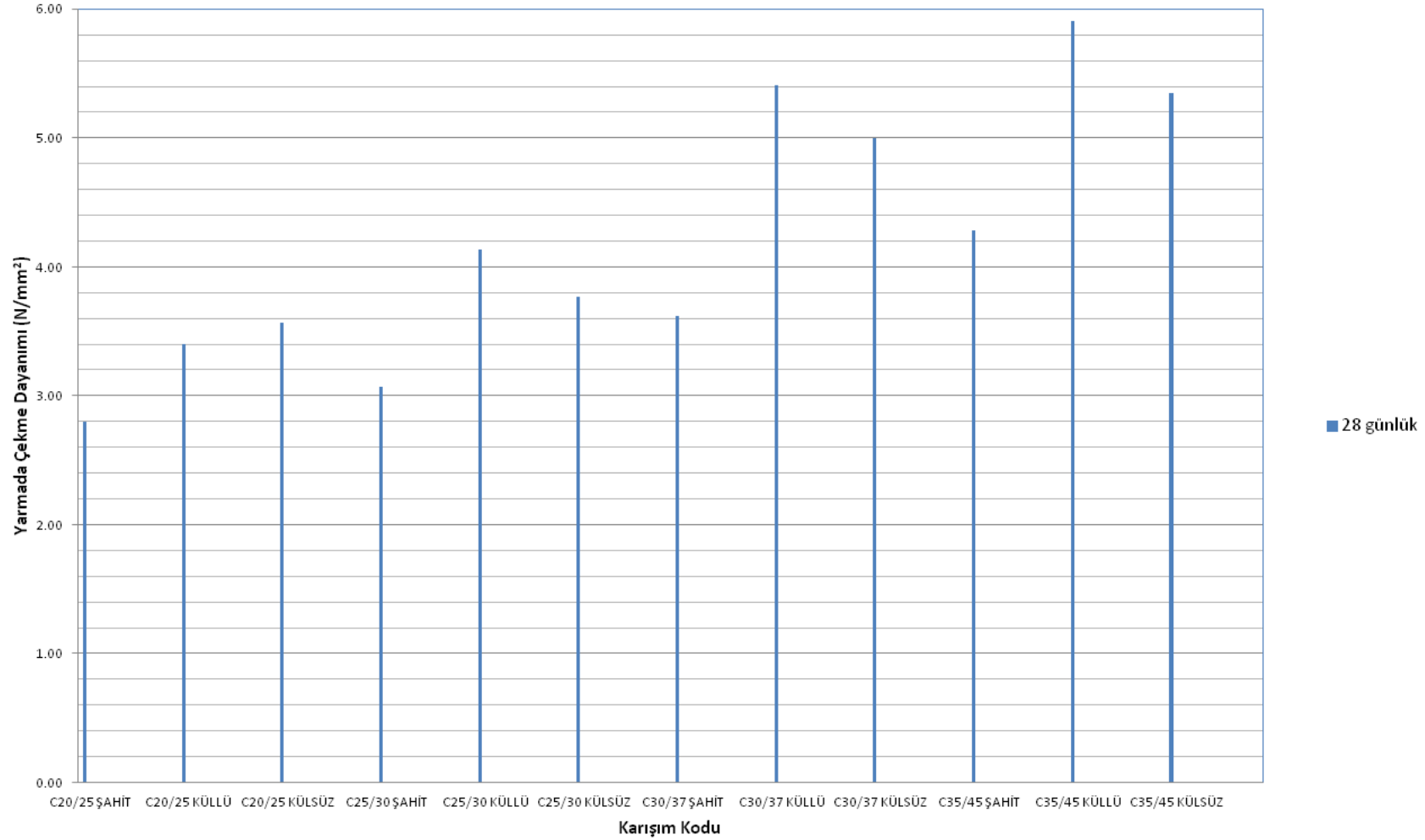
28 günlük küp numunelerde yarmada çekme dayanımı testleri gerçekleştirilmiştir. Farklı beton sınıflarında üretilen betonların yarmada çekme dayanımı değerleri ve rölatif yarmada çekme dayanımı değerleri Şekil 3-4'de verilmiştir.



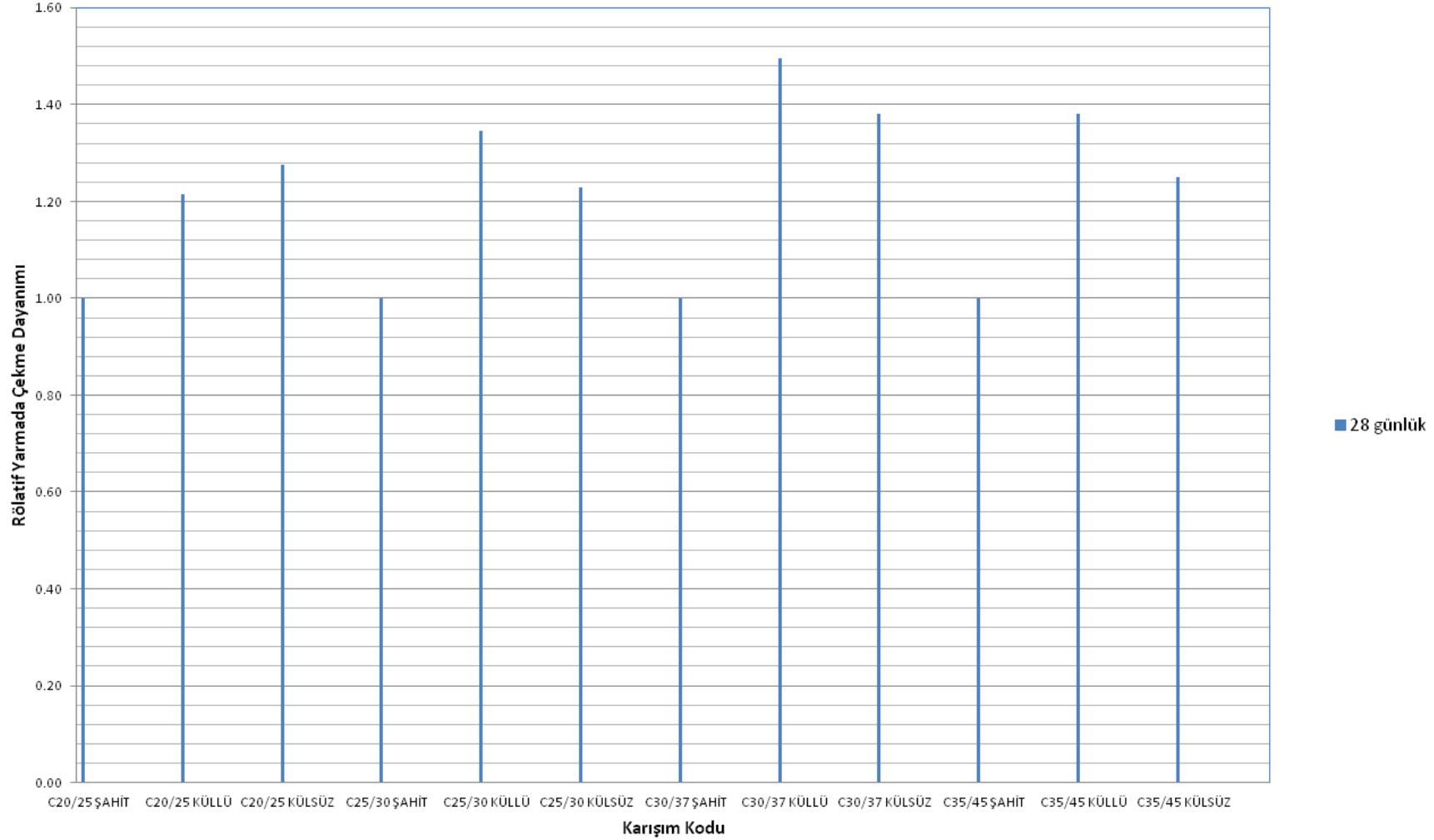
Şekil 1. Üretimi gerçekleştirilmiş farklı dayanım sınıflarında betonların 3, 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanımı değerleri



Şekil 2. Üretimi gerçekleştirilmiş farklı dayanım sınıflarında betonların 3, 7, 28 ve 56 günlük rölatif basınç dayanımı değerleri



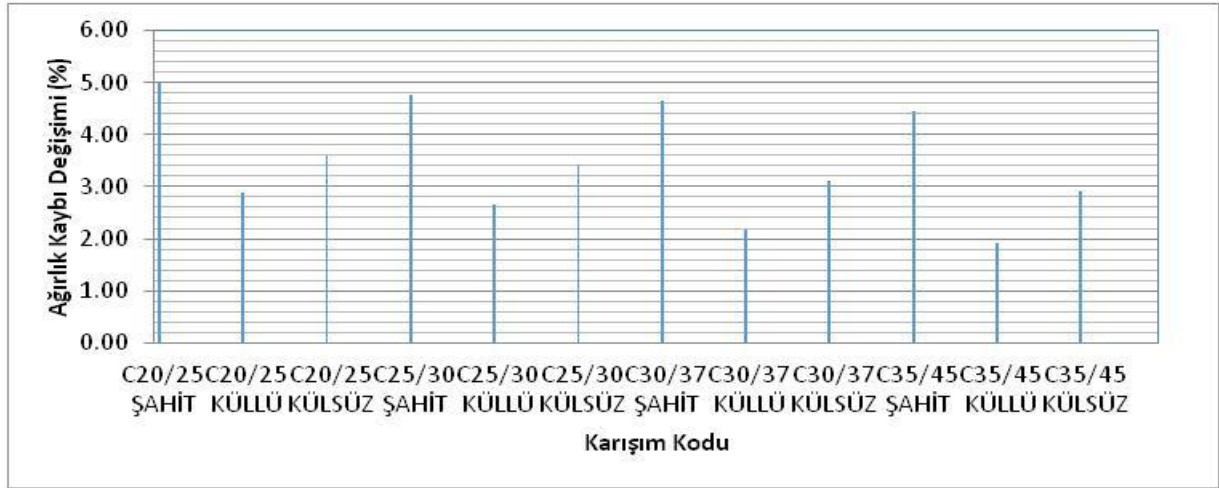
Şekil 3. Farklı dayanım sınıflarında betonların 28 günlük yarmada çekme dayanımları



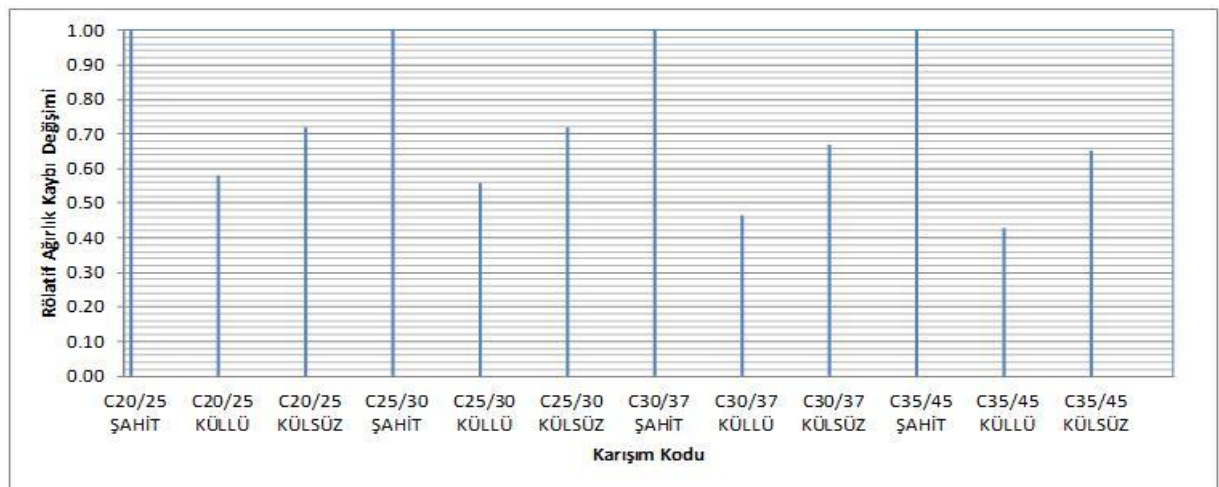
Şekil 4. Farklı dayanım sınıflarında betonların 28 günlük rölatif yarmada çekme dayanımları

4.2.3. Donma-çözünme direnci tayini

28 günlük küp numunelerde donma-çözünme direnci tayini deneyi gerçekleştirilmiştir. Donma-çözünme direnci tayini deneyi ASTM C666/C666M-15 standardına göre gerçekleştirilmiştir [11]. 28 günlük küp numuneler donma-çözünme kabininde 12 saat -20°C 'de bekletilmiş, daha sonra numuneler donma-çözünme kabininden çıkarılıp 20°C 'deki suda 12 saat süreyle çözülmeye bırakılmıştır. Bu tam 1 döngüdür. 25 donma-çözünme çevrimi sonunda numunelerdeki ağırlık kayıpları deneysel olarak belirlenmiştir. Donma-çözünme direnci tayini deneyi sonrası ağırlık kaybı değişimleri Şekil 5'de, rölatif ağırlık kaybı değişimleri ise Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 5. Farklı dayanım sınıflarındaki betonların donma-çözünme direnci tayini deneyi sonrası ağırlık kaybı değişimleri



Şekil 6. Farklı dayanım sınıflarındaki betonların donma-çözünme direnci tayini deneyi sonrası rölatif ağırlık kaybı değişimleri

5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

5.1. Taze Beton Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Tablo 13-16'da görüldüğü üzere farklı dayanım sınıflarındaki betonlar için çökme değeri sabit seçilmiş olup 150 mm'dir. Hava sıcaklıkları ve beton sıcaklıkları da kaydedilmiştir. Hava sıcaklıkları 20.1 °C ile 23.3 °C arasında değişim göstermiştir. Beton sıcaklıkları ise 19.1 °C ile 22.8 °C arasında değişmiştir. Her bir beton karışımının yaş birim ağırlığı kg/m^3 cinsinden ölçülmüştür. Betonların yaş birim ağırlıkları 2400-2600 kg/m^3 arasında farklılık göstermiştir. C20/25 sınıfı için hem uçucu kül içeren hem de uçucu kül içermeyen taze betonların yaş birim ağırlıkları şahite oranla daha düşüktür. Uçucu kül içeren betonda elde edilen yaş birim ağırlık uçucu kül içermeyen betonda elde edilen yaş birim ağırlıktan daha yüksektir. C25/30 ve C30/37 sınıfları için hem uçucu kül içeren hem de uçucu kül içermeyen taze betonların yaş birim ağırlıkları şahite oranla daha yüksektir. Uçucu kül içeren betonda elde edilen yaş birim ağırlık uçucu kül içermeyen betonda elde edilen yaş birim ağırlıktan daha düşüktür. C35/45 sınıfı için hem uçucu kül içeren hem de uçucu kül içermeyen taze betonların yaş birim ağırlıkları şahite oranla daha yüksektir. Uçucu kül içeren betonda elde edilen yaş birim ağırlık uçucu kül içermeyen betonda elde edilen yaş birim ağırlıktan daha yüksektir.

5.2. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Şekil 1'de görüldüğü üzere farklı dayanım sınıflarındaki betonlarda 3, 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanımı değerleri belirlenmiştir. C20/25 sınıfı betonlarda 3, 7 ve 56 günlük sonuçlar incelendiğinde uçucu kül içeren betonun 3, 7 ve 56 günlük basınç dayanımının hem şahit betonun 3, 7 ve 56 günlük basınç dayanımından hem de uçucu kül içermeyen betonun 3, 7 ve 56 günlük basınç dayanımından daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. 28 günlük sonuçlar irdelendiğinde ise en yüksek basınç dayanımının uçucu kül içermeyen betonda gözlemlendiği açıkça görülmektedir. Uçucu kül içermeyen betonun 3 günlük basınç dayanımı şahit betonun 3 günlük basınç dayanımından daha düşüktür. C25/30 sınıfı betonlarda hem uçucu kül içeren betonun 3 günlük basınç dayanımı hem de uçucu kül içermeyen betonun 3 günlük basınç dayanımı şahit betonun 3 günlük basınç dayanımından daha yüksektir. Uçucu kül içeren betonun 3 günlük basınç dayanımı uçucu kül içermeyen betonun 3 günlük basınç dayanımından daha yüksektir. 7 günlük sonuçlarda farklı davranış gözlenmiştir. Hem uçucu kül içeren betonun 7 günlük basınç dayanımı hem de uçucu kül içermeyen betonun 7 günlük

basınç dayanımı şahit betonun 7 günlük basınç dayanımından daha yüksektir. Uçucu kül içermeyen betonun 7 günlük basınç dayanımı uçucu kül içeren betonun 7 günlük basınç dayanımından daha yüksektir. 28 günlük sonuçlarda ise 7 günlük sonuçlardaki davranışa benzer durum gözlenmiştir. 56 günlük sonuçlara bakıldığında ise uçucu kül içeren betonun basınç dayanımının en yüksek olduğu gözlenmiştir. Bu da beklenen bir sonuçtur. Çünkü uçucu kül nihai basınç dayanımlarını artıran bir puzolandır. C30/37 ve C35/45 sınıfı betonlarda sonuçlar irdelendiğinde uçucu kül içermeyen betonda 3 günlük basınç dayanımının uçucu kül içeren betonda 3 günlük basınç dayanımından daha yüksek olduğu gözlenmiştir. 7 ve 28 günlük sonuçlarda da benzer davranış gözlenmiştir. 56 günlük sonuçlara bakıldığında ise uçucu kül içeren betonun basınç dayanımının uçucu kül içermeyen betonun basınç dayanımından daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. C20/25 sınıfı betonlarda rölatif basınç dayanımı sonuçlarına bakıldığında uçucu kül içermeyen betonun 3 günlük rölatif basınç dayanımı hariç diğer tüm betonların 3, 7, 28 ve 56 günlük rölatif basınç dayanımları şahit betonun rölatif basınç dayanımı değerlerinden daha yüksektir. Uçucu kül içeren betonun 3, 7 ve 56 günlük rölatif basınç dayanımları uçucu kül içermeyen betonun 3, 7 ve 56 günlük rölatif basınç dayanımlarından daha yüksektir. 28 günlük sonuçlar ele alındığında uçucu kül içermeyen betonun rölatif basınç dayanımı uçucu kül içeren betonun rölatif basınç dayanımından daha yüksektir. En yüksek rölatif basınç dayanımının uçucu kül içeren betonun 56 günlük rölatif basınç dayanımı olduğu da açıkça görülmektedir. C25/30 sınıfı betonların rölatif basınç dayanımı sonuçları değerlendirildiğinde uçucu kül içeren ve uçucu kül içermeyen betonların rölatif basınç dayanımlarının şahit betonun rölatif basınç dayanımlarından daha yüksek olduğu açıkça görülmektedir. Uçucu kül içeren betonların 3 ve 56 günlük rölatif basınç dayanımları uçucu kül içermeyen betonların 3 ve 56 günlük rölatif basınç dayanımlarından daha yüksektir. Ancak uçucu kül içeren betonların 7 ve 28 günlük rölatif basınç dayanımları uçucu kül içermeyen betonların 7 ve 28 günlük rölatif basınç dayanımlarından daha düşüktür. En yüksek rölatif basınç dayanımı uçucu kül içeren betonun 56 günlük rölatif basınç dayanımında gözlenmiştir. C30/37 sınıfı betonların rölatif basınç dayanımı sonuçları ele alındığında hem uçucu kül içeren hem de uçucu kül içermeyen betonların rölatif basınç dayanımı sonuçları şahit betonun rölatif basınç dayanımı sonuçlarından daha yüksektir. Uçucu kül içeren betonların 3, 7 ve 28 günlük rölatif basınç dayanımları uçucu kül içermeyen betonların 3, 7 ve 28 günlük rölatif basınç dayanımlarından daha düşüktür. Ancak uçucu kül içeren betonun 56 günlük rölatif basınç dayanımı uçucu kül

içermeyen betonun 56 günlük rölatif basınç dayanımından daha yüksektir. C35/45 sınıfı beton sonuçlarında ise yine aynı şekilde uçucu kül içeren ve uçucu kül içermeyen betonların rölatif basınç dayanımı sonuçlarının şahit betonun rölatif basınç dayanımı sonuçlarından daha yüksek olduğu görülmektedir. Uçucu kül içeren betonların 3, 7 ve 28 günlük rölatif basınç dayanımları uçucu kül içermeyen betonların 3, 7 ve 28 günlük rölatif basınç dayanımlarından daha düşüktür. Ancak uçucu kül içeren betonların 56 günlük rölatif basınç dayanımları uçucu kül içermeyen betonların 56 günlük rölatif basınç dayanımlarından daha yüksektir.

Yarmada çekme dayanımı sonuçları değerlendirildiğinde ise C20/25 sınıfı betonlarda hem uçucu kül içeren hem de uçucu kül içermeyen betonlarda yarmada çekme dayanımlarının şahit betonun yarmada çekme dayanımından daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. C25/30 sınıfı betonlarda uçucu kül içeren betonların ve uçucu kül içermeyen betonların yarmada çekme dayanımlarının şahit betonun yarmada çekme dayanımına oranla daha yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca uçucu kül içeren betonların yarmada çekme dayanımının uçucu kül içermeyen betonların yarmada çekme dayanımına göre daha yüksek olduğu da açıkça görülmektedir. C30/37 ve C35/45 sınıfı betonlarda da C25/30 sınıfı betonlarda elde edilen sonuçlardaki davranışa benzer bir durum gözlenmiştir. Rölatif yarmada çekme dayanımı sonuçları irdelendiğinde C20/25 sınıfı betonlar için hem uçucu kül içeren hem de uçucu kül içermeyen betonlarda rölatif yarmada çekme dayanımlarının şahit betonun rölatif yarmada çekme dayanımlarından daha yüksek olduğu görülmektedir. Uçucu kül içermeyen betonların rölatif çekme dayanımları uçucu kül içeren betonların rölatif çekme dayanımlarından daha yüksektir. C25/30 sınıfı betonlarda durum daha farklı gözlenmiştir. Hem uçucu kül içeren hem de uçucu kül içermeyen betonlarda rölatif yarmada çekme dayanımları şahit betonun yarmada çekme dayanımlarından daha yüksektir. Uçucu kül içeren betonların rölatif yarmada çekme dayanımları uçucu kül içermeyen betonların rölatif yarmada çekme dayanımlarından daha yüksektir. C30/37 ve C35/45 sınıfı betonlarda da benzer davranış gözlenmiştir.

Donma-çözünme direnci tayini deneyi sonuçlarına bakıldığında farklı beton sınıflarında üretilen numunelerin donma-çözünme direnci deneyi sonucundaki ağırlık kaybı değişimlerinin her bir beton sınıfı için şahit betonun donma-çözünme direnci deneyi sonucundaki ağırlık kaybı değişimlerinden daha düşük olduğu gözlenmiştir. Bu da beklenen bir sonuçtur. Çünkü uçucu kül kullanımı dayanıklılığı artırmaktadır. Uçucu kül kullanılan betonların donma-çözünme direnci tayini deneyi sonucundaki ağırlık kaybı değişimleri uçucu

kül kullanılmayan betonların donma-çözünme direnci tayini deneyi sonucundaki ağırlık kaybı değişimlerinden daha düşüktür. Bu da beklenen bir durumdur. Sonuç olarak uçucu kül kullanımı donma-çözünme direncini artırmıştır. Rölatif ağırlık kaybı değişimi sonuçları incelendiğinde her bir beton sınıfı için uçucu kül içeren ve uçucu kül içermeyen betonların rölatif ağırlık kaybı değişimlerinin şahit betonun rölatif ağırlık kaybı değişiminden daha düşük olduğu görülmektedir. Aynı zamanda uçucu kül içermeyen betonların rölatif ağırlık kaybı değişimleri uçucu kül içeren betonların rölatif ağırlık kaybı değişimlerinden daha yüksektir.

6. GENEL SONUÇLAR

Bu deneysel çalışma neticesinde elde edilen genel sonuçlar aşağıda sunulmuştur;

- C20/25 sınıfı betonlarda uçucu kül kullanımı 3, 7 ve 56 günlük basınç dayanımlarını şahite oranla artırmış, ancak 28 günlük basınç dayanımını azaltmıştır. Uçucu kül içermeyen betonun 3 günlük basınç dayanımı şahit betonun 3 günlük basınç dayanımından daha düşüktür.
- C25/30 sınıfı betonlarda uçucu kül kullanılan betonların en yüksek basınç dayanımının 56. günde elde edildiği gözlenmiştir. Uçucu külün ileri ki basınç dayanımlarını artırdığı gerçeği de burada doğrulanmıştır.
- C30/37 ve C35/45 sınıfı betonlarda erken dayanım sonuçlarına bakıldığında uçucu külün erken dayanımları artırmadığı ileri ki dayanımları artırdığı görülmüştür.
- Tüm beton sınıfları için uçucu kül kullanımı yarmada çekme dayanımlarını artırmıştır.
- Farklı dayanım sınıflarındaki betonlarda uçucu kül kullanımı donma-çözünme direncini artırmıştır.

7. TEŞEKKÜR

Bu makaledeki tüm deneysel çalışma sonuçları ve değerlendirmeler, danışmanlığını Dr. Öğretim Üyesi Kadir KILINÇ'ın yaptığı İlker Tulga'nın sona ermiş olan yüksek lisans tez kapsamında yer almaktadır. Bu deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesinde ilgi ve

yardımlarını esirgemeyen Sayın Rektörümüz Prof. Dr. Bülent ŞENGÖRÜR'e, Üniversitemiz Genel Sekreteri Sayın Ergün ERBAY'a ve May Beton Kalite Şefi Oğuz TOSUN'a teşekkürlerimizi sunarız.

8. KAYNAKLAR

- [1] Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M. (2006). Concrete Microstructure, Properties, and Materials, Third Edition, McGraw-Hill.
- [2] Newman, J., Choo, B.S. (2003). Advanced Concrete Technology Processes, Butterworth-Heinemann, An Imprint of Elsevier, UK.
- [3] Mindess, S., Young, J.F. (1981). Concrete, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey 07632.
- [4] TS EN 206:2013+A1 (2017). Beton-Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk, Türk Standardları Enstitüsü, Ocak, Ankara.
- [5] Mamlouk, M.S., Zaniewski, J.P. (1999). Materials for Civil and Construction Engineers, Addison-Wesley, An Imprint of Addison Wesley Longman, Inc.
- [6] TS EN 934-2+A1 (2013). Kimyasal Katkılar-Beton, Harç ve Şerbet İçin-Bölüm 2: Beton Kimyasal Katkıları-Tarifler, Gereklere, Uygunluk, İşaretleme ve Etiketleme, Türk Standardları Enstitüsü, Nisan, Ankara.
- [7] TS EN 450-1 (2015). Uçucu Kül-Betonda Kullanılan-Bölüm 1: Tarif, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standardları Enstitüsü, Mart, Ankara.
- [8] TS 802 (2016). Beton Karışım Tasarımı Hesap Esasları, Türk Standardları Enstitüsü, Mart, Ankara.
- [9] TS EN 12390-3 (2010). Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini, Türk Standardları Enstitüsü, Ocak, Ankara.
- [10] ASTM C618-17a (2017). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM International.
- [11] ASTM C666/C666M-15 (2015). Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing, ASTM International.

KIRKLARELİ ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK ve FEN BİLİMLERİ DERGİSİ
KIRKLARELİ UNIVERSITY JOURNAL of ENGINEERING and SCIENCE

Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisinde fen ve mühendislik alanında özgün araştırma makaleleri, derlemeler, kısa makaleler, teknik not, vaka takdimleri, kitap eleştirileri ve bilimsel nitelikli editöre mektuplar yayınlanır. Dergi Aralık ve Haziran aylarında olmak üzere yılda iki kez yayınlanır. Yayınlanmak üzere gönderilen eserlerin başka bir yerde yayınlanmamış veya yayınlanmak üzere gönderilmemiş olması gerekmektedir. Derginin yayın dili Türkçe ve İngilizcedir. Dergide yayınlanacak eserlerin her türlü sorumluluğu yazar/larına aittir. Makaleler, <http://dergipark.ulakbim.gov.tr> adresine gönderilmelidir. Makalenin hakem incelemesi için kabul edilmesi durumunda, Telif Hakkı Devir Formu tüm yazarlarca imzalanarak editörlüğe gönderilmelidir. Dergiye gönderilen makaleler, öncelikle Dergi Yayın Kurulu tarafından bilimsel içerik ve şekil bakımından ön incelemeye tabii tutulur. Dergi Yayın Kurulu, yayınlanabilecek nitelikte bulmadığı veya yazım kurallarına uygun hazırlanmayan makaleleri hakemlere göndermeden red kararı verme hakkına sahiptir. Değerlendirmeye alınabilecek olan makaleler, incelenmek üzere iki ayrı hakeme gönderir. Dergi Yayın Kurulu, hakem raporlarını dikkate alarak makalelerin yayınlanmak üzere kabul edilip edilmemesine karar verir.

Yazım Kuralları / Instructions

1. Yazı tümüyle (metin, tablolar, denklemler, çizimler) bilgisayarda düzenlenmeli ve baskıya hazır biçimde teslim edilmelidir. Yazı, A4 (210 x 297 mm) boyutlu kâğıda, Word ortamında, 12 punto (ana başlık 14 punto) Times New Roman font kullanılarak, bir buçuk aralıkla ve her iki yana yaslı olarak yazılmalı, kâğıdın tüm kenarlarından 25 mm boşluk bırakılmalıdır.
2. Çizimler ve tablolarla birlikte, makaleler 25 sayfadan, teknik notlar 6 sayfadan daha uzun olmamalıdır.
3. Yazı, elektronik ortamda (CD veya e-posta eki) dergi e-posta adresine veya dergi yazışma adresine gönderilmelidir.
4. Metin yalın bir dil ve anlatımla yazılmalı, Türkçe yazım kurallarına uygun olmalı, üçüncü tekil şahıs ve edilgen fiiller kullanılmalı, devrik cümleler içermemelidir.
5. Bölümler (i) özet ve anahtar kelimeler, (ii) abstract and keywords (İngilizce başlık, özet ve anahtar kelimeler), (iii) ana metin (giriş, materyal ve metod, sonuçlar vb.), (iv) semboller, (v) teşekkür (gerekliyse) ve (vi) kaynaklar sırası içinde düzenlenmelidir.
6. Başlık kısa ve açık olmalı, içeriği yansıtabilmelidir. Başlık büyük harfle ortalananak yazılmalıdır.
7. Yazar/ların adları kısaltmasız, başlığın altına yan yana, soyadlar büyük harfle ortalananak 11 punto boyutunda yazılmalıdır. Yazar isimlerinden sonra virgül ve adres belirtmek için üst simge olarak rakam kullanılmalıdır. Yazışmaların yapılacağı sorumlu yazar isminde mutlaka üst simge yıldız (*) sembolü olmalıdır. Adres/ler tam yazılmalı, kısaltma yapılmamalıdır. Sorumlu yazarın e-mail adresi dipnot olarak bulunmalıdır. Yazar adları yazılırken herhangi bir akademik unvan belirtilmemelidir.
8. Özet (ve Abstract) çalışmanın amacını, kapsamını, yöntemini ve ulaşılan sonuçları kısaca tanımlamalı ve 200 kelimeyi aşmamalıdır. En az üç tane anahtar kelime verilmelidir. Anahtar kelimeler, zorunlu olmadıkça başlıktakilerin tekrarı olmamalıdır. Başlık, Özet ve İngilizce başlıklı Abstract birinci sayfaya sığdırılmalı, birinci sayfanın altında on satır boş bırakılmalı ve ana metin ikinci sayfadan başlatılmalıdır.
9. Bölüm ve alt bölüm başlıkları numaralanmalıdır (TS1212).
10. Semboller uluslararası kullanıma uygun seçilmeli; her bir sembol ve varsa kısaltmalar ilk kullanıldığı yerde tanımlanmalı, ayrıca metnin sonunda (Kaynaklardan önce) tüm semboller alfabetik sıra ile (önce Latin, sonra Yunan alfabesi) listelenmelidir.
11. Matematiksel ifadeler (denklemler) Word ortamında "Equation Editör" kullanılarak yazılmalıdır. Metin içerisinde geçen denklemler numaralanmalı ve bu numaralar satır sonunda parantez içinde gösterilmelidir.

12. Tablo dışında kalan fotoğraf, resim, çizim ve grafik gibi gösterimler “Şekil” olarak verilmelidir. Resim, şekil ve grafikler net ve ofset baskı tekniğine uygun olmalıdır. Her tablo ve şeklin metin içindeki yeri belirtilmelidir. Tüm tablo ve şekiller makale boyunca sırasıyla numaralandırılmalı (Tablo 1., Tablo 2., Şekil 1., Şekil 2. gibi) başlık ve açıklama içermelidir. Grafik ve şekiller basılı sayfa boyutları dikkate alınarak çizilmelidir. Şekillerin sıra numaraları ve başlıkları şeklin altına, tabloların ki ise tablonun üstüne yazılmalıdır.

13. Yazılarda yalnızca SI birimleri kullanılmalıdır.

14. Teşekkür olabildiğince kısa olmalı, çalışmaya katkısı ve desteği bulunan kişi ve kuruluşlar belirtilmelidir.

15. Dergimize yayınlanmak üzere gönderilen makaleler benzerlik kontrol programı ile kontrol edilecektir. Benzerlik raporu ilgili yayın danışma kurulu üyesine kontrol etmesi için gönderilecektir. Benzerlik raporu sonucu yüksek çıkan makaleler için yazardan düzenleme talep edilir.

16. Kaynaklar metinde köşeli parantez ([]) içinde numaralanmalı ve kaynaklar listesinde metin içinde veriliş sırasına uygun biçimde belirtilmelidir. Yayınlanmamış bilgiler kaynak olarak verilmemelidir. Ancak tamamlanmış ve jüriden geçmiş tezler ve DOI numarası olan makaleler kaynak olarak verilebilir.

Kaynaklarda şu bilgiler verilmelidir:

Kaynak makale ise: Yazarın soyadı, adının baş harfi, diğer yazarlar, makalenin tam başlığı, derginin adı, cilt, sayı, başlama ve bitiş sayfaları, basıldığı yıl.

Örnek: [1] Naghdi, P. M., Kalnins, A., On Vibrations of Elastic Spherical Shells. J. Appl. Mech., C 29, S 65-72, 1962.

Kaynak kitap ise: Yazarın soyadı, adının baş harfi, diğer yazarlar, kitabın adı, cilt numarası, varsa editörü, yayınlandığı yer, yayınlandığı yıl.

Örnek: [2] Kraus. H., Thin Elastic Shells, New York. Wiley, 1967.

Kaynak bildiri ise: Yazarın soyadı, adının baş harfi, diğer yazarlar, bildirinin adı, konferansın adı, yapıldığı yer, başlama ve bitiş sayfaları, yıl.

Örnek: [3] Cappleman. O., Communication in the Studio, FIDE'98 International Conference on First Year Architectural Design Education Proceedings, Faculty of Architecture İstanbul Technical University, Cilt V, S 48-54, 1998

Kaynak tez ise: Yazarın soyadı, adının baş harfi, tezin adı, derecesi, sunulduğu kurum, başlama ve bitiş sayfaları, yıl.

Örnek: [4] Özşahin. B., Yalıtım Kalıplı Donatılı Beton Duvarlı Binaların Yapımsal ve Ekonomik Uygulanabilirliği, Doktora Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, S 5-9, 2011

Kaynak rapor ise: Yazarın soyadı, adının baş harfi, diğer yazarlar, raporun adı, türü, numarası, kuruluşun adı, yayınlandığı yer, yıl.

Örnek: [5] Makarewicz. J.C., Lewis. T., Bertram. P., Epilimnetic Phytoplankton and Zooplankton Biomass and Species Composition in Lake Michigan, 1983-1982, IL EPA 905-R-95-009, U.S EPA Great Lakes Natioanl Program, Chicago, 1995

Kaynak internet ise: Eğer bir bilgi herhangi bir internet sayfasından alınmış ise (internetten alınan ve dergilerde yayınlanan çalışmalar hariç)

Yazarın soyadı, adının baş harfi, diğer yazarlar, çalışmanın adı, internet sitesinin adı ve adresi, internet sitesine erişim tarihi

Örnek: [6] Pieper. C. M., Introduction to Activity Based Costing, ATechnical Bulletin From ABC Technologies, www.abctech.com 1998, Erişim tarihi: 12.10.2014

KIRKLARELİ UNIVERSITY JOURNAL of ENGINEERING and SCIENCE
KIRKLARELİ ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK ve FEN BİLİMLERİ DERGİSİ

Kirklareli University Journal of Engineering and Science welcome materials for publications as original research papers, short communications, technical notes, case reports, book/software reviews and scientific letter to editors. Kirklareli University Journal of Engineering and Science is published two issues per year in June and December. Manuscripts submitted to the journal are only accepted if they have not been or will not be published and should not be under review elsewhere. Manuscript's language is English and Turkish. All responsibility of the studies belongs to the authors. Studies should be prepared in accordance with international scientific ethics rules. Studies must be sent to <http://dergipark.ulakbim.gov.tr>.

For the studies accepted for publication in our journal, copyright transfer form signed must be sent to the journal editorial. Papers are firstly checked for their suitability for technical and journal's style. The manuscripts that do not suit journal's standards or not suitable correspond to the scope journal are refused with unexplained reason. Manuscripts that are found suitable for peer review will be assigned to two expert reviewers. The final decision to accept or reject a manuscript will be made by the Editorial Boards. After review process, the Editorial Boards will inform the authors of acceptance, rejection or necessity of revision of the manuscript.

Instructions / Yazım Kuralları

1. Text (tables, equations, figures, pictures etc.) should be prepared using Microsoft Word Processor with Times New Roman font and 12 point (The title 14 point) size. Manuscripts should be written with 1,5 line spacing on A4 (210 x 297 mm) sized typing paper with 25 mm all margins.
2. The maximum number of pages for original research papers (including tables, figures and references) should be 25 and for the technical notes should be 6 respectively.
3. Paper should be sent online by the journal web site or should be posted CD by journal correspondence address.
4. Text should be written in plain language and narrative, it should be free from any spelling or grammatical errors and the third person singular passive verb should be used.
5. The parts should be in order to (i) Turkish abstract and key words, (ii) English abstract and key words, (iii) main text (Introduction, Material and Methods, Results, Discussions etc.), (iv) symbols, (v) acknowledgements and (vi) references.
6. The title suitable for the content should be clear, as short as possible and centered on the page with the capital letters.
7. All Authors full names should be written as lower case 11 font size in the middle and surname of the authors should be written capital letters. After authors name and surnames, authors' addresses should be stated with superscript numbers (e.g. 1, 2, 3). Corresponding author's full name should be marked with an asterisk (*). All authors' addresses must be typed with lower case 11 font in the center. The corresponding author's contact address and e-mail address should be given. Names of institutions and cities each authors also must be stated. Authors' name and surname should not indicated any academic title.
8. A brief, informative English and Turkish abstract, not exceeding 200 words, should be typed in 12 font size. Immediately following the abstract, authors should provide at least 3 English and Turkish keywords or phrases that reflect content of the article. The key words should not repeat of the title as possible.
9. Section and sub-section title should be numbered (TS1212).
10. In general, the recommendations of the SI units should be followed. Symbols, formulas and equations should be written with great care, capitals and lower case letters being distinguished where necessary. Unusual symbols employed for the first time should be defined by name in the left-hand margin. Abbreviations require definition when first used.

11. Mathematical expressions should be written by an equation editor (Word format). Each equation in text should be numbered and numbers should be shown in parentheses at the end of the line.
12. The drawings, photos and graphs except the tables should be given as "Figure" in manuscript. Electronically submitted figures and graphs are preferred *.jpg or *.tiff formats. Do not give magnification on scales in the figure titles; instead draw bar scales directly on the figures. All the tables and figures must be referred in the text. The numbers and headings of figures must be written below the figure. The numbers and headings of tables should be written the top of the table.
13. SI (System International d'Unités) units should be used.
14. The acknowledgement in the manuscript should be short as possible and it should be indicated if any support is given to work by an institution or a person.
15. Manuscripts submitted for publication in our journal are checked a similarity control software. Similarity report will be sent on the advisory board to be checked. If the similarity control program report results as high similarity, manuscripts are sent back to authors for them to make necessary changes.
16. Literature references are to be numbered consecutively in square brackets. The list of references should be given at the end of the paper in order of their first appearance in the text. Unpublished data should not be used as references. But MSc and PhD thesis, accepted by jury and the manuscripts not published yet if accepted for publication with DOI numbers can be use as references.

References should be provided with the following information:

If the reference is a journal paper: Author surname, first name initial(s), title of the paper, journal name, volume number, pages, year.

Example: [1] Naghdi, P. M., Kalnins, A., On Vibrations of Elastic Spherical Shells. J. Appl. Mech., C 29, S 65-72, 1962

If the reference is a book: Author surname, first name initial(s), title of the book, volume number, editor(s) (if provided), place of print , page interval, year.

Example: [2] Kraus. H., Thin Elastic Shells, New York. Wiley, 1967.

If the reference is a congress presentation: Author surname, first name initial(s), title of the presentation, name of the congress, seminar or conference, place, page interval, year.

Example: [3] Cappleman. O., Communication in the Studio, FIDE'98 International Conference on First Year Architectural Design Education Proceedings, Faculty of Architecture İstanbul Technical University, Cilt V, S 48-54, 1998

If the reference is a printed thesis: Author surname, first name initial(s), title of the thesis, thesis type (MSc. or Ph.D), institute submitted, place, page interval, year.

Example: [4] Özşahin. B., Yalıtım Kalıplı Donatılı Beton Duvarlı Binaların Yapımsal ve Ekonomik Uygulanabilirliği, Ph.D, Trakya University Graduate School of Natural and Applied Sciences, P 5-9, 2011

If the reference is a source publication: Author surname, first name initial(s), report name, name of the organization (if the report is prepared by an organization), report number (if applicable), place, page interval, year.

Example: [5] Makarewicz. J.C., Lewis. T., Bertram. P., Epilimnetic Phytoplankton and Zooplankton Biomass and Species Composition in Lake Michigan, 1983-1982, IL EPA 905-R-95-009, U.S EPA Great Lakes Natioanl Program, Chicago, 1995

For Electronic Encyclopedia and books: Author surname, first name initial(s), title of the paper, journal name, website name and web address, date of access

Example: [6] Pieper. C. M., Introduction to Activity Based Costing, A Technical Bulletin From ABC Technologies, www.abctech.com 1998, 12.10.2014



MÜHENDİSLİK ve FEN BİLİMLERİ DERGİSİ
JOURNAL of ENGINEERING and SCIENCE
http://fbedergi.klu.edu.tr

TELİF HAKLARI DEVİR FORMU

Makale Adı:

Yazarların Ad/ları:

Biz aşağıda imzaları bulunan yazarlar, sunduğumuz makalenin orijinal olduğunu; başka bir yerde yayınlanmak üzere verilmediğini, daha önce yayınlamadığını, eğer, tümüyle ya da bir bölümü yayınlandı ise yukarıda adı geçen dergide yayınlanabilmesi için gerekli her türlü iznin alındığını ve orijinal telif hakkı devir formu ile birlikte Kırklareli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi Editörlüğü'ne gönderildiğini garanti ederiz.

Makalenin telif haklarından feragat etmeyi kabul ederek sorumluluğu üstlenir ve imza ederiz.

Bu vesileyle makalenin telif hakkı Kırklareli Üniversitesi'ne devredilmiştir. Kırklareli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi Editörlüğü makalenin yayınlanabilmesi konusunda yetkili kılınmıştır. Bununla birlikte yazar/ların aşağıdaki hakları saklıdır:

1. Telif Hakkın dışında kalan patent vb. bütün tescil edilmiş haklar.
2. Yazarın gelecekteki yapacağı kitap ve dersler gibi çalışmalarında; makalenin tümü veya bir bölümünü ücret ödemeksizin kullanma hakkı.
3. Makaleyi satmamak koşulu ile kendi amaçları için çoğaltma hakkı.

Yazar Adı: Tarih:/...../..... İmza:

Yazar Adı: Tarih:/...../..... İmza:

Yazar Adı: Tarih:/...../..... İmza:

Yazar Adı: Tarih:/...../..... İmza:

Yazar Adı: Tarih:/...../..... İmza:

Yazar Adı: Tarih:/...../..... İmza:

(Yazar isimleri makaledeki sıraya göre yazılacak ve Telif Hakları Devir Formu tüm yazarlar tarafından imzalanacaktır.)

Makaleyi Gönderen Sorumlu Yazar:

Adı -Soyadı:

Yazışma Adresi:

Telefon: ()

Fax: ()

E-posta:

Bu form makale hakem incelemesi için dergi editörlüğüne kabul edildikten sonra doldurulup imzalandıktan sonra basılı 2 nüsha halinde "Kırklareli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kavaklı Yerleşkesi Değirmencik Yolu Üzeri Kavaklı/ Kırklareli" adresine gönderilmelidir.



JOURNAL of ENGINEERING and SCIENCE
MÜHENDİSLİK ve FEN BİLİMLERİ DERGİSİ
http://fbedergi.klu.edu.tr

COPYRIGHT TRANSFER FORM

Manuscript Title:

Full names of all authors:

The undersigned authors, we guarantee that our submitted manuscript is original work; it has not been published and is not being submitted or considered for publication elsewhere, if, in whole or part of publication of the magazine was published for the above-mentioned receipt of all necessary permits and was sent to Editorial Office of Kırklareli University Journal of Engineering and Science with copyright transfer form.

We agree to waive the right to assume the responsibility of the copyright of the article and thank signature. This article is hereby transferred to the copy right of Kırklareli University. Kırklareli University Journal of Engineering and Science Editor of the publication the article is authorized. However, the authors reverse the following rights:

1. All proprietary rights Copyrights outside, such as patents.
2. to use, free of charge, all parts of this article for the authors' future works in books, lectures.
3. the right to reproduce the article for their own purposes provided the copies are not offered for sale.

Author Name: Date:/...../..... Signature:

Author Name: Date:/...../..... Signature:

Author Name: Date:/...../..... Signature:

Author Name: Date:/...../..... Signature:

Author Name: Date:/...../..... Signature:

Author Name: Date:/...../..... Signature:

(The authors will be written in the order of to appear on manuscript and copyright transfer form should be signed by all authors)

Corresponding Author's:

Name-Surname:

Address:

Phone: ()

Fax: ()

E-mail:

Please, fill in this form after your manuscript accepted by journal editorial for referee review, sign and sent two copies published form to address: "Kırklareli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kavaklı Yerleşkesi Değirmencik Yolu Üzeri Kavaklı/ Kırklareli"